

Stop worrying about
what you have to
lose and start
focusing on what you
have to gain.

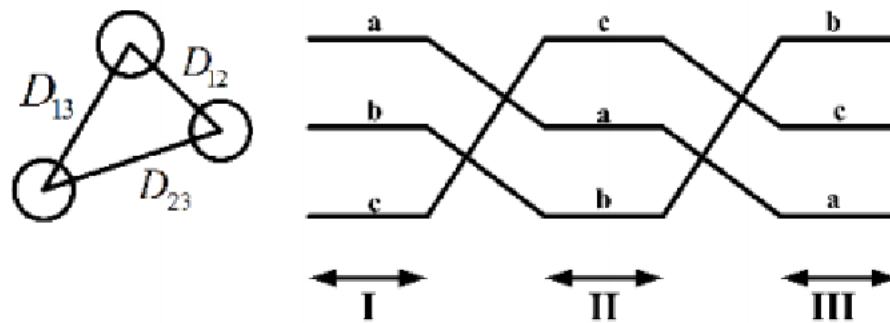
theperks.wordpress.com

فصل سوم محاسبه پارامترهای خط

بهر روز آدینه

پاییز ۱۳۹۴

در اکثر تجزیه و تحلیل‌های سیستم قدرت به مدل هر فاز خط انتقال نیاز است. یک روش مناسب برای ایجاد تقارن و مدل‌سازی هر فاز، جابجایی هادی‌های خط است. این روش شامل جابجایی آرایش فازها برای یک سوم طول خط بوده و هر هادی با یک ترتیب منظم چنان جابجا می‌شود که موقعیت فیزیکی بعدی را اشغال نماید. این ترتیب جابجایی نشان داده شده است.



شکل ۹.۳ خط سه فاز جابجا شده.

از آنجایی که در یک خط جابجا شده^۱، هر سه موقعیت را اشغال می‌کند، اندوکتانس هر فاز را می‌توان با محاسبه مقادیر متوسط بدست آورد:

$$L = \frac{L_a + L_b + L_c}{3}$$

¹ Transposed line

توجه کنید که $a + a^2 = 1 \angle 120^\circ + 1 \angle 240^\circ = -1$ بوده و متوسط روابط برابر است با:

$$L = \frac{2 \times 10^{-7}}{3} \left(3 \ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{D_{12}} - \ln \frac{1}{D_{23}} - \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

or

$$L = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{(D_{12} D_{23} D_{13})^{\frac{1}{3}}} \right) = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{(D_{12} D_{23} D_{13})^{\frac{1}{3}}}{r'}$$

یا اندوکتانس هر فاز در هر کیلومتر طول خط عبارتست از:

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{D_s} \text{ mH/km}$$

که در آن:

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}$$

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{12}} + a \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

$$L_b = \frac{\lambda_b}{I_b} = 2 \times 10^{-7} \left(a \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{23}} \right)$$

$$L_c = \frac{\lambda_c}{I_c} = 2 \times 10^{-7} \left(a^2 \ln \frac{1}{D_{13}} + a \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{r'} \right)$$

دوباره این رابطه مشابه همان رابطه‌ای است که برای اندوکنانس هر فاز یک خط یکفاز بدست آمده بود. فاصله متوسط هندسی (GMD) در واقع همان فاصله‌گذاری معادل هادی می‌باشد. برای خط سه فاز فوق این فاصله با ریشه سوم حاصلضرب فواصل سه فاز برابر است. در اینجا D_s شعاع متوسط هندسی (GMR) می‌باشد. برای هادی رشته‌ای، D_s را می‌توان از اطلاعات داده شده توسط سازندگان بدست

$$\text{آورد. برای هادی توپر داریم: } D_s = r' = re^{-\frac{1}{4}} = 0.7788r$$

در خطوط انتقال پیشرفته، معمولاً از جابجایی استفاده نمی‌شود. هرچند برای مدل‌سازی، بهترین راه عملی اینست که مدار را به صورت جابجا شده در نظر بگیریم. خطایی که در اثر این فرض بوجود می‌آید بسیار ناچیز است.

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{D_s} \text{ mH/km}$$

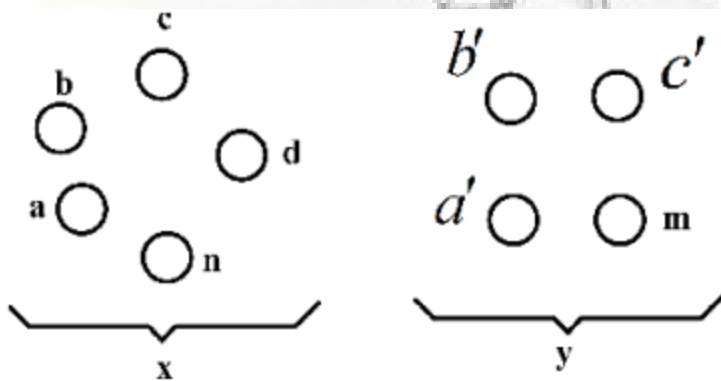
که در آن:

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$$

اندوکتانس هادی های مرکب

در محاسبه اندوکتانس، هادی‌ها به صورت گرد و توپر در نظر گرفته شدند. هرچند، عملاً در خطوط انتقال هادی‌ها به صورت رشته‌ای بکار می‌روند. همچنین، به دلایل اقتصادی، اکثر خطوط EHV با هادی‌ها گروهی ساخته می‌شوند. در این بخش رابطه‌ای برای اندوکتانس هادی‌های مرکب بدست می‌آید. نتیجه آن را می‌توان برای محاسبه GMR هادی‌های رشته‌ای یا گروهی نیز بکار گرفت. این رابطه برای GMR و GMD معادل مدارهای موازی هم مناسب است. خط یکفاز نشان داده شده

شامل دو هادی مرکب X و Y را در نظر بگیرید. جریان هادی X به عنوان مرجع و عمود بر صفحه را I و جریان برگشت در هادی Y را -I در نظر بگیرید. هادی X شامل n رشته یکسان یا هادی‌های فرعی است که شعاع هر یک از آنها r_x بوده و هادی Y شامل m رشته یکسان یا هادی‌های فرعی است که شعاع هر یک از آنها r_y می‌باشد. فرض می‌شود که جریان به طور مساوی بین کلیه هادی‌های فرعی تقسیم شده باشد. جریان در هر رشته از هادی X، دارای مقدار $\frac{I}{n}$ بوده و در هر رشته از هادی Y دارای مقدار $\frac{I}{m}$ می‌باشد. بکارگیری معادله منجر به رابطه زیر برای شار پیوندی کل هادی a می‌شود:



$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{n} \left(\ln \frac{1}{r'_x} + \ln \frac{1}{D_{ab}} + \ln \frac{1}{D_{ac}} + \dots + \ln \frac{1}{D_{an}} \right)$$

$$- 2 \times 10^{-7} \frac{I}{m} \left(\ln \frac{1}{D_{aa'}} + \ln \frac{1}{D_{ab'}} + \ln \frac{1}{D_{ac'}} + \dots + \ln \frac{1}{D_{am}} \right)$$

or

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r'_x D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}}$$

اندوکتانس هادی فرعی (رشته هادی) a برابر است با:

$$L_a = \frac{\lambda_a}{\frac{I}{n}} = 2n \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r'_x D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}}$$

به همین ترتیب با استفاده از معادله ، اندوکتانس رشته‌های دیگر در هادی X بدست می‌آید. به

عنوان مثال، اندوکتانس هادی فرعی n عبارتست از:

$$L_n = \frac{\lambda_n}{\frac{I}{n}} = 2n \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{na'} D_{nb'} D_{nc'} \dots D_{nm}}}{\sqrt[n]{r'_x D_{na} D_{nb} \dots D_{nc}}}$$

اندوکتانس متوسط هر یک از هادی‌های فرعی در هادی مرکب L_x برابر است با:

$$L_{av} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n}$$

از آنجایی که کلیه رشته‌های هادی x از لحاظ الکتریکی موازی هستند، اندوکتانس L_x به صورت زیر است:

$$L_x = \frac{L_{av}}{n} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n^2}$$

با جایگزینی مقادیر $L_a + L_b + L_c + \dots + L_n$ در رابطه () داریم:


$$L_x = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR_x} \frac{H}{m}$$

که در آن:

$$GMD = \sqrt[nm]{(D_{aa'} D_{ab'} \dots D_{am'}) \dots (D_{na'} D_{nb'} \dots D_{nm'})}$$

$$GMR_x = \sqrt[n^2]{(D_{aa} D_{ab} \dots D_{an}) \dots (D_{na} D_{nb} \dots D_{nn})}$$

در روابط فوق داریم: $D_{aa} = D_{bb} = \dots = D_{nn} = r_x$

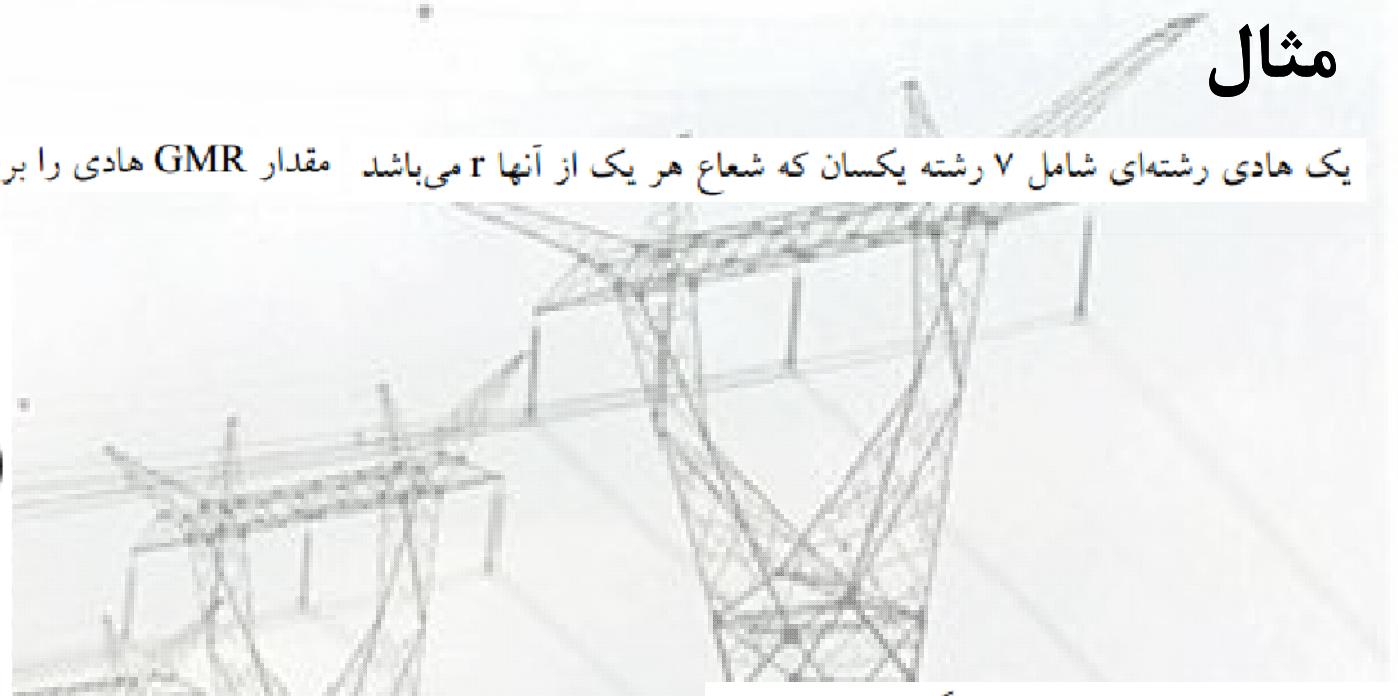
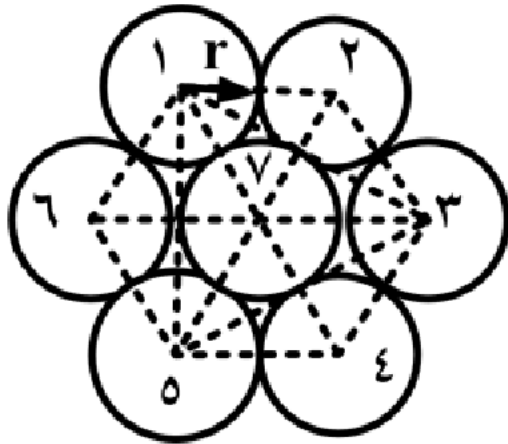


در اینجا GMD ریشه $\sqrt[mn]{mn}$ حاصلضرب mn فاصله میان n رشته از هادی x و m رشته از هادی y است. همچنین GMR_x ریشه $\sqrt[n^2]{n^2}$ حاصلضرب n^2 جمله شامل r' مربوط به هر رشته ضربدر فاصله آن رشته از تمامی رشته‌های هادی مرکب x است.

به همین ترتیب می‌توان اندوکتانس هادی y را بدست آورد. شعاع متوسط هندسی GMR_y متفاوت خواهد بود. هرچند، فاصله متوسط هندسی (GMD) یکسان است.

مثال

یک هادی رشته‌ای شامل ۷ رشته یکسان که شعاع هر یک از آنها r می‌باشد مقدار GMR هادی را برحسب r بدست آورید.



فاصله رشته ۱ از بقیه رشته‌های دیگر برابر است با:

$$D_{12} = D_{16} = D_{17} = 2r, D_{14} = 4r, D_{13} = D_{15} = \sqrt{D_{14}^2 - D_{45}^2} = 2\sqrt{3}r$$

$$GMR = \sqrt[49]{(r' \cdot 2r \cdot 2\sqrt{3}r \cdot 4r \cdot 2\sqrt{3}r \cdot 2r \cdot 2r)^6 \cdot r' (2r)^6} = r^7 \sqrt[7]{(e)^{-\frac{1}{4}} (2)^6 (3)^{\frac{6}{7}} (2)^{\frac{6}{7}}} = 2.1767r$$

GMR هادی فوق عبارتست از:

اگر تعداد رشته‌ها زیاد باشند محاسبه GMR بسیار خسته‌کننده خواهد بود. معمولاً این مقادیر با استفاده از داده‌های سازندگان بدست می‌آیند.

محاسبه GMR هادی‌های گروهی

گروه‌بندی راکتانس خط را کاهش داده و موجب بهبود عملکرد خط و افزایش توانایی انتقال قدرت خط می‌گردد.

گروه‌بندی هادی‌ها موجب کاهش گرادیان ولتاژ در سطح هادی گردیده و تلفات کرونای خط، تداخل

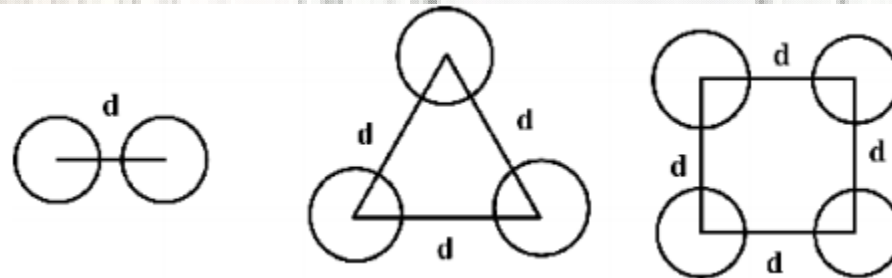
رادیویی و امپدانس موجی را کاهش می‌دهد.

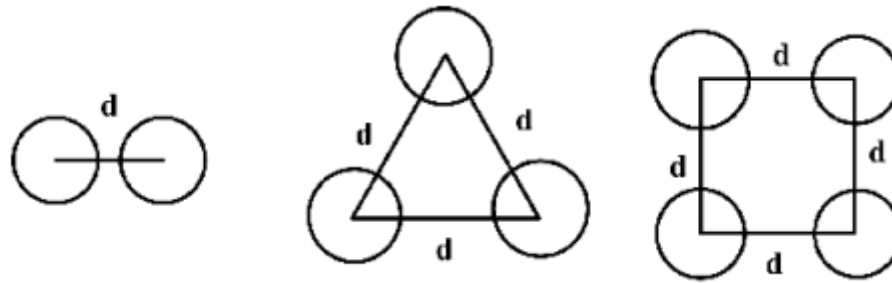
هادی‌های فرعی در یک گروه در فواصل

مساوی بوسیله جداسازی‌های میراکننده در محل‌های خود باقی می‌مانند. این جداسازی‌های میراکننده از

برخورد هادی‌های فرعی با یکدیگر جلوگیری و نوسانات هادی را میرا نموده و هادی‌های فرعی را به

طور موازی به یکدیگر متصل می‌کنند.





اگر GMR هر هادی فرعی را با D_s و فاصله‌گذاری بین هادی‌های یک گروه را با d نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$D_s^b = \sqrt[4]{(D_s \times d)^2} = \sqrt{(D_s \times d)}$$

$$D_s^b = \sqrt[9]{(D_s \times d \times d)^3} = \sqrt[3]{D_s \times d^2}$$

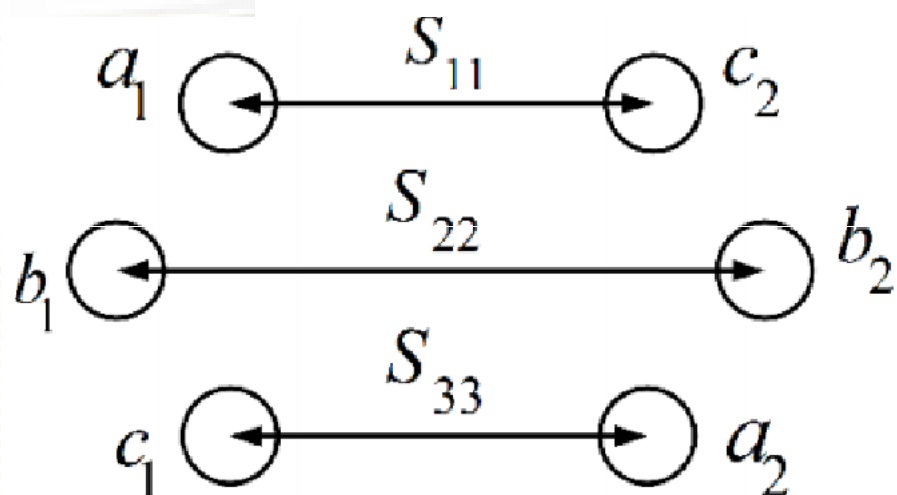
برای گروه با سه هادی فرعی:

$$D_s^b = \sqrt[16]{\left(D_s \times d \times d \times d \times 2^{\frac{1}{2}}\right)^4} = 1.09 \sqrt[4]{D_s \times d^3}$$

و برای گروه با چهار هادی فرعی داریم:

اندوکتانس خطوط دو مدار سه فاز

یک خط دو مدار سه فاز شامل دو مدار سه فاز یکسان است. این مدارها با آرایش $a_1 - a_2$ ، $b_1 - b_2$ و $c_1 - c_2$ به طور موازی عمل می‌کنند. به دلیل اختلاف فواصل میان هادی‌ها، افت ولتاژ ناشی از اندوکتانس خط نامتعادل خواهد بود. برای متعادل‌سازی خط، باید هر هادی فاز در داخل گروه خود و نسبت به خط سه فاز موازی جابجا گردد. یک خط دو مدار سه فاز با موقعیت‌های نسبی فاز مطابق $a_1 b_1 c_1 - c_2 b_2 a_2$ را در نظر بگیرید.



برای تعیین اندوکتانس هر فاز می توان از روش محاسبه GMR استفاده نمود. برای این کار، فازهای یکسان با هم در یک دسته قرار می گیرند و فازها را بدست آورد:

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{a_1 b_1} D_{a_1 b_2} D_{a_2 b_1} D_{a_2 b_2}}$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{b_1 c_1} D_{b_1 c_2} D_{b_2 c_1} D_{b_2 c_2}}$$

$$D_{AC} = \sqrt[4]{D_{a_1 c_1} D_{a_1 c_2} D_{a_2 c_1} D_{a_2 c_2}}$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{AC}}$$

مقدار GMD معادل در هر فاز برابر است با:

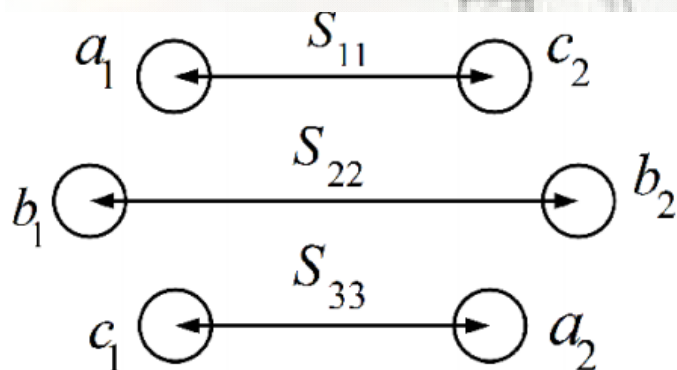
GMR هر دسته از فازها به صورت زیر محاسبه می شود:

$$D_{SA} = \sqrt[4]{(D_s^b D_{a_1 a_2})^2} = \sqrt{D_s^b D_{a_1 a_2}}$$

$$D_{SB} = \sqrt[4]{(D_s^b D_{b_1 b_2})^2} = \sqrt{D_s^b D_{b_1 b_2}}$$

$$D_{SC} = \sqrt[4]{(D_s^b D_{c_1 c_2})^2} = \sqrt{D_s^b D_{c_1 c_2}}$$

که در آن D_s^b شعاع متوسط هندسی هادی های گروهی است

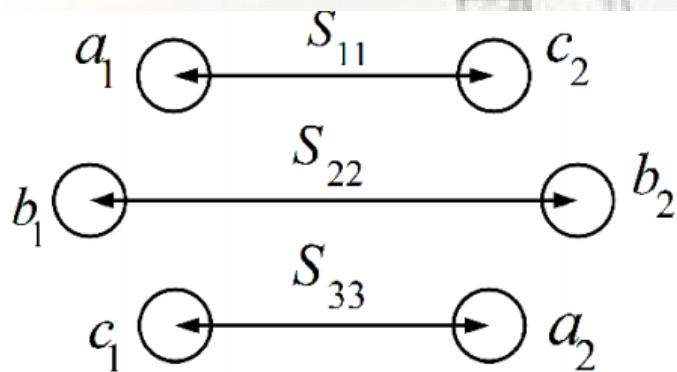


شعاع متوسط هندسی معادل برای محاسبه اندوکتانس هر فاز به خنثی برابر است با:

$$GMR_L = \sqrt[3]{D_{SA} D_{SB} D_{SC}}$$

اندوکتانس هر فاز بر حسب میلی هانری در هر کیلومتر خط عبارتست از:

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{GMR_L} \text{ mH/km}$$



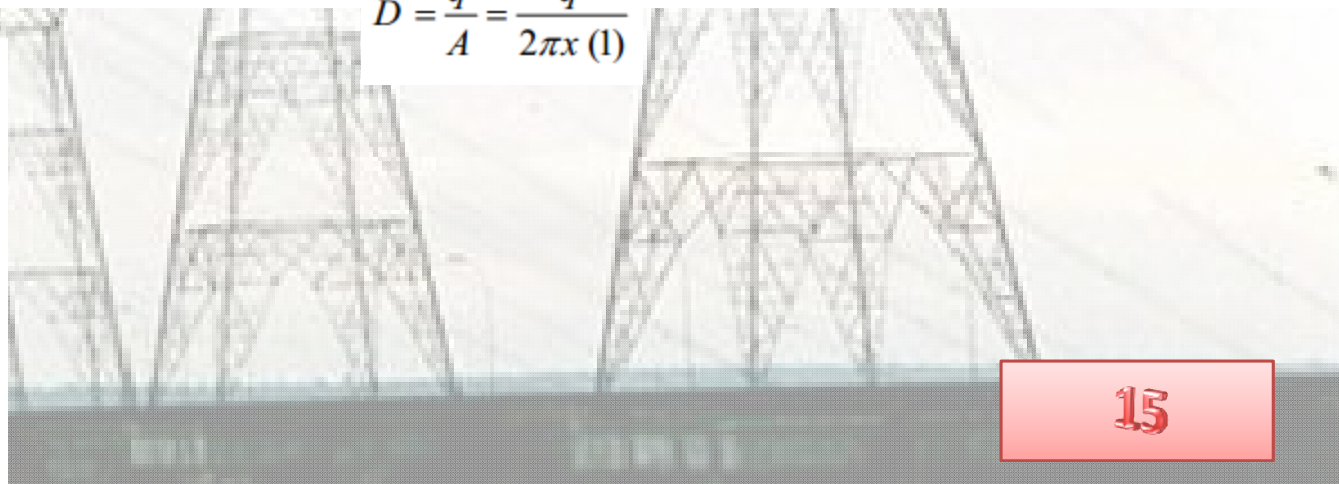
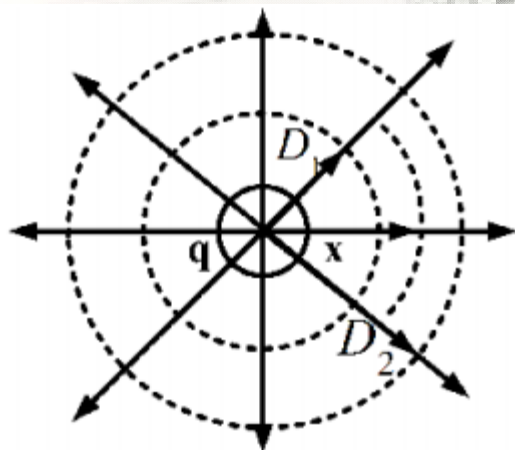
ظرفیت خازنی خط

هادی‌های خط انتقال، به دلیل اختلاف پتانسیل بین آنها، نسبت به یکدیگر ظرفیت خازنی دارند. مقدار ظرفیت خازنی میان هادی‌ها تابعی از اندازه هادی، فاصله میان آنها و ارتفاع آنها از زمین است. طبق تعریف، ظرفیت خازنی C عبارتست از نسبت بار q به ولتاژ V و به صورت زیر می‌باشد:

$$C = \frac{q}{V}$$

یک هادی بلند با شعاع r را که در هر متر طول دارای بار q کولن است در نظر بگیرید. بار روی هادی موجب تولید یک میدان الکتریکی با خطوط شار شعاعی در اطراف آن می‌گردد. شار الکتریکی کل از لحاظ عددی با مقدار بار روی هادی برابر است. شدت میدان در هر نقطه به عنوان نیرو بر واحد بار تعریف شده که به شدت میدان الکتریکی^۲ موسوم است و با E نشان داده می‌شود. استوانه‌های هم مرکز که هادی را احاطه می‌کنند سطوح هم پتانسیل بوده و دارای چگالای و شار الکتریکی یکسان هستند. با استفاده از قانون گوس چگالای شار الکتریکی در یک استوانه به شعاع x برای یک متر طول از هادی برابر است با:

$$D = \frac{q}{A} = \frac{q}{2\pi x (l)}$$



شدت میدان الکتریکی E را می توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد:

$$E = \frac{D}{\epsilon_0}$$

که در آن ϵ_0 ضریب نفوذپذیری الکتریکی هوای آزاد^۱ بوده و مقدار آن $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ می باشد.

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x}$$

اختلاف پتانسیل بین استوانه ها از نقطه D_1 تا D_2 به صورت کار انجام شده بر اثر حرکت دادن یک بار واحد یک کلونی از نقطه D_2 به D_1 و از میان میدان الکتریکی تولید شده توسط بار روی هادی تعریف می شود. با توجه به این تعریف داریم:

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_2}{D_1}$$

نماد V_{12} نشان می دهد که افت ولتاژ از نقطه ۱ به ۲ است، یعنی نقطه ۱ نسبت به نقطه ۲ مثبت می باشد. بار q علامت خود را خواهد داشت.

ظرفیت خازنی خطوط یکفاز

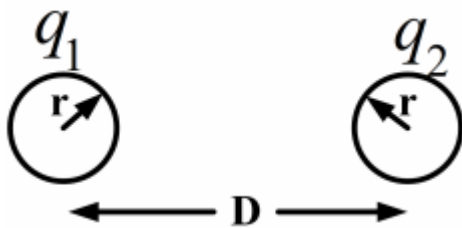
یک متر از یک خط یکفاز بلند شامل دو هادی گرد و توپر را، که شعاع هر یک از آنها r باشد، در نظر بگیرید. فاصله میان دو هادی D است. هادی ۱ دارای بار q_1 کولن بر متر و هادی ۲ دارای بار q_2 کولن بر متر است. حضور هادی دوم و زمین موجب اختلال میدان الکتریکی هادی اول می‌گردد. فاصله میان هادی‌ها (D) بزرگتر از شعاع آنها (r) بوده و ارتفاع هادی‌ها نیز در مقایسه با D بزرگتر است. بنابراین، اثر غیریکنواختی بر میدان کم بوده و توزیع بار روی سطح هادی‌ها یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.

با فرض اینکه هادی ۱ به تنهایی دارای بار q_1 باشد، ولتاژ هادی ۱ نسبت به هادی ۲ برابر است با:

$$V_{12(q_1)} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r}$$

حال فرض می‌کنیم که هادی ۲ به تنهایی دارای بار q_2 باشد، بنابراین ولتاژ هادی ۲ نسبت به هادی ۱

$$\text{عبارتست از: } V_{21(q_2)} = \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r}$$



$$V_{12(q_2)} = \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D}$$

چون $V_{12(q_2)} = -V_{21(q_2)}$ است، پس داریم:

با استفاده از اصل جمع آثار، اختلاف پتانسیل ناشی از حضور هر دو بار برابر است با:

$$V_{12} = V_{12(q_1)} + V_{12(q_2)} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D}$$

$$V_{12} = \frac{q_2}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r}$$

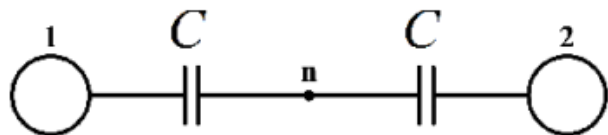
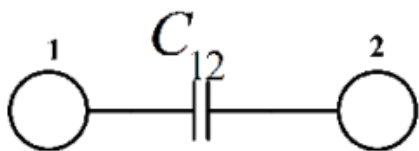
برای یک خط تکفاز $q_2 = -q_1 = -q$

$$C_{12} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} F/m$$

ظرفیت خازنی بین هادی‌ها برابر است با:

ظرفیت خازنی خط به خط هادی‌ها را می‌دهد.

برای مدل‌سازی خط انتقال، بهتر است که ظرفیت خازنی (C) را میان یک هادی و نقطه ختی تعریف کنیم.



از آنجا که ولتاژ نسبت به نقطه خنثی نصف V_{12} است، ظرفیت خازنی نسبت به نقطه خنثی به صورت

زیر است:

$$C = 2C_{12} \Rightarrow C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}}$$

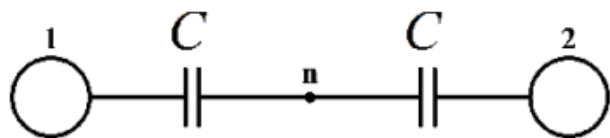
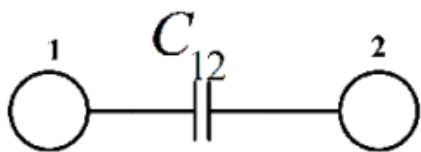
با جایگزینی $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ و تبدیل واحد ظرفیت خازنی به μF در هر کیلومتر، داریم:

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{D}{r}} \mu\text{F/km}$$

ظرفیت خازنی هر فاز شامل جملاتی مشابه آنچه برای اندوکتانس هر فاز بدست آمده بود، می باشد. هر

چند برای اندوکتانس از شعاع متوسط هندسی (GMR) استفاده گردید در حالی که در معادله تعیین

خازنی از شعاع واقعی هادی (r) استفاده می شود.



اختلاف پتانسیل در آرایش هادی‌های متعدد

تعداد n هادی بلند و موازی را که دارای بارهای q_1, q_2, \dots, q_n کولن بر متر هستند،

فرض کنید که اثر غیریکنواختی ناچیز و قابل صرف‌نظر بوده و بار به طور یکنواخت در اطراف هادی با

قید زیر توزیع شده باشد:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = 0$$

، اختلاف پتانسیل بین هادی‌های i و j بواسطه حضور تمامی

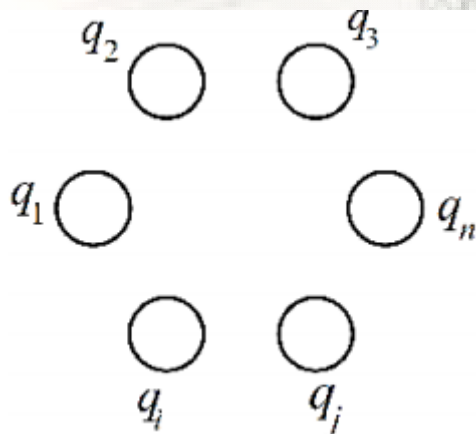
با استفاده از اصل جمع آثار

بارها برابر است با:

$$V_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n q_k \ln \frac{D_{ki}}{D_{kj}}$$

هنگامی که $k = i$ باشد، D_{ii} فاصله بین مرکز و سطح هادی بوده و در واقع همان شعاع هادی (r)

است.



ظرفیت خازنی خطوط سه فاز

یک متر از یک خط سه فاز بلند را که دارای سه هادی است، در نظر بگیرید. شعاع هر یک از هادی‌ها r بوده باشد.

چون سیستم سه فاز متقارن است، خواهیم داشت:

$$q_a + q_b + q_c = 0$$

از اثر زمین و سیم هادی محافظ صرف نظر شده و فرض می‌شود که خط جابجا شده باشد. اختلاف پتانسیل V_{ab} برابر است با:

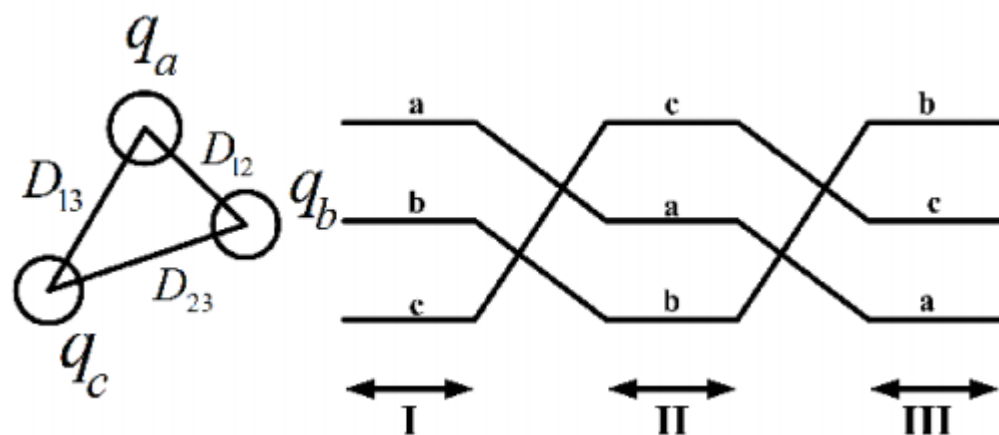
$$V_{ab(I)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{12}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{12}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{13}} \right)$$

$$V_{ab(II)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{23}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{23}} + q_c \ln \frac{D_{13}}{D_{12}} \right)$$

$$V_{ab(III)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{13}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{13}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{23}} \right)$$

به همین ترتیب برای دومین قسمت از هادی جابجا شده داریم:

و برای آخرین قسمت خواهیم داشت:



$$V_{ab(I)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{12}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{12}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{13}} \right)$$

$$V_{ab(II)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{23}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{23}} + q_c \ln \frac{D_{13}}{D_{12}} \right)$$

$$V_{ab(III)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{13}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{13}} + q_c \ln \frac{D_{12}}{D_{23}} \right)$$

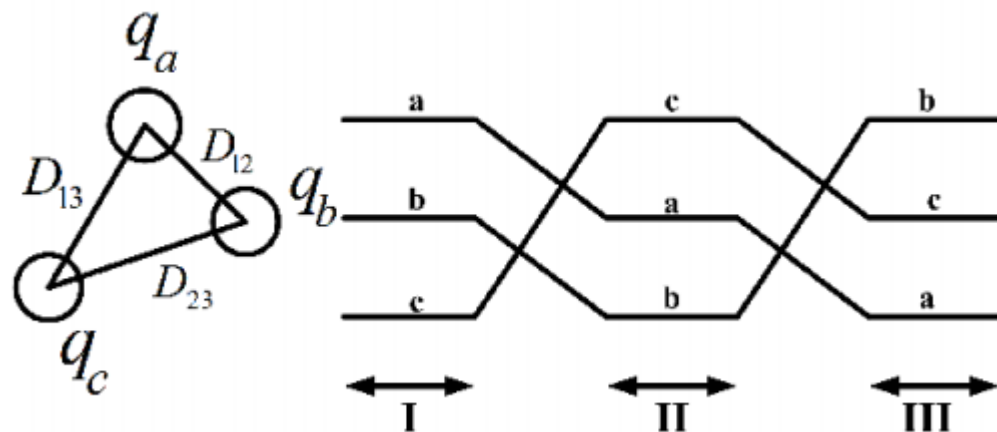
بنابراین مقدار متوسط V_{ab} به صورت زیر است:

$$V_{ab} = \frac{1}{(3)2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{12}D_{23}D_{13}}{r^3} + q_b \ln \frac{r^3}{D_{12}D_{23}D_{13}} + q_c \ln \frac{D_{12}D_{23}D_{13}}{D_{12}D_{23}D_{13}} \right)$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{(D_{12}D_{23}D_{13})^{\frac{1}{3}}}{r^{\frac{1}{3}}} + q_b \ln \frac{r}{(D_{12}D_{23}D_{13})^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$$

توجه کنید که GMD هادی در آرگومان لگاریتم ظاهر شده و برابر است با:



بنابراین V_{ab} عبارتست از:

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{GMD}{r} + q_b \ln \frac{r}{GMD} \right)$$

به همین ترتیب، متوسط ولتاژ V_{ac} محاسبه می‌گردد:

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{GMD}{r} + q_c \ln \frac{r}{GMD} \right)$$

جایگزینی $q_b + q_c = -q_a$ خواهیم داشت:

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(2q_a \ln \frac{GMD}{r} - q_a \ln \frac{r}{GMD} \right) = \frac{3q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{GMD}{r}$$

$$V_{ab} = V_{an} \angle 0^\circ - V_{an} \angle -120^\circ$$

$$V_{ac} = V_{an} \angle 0^\circ - V_{an} \angle -240^\circ$$

برای ولتاژهای سه فاز متعادل داریم:

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an}$$

$$C = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} \text{ F/m}$$

ظرفیت خازنی هر فاز به نقطه خنثی به صورت زیر است:

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{GMD}{r}} \mu\text{F/km}$$

یا ظرفیت خازنی هر فاز به نقطه خنثی بر حسب μF در هر کیلومتر برابر است با:

اثر گروه‌بندی

روش محاسبه ظرفیت خازنی هر فاز از خط سه فاز جابجا شده با هادی‌های گروهی شامل همان مراحل است. ظرفیت خازنی هر فاز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r^b}} F/m$$

گروه‌بندی موجب تبدیل شعاع r به شعاع معادل r^b است. شعاع معادل r^b مشابه GMR (شعاع متوسط هندسی) است که قبلاً برای اندوکتانس محاسبه گردید، با این تفاوت که به جای D_s از شعاع هر یک از هادی‌های فرعی (r) استفاده می‌شود. اگر d فاصله‌گذاری میان هادی‌های فرعی یک گروه باشد، شعاع معادل برای یک هادی گروهی با دو هادی فرعی برابر است با:

$$r^b = \sqrt{r \times d}$$

برای هادی‌های گروهی با سه هادی فرعی داریم:

$$r^b = \sqrt[3]{r \times d^2}$$

و برای هادی‌های گروهی با چهار هادی فرعی نیز خواهیم داشت:

$$r^b = 1.09 \sqrt[4]{r \times d^3}$$

ظرفیت خازنی خطوط سه فاز دو مداره

یک خط سه فاز دو مداره با آرایش فاز $a_1b_1c_1 - c_2b_2a_2$ را در نظر بگیرید.
هر هادی

فاز در داخل گروه خود و نسبت به خط سه فاز موازی جابجا شده است. برای این وضعیت متعادل، اثر زمین و سیم‌های محافظ ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است.

ظرفیت خازنی معادل هر فاز به نقطه خنثی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR_c}} F/m$$

یا ظرفیت خازنی خط به نقطه خنثی بر حسب μF در هر کیلومتر برابر است با:

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{GMD}{GMR_c}} \mu F/km$$

رابطه GMD همان رابطه‌ای است که برای محاسبه اندوکتانس بدست آمد

مقدار GMR_C برای هر دسته از هادی‌های فاز، مشابه GMR_L است.

با این تفاوت که به جای D_s^b از r^b استفاده می‌شود. این امر منجر به معادلات زیر می‌گردد:

$$r_A = \sqrt{r^b D_{a_1 a_2}}$$

$$r_B = \sqrt{r^b D_{b_1 b_2}}$$

$$r_C = \sqrt{r^b D_{c_1 c_2}}$$

که در آن r^b شعاع متوسط هندسی هادی‌های گروهی است

$$GMR_C = \sqrt[3]{r_A r_B r_C}$$

شعاع متوسط هندسی معادل برای محاسبه ظرفیت خازنی هر فاز به نقطه خشی عبارتست از:

ظرفیت خازنی با در نظر گرفتن اثر زمین

در یک هادی باردار مجزا^۱ خطوط شار الکتریکی شعاعی بوده و بر سطوح استوانه‌ای هم پتانسیل عمود هستند. حضور زمین موجب دگرگونی توزیع خطوط شار الکتریکی و سطوح هم پتانسیل گردیده و ظرفیت خازنی موثر خط را تغییر می‌دهد.

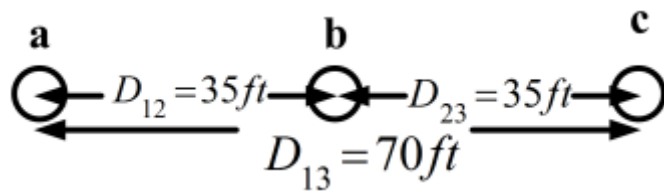
سطح زمین مانند یک سطح هم پتانسیل بوده و بنابراین خطوط شار، سطح زمین را به صورت عمودی قطع می‌کنند. اثر حضور زمین را می‌توان با استفاده از روش بارهای فرضی^۱، که توسط کلونین معرفی شده است، بدست آورد. برای روشن شدن این روش، یک هادی دارای بار q کولن بر متر را در نظر بگیرید که در ارتفاع H بالای سطح زمین قرار گرفته است. همچنین، تصور کنید که یک بار $-q$ در عمق H زیر سطح زمین قرار گرفته باشد. این آرایش بدون حضور زمین همان توزیع میدان الکتریکی را خواهد داشت که بار به تنهایی با حضور زمین دارد. بنابراین، برای محاسبه پتانسیل میدان الکتریکی می‌توان زمین را با یک هادی فرضی باردار با بار مساوی و خلاف بار روی هادی اصلی جایگزین نمود. عمق هادی فرضی در زیر سطح زمین با ارتفاع هادی اصلی بالای زمین برابر است. این هادی فرضی، تصویر هادی اصلی نامیده می‌شود.

حضور زمین موجب افزایش ظرفیت خازنی می‌گردد. اما معمولاً ارتفاع هادی در مقایسه با فاصله میان هادی‌ها زیاد بوده و اثر زمین قابل صرف نظر کردن است. بنابراین، برای کلیه مدل‌های خط که در اثر تجزیه و تحلیل حالت ماندگار استفاده می‌شوند از اثر زمین روی ظرفیت خازنی صرف نظر می‌شود. هر چند در بررسی‌هایی مانند خطاهای نامتقارن، باید اثر زمین و سیم‌های محافظ را در نظر گرفت.

مثال

یک خط سه فاز جابجا شده با ولتاژ $500kV$ یک هادی ACSR از نوع Bitten 45.7 با اندازه 1272000 cmil در هر فاز تشکیل شده است. آرایش هادی به صورت افقی است.

قطر هر یک از هادی‌ها 1.345 اینچ و GMR آنها 0.5328 اینچ می‌باشد. اندوکتانس و ظرفیت خازنی هر فاز را در هر کیلومتر خط بدست آورید.



$$r = \frac{1.345}{2 \times 12} = 0.056 \text{ ft}, GMR_L = \frac{0.5328}{12} = 0.0444 \text{ ft}$$

شعاع هادی برابر است با:

$$GMD = \sqrt[3]{35 \times 35 \times 70} = 44.097 \text{ ft}$$

مقدار GMD هادی

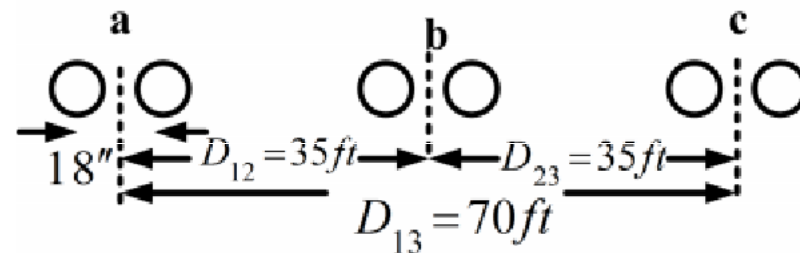
$$L = 0.2 \ln \frac{44.097}{0.0444} = 1.38 \text{ mH/km}$$

اندوکتانس هر فاز

ظرفیت خازنی هر فاز

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{44.097}{0.056}} = 0.0083 \text{ } \mu\text{F/km}$$

خط انتقال مثال با دو هادی ACSR از نوع 24.7 Rook با اندازه 636000cmil جایگزین گردیده است. به طوری که کل سطح مقطع آلومینیوم آن با سطح مقطه آلومینیوم یک هادی Bittern برابر است. فاصله بین خطوط از مرکز هادی‌های گروهی اندازه‌گیری شده و دارای همان مقدار قبلی می‌باشد. هادی‌ها دارای قطر ۰.۹۷۷ اینچ و GMR آنها ۰.۳۹۲۴ اینچ است. فاصله بین هادی‌های فرعی یک گروه ۱۸ اینچ می‌باشد. اندوکتانس و ظرفیت خازنی هر فاز را در هر کیلومتر خط بدست آورده و با مقادیر بدست آمده در مثال مقایسه کنید.



$$r = \frac{0.977}{2} = 0.4885 \text{ in} \text{ شعاع هادی برابر است با:}$$

$$\text{از مثال ۲-۴ داریم: } GMD = 44.097 \text{ ft}$$

برای محاسبه اندوکتانس و ظرفیت خازنی، شعاع متوسط هندسی معادل، با دو هادی در هر گروه بوسیله

$$GMR_L = \frac{\sqrt{d \times D_s}}{12} = \frac{\sqrt{18 \times 0.3924}}{12} = 0.22147 \text{ ft} \text{ روابط (۵۱.۳) و (۸۸.۳) بدست می آید:}$$

$$\text{و } GMR_c = \frac{\sqrt{d \times r}}{12} = \frac{\sqrt{18 \times 0.3924}}{12} = 0.22147 \text{ ft}$$

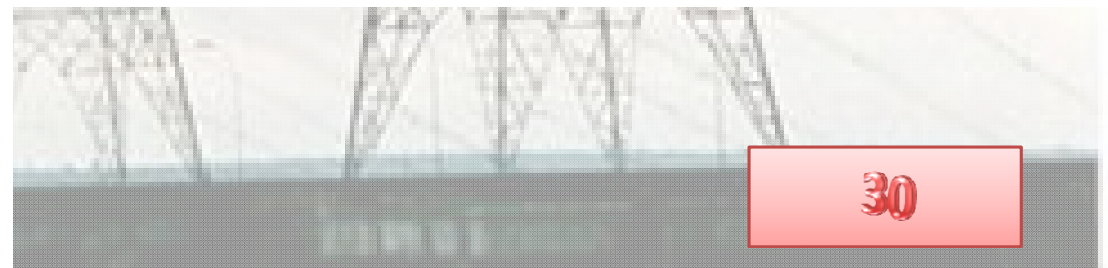
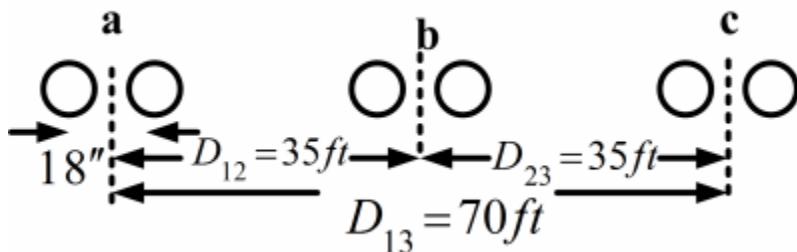
$$\text{رابطه (۵۸.۳) اندوکتانس هر فاز را به صورت زیر می دهد: } L = 0.2 \ln \frac{44.097}{0.22147} = 1.0588 \text{ mH/km}$$

و با استفاده از رابطه (۹۴.۳) ظرفیت خازنی هر فاز محاسبه می شود:

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{44.097}{0.2471}} = 0.0107 \text{ } \mu\text{F/km}$$

مقایسه با نتایج بدست آمده در مثال ۲-۴ نشان می دهد که اندوکتانس ۲۲.۳ درصد کاهش و ظرفیت

خازنی خط ۲۸.۹ درصد افزایش یافته است.



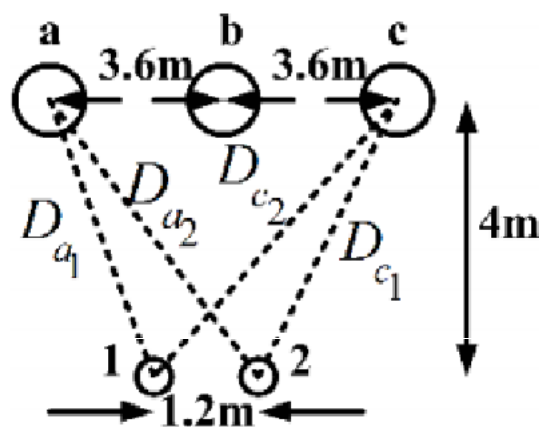
میدان‌های مغناطیسی خط انتقال بر روی اشیای نزدیک خط اثر می‌گذارند. میدان‌های مغناطیسی به جریان‌های خط مربوط می‌شوند و در اشیایی که طول قابل ملاحظه‌ای داشته و موازی با خط هستند، مانند حصارهای فلزی، لوله‌ها و سیم‌های تلفن، ولتاژ القا می‌کنند.

میدان مغناطیسی توسط جریان‌های برگشتی زمین تحت تاثیر قرار می‌گیرد. کارسن معادله‌ای برای محاسبه اندوکتانس و مقاومت متقابل که تابعی از مقاومت ویژه زمین می‌باشند ارائه نموده است. در سیستم‌های سه فاز متقارن، کل جریان برگشتی زمین صفر است. در شرایط عملکرد عادی، میدان

مغناطیسی در مجاورت خطوط سه فاز متعادل را می‌توان با در نظر گرفتن جریان‌های هادی و صرف‌نظر از جریان‌های زمین محاسبه نمود.

گزارش‌ها نشان می‌دهند که میدان‌های مغناطیسی به روی ترکیب خون، رشد، رفتار، سیستم‌های دفاعی و عملکرد نرون‌های عصبی بدن تاثیر می‌گذارند. آثار بیولوژیکی میدان‌های الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی بر روی انسان مورد توجه عموم بوده است. آثار بلند مدت تحقیقات وسیع و گوناگون نسازمند است.

یک خط انتقال سه فاز جابجا نشده و یک خط تلفن بر روی یک برج قرار دارند .
 قدرت دارای جریان متعادل ۶۰ هرتز و ۲۰۰ آمپر در هر فاز بوده و خط تلفن مستقیماً در زیر فاز b قرار دارد. با فرض متعادل بودن جریان‌های سه فاز در خط قدرت، ولتاژ القا شده در هر کیلومتر خط تلفن را محاسبه کنید.



$$\lambda_{12(I_a)} = 0.2 I_a \ln \frac{D_{a2}}{D_{a1}} \text{ mWb/km}$$

شار پیوندی بین هادی‌های ۱ و ۲ ناشی از جریان I_a برابر است با:

چون $D_{b1} = D_{b2}$ است، از این رو λ_{12} ناشی از جریان I_b صفر است. شار پیوندی بین هادی ۱ و ۲ ناشی

$$\text{از جریان } I_c \text{ عبارتست از: } \lambda_{12(I_c)} = 0.2 I_c \ln \frac{D_{c2}}{D_{c1}} \text{ mWb/km}$$

شار پیوست کل بین هادی‌های ۱ و ۲ ناشی از تمامی جریان‌ها به صورت زیر است:

$$\lambda_{12} = 0.2 I_a \ln \frac{D_{a2}}{D_{a1}} + 0.2 I_c \ln \frac{D_{c2}}{D_{c1}} \text{ mWb/km}$$

برای توالی فاز مثبت و جریان I_a به عنوان مرجع، داریم: $I_c = I_a \angle -240^\circ$

$$\lambda_{12} = 0.2 I_a \left(\ln \frac{D_{a2}}{D_{a1}} + 1 \angle -240^\circ \ln \frac{D_{c2}}{D_{c1}} \right) \text{ mH/km}$$

چنانچه I_a به عنوان جریان مرجع انتخاب شده باشد، شار پیوندی لحظه‌ای برابر است با:

$$\lambda_{12}(t) = \sqrt{2} |\lambda_{12}| \cos(\omega t + \alpha)$$

بنابراین ولتاژ القا شده در هر کیلومتر خط تلفن عبارتست از:

$$v = \frac{d\lambda_{12}(t)}{dt} = \sqrt{2} \omega |\lambda_{12}| \cos(\omega t + \alpha + 90^\circ)$$

ولتاژ rms القا شده در هر کیلومتر خط تلفن مطابق زیر بدست می‌آید:

$$V = \omega |\lambda_{12}| \angle(\alpha + 90^\circ) = j \omega \lambda_{12}$$

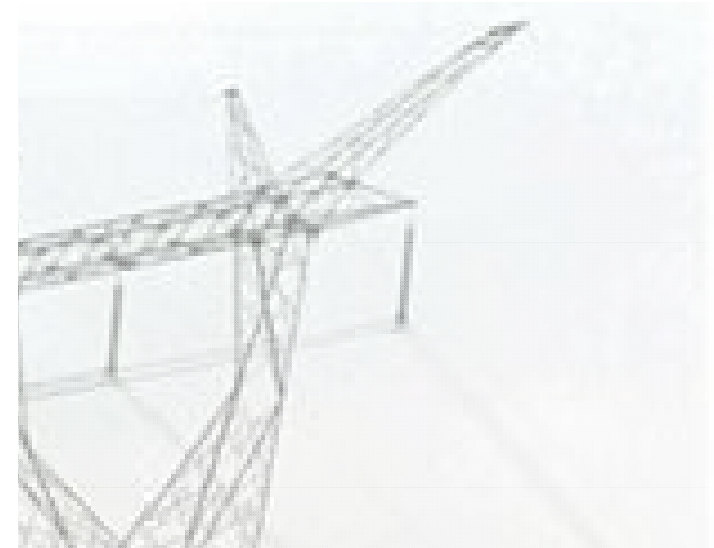
با توجه به شکل هندسی مدار داریم:

$$D_{a1} = D_{c2} = (3^2 + 4^2)^{\frac{1}{2}} = 5 \text{ m}, D_{a2} = D_{c1} = ((4.2)^2 + 4^2)^{\frac{1}{2}} = 5.8 \text{ m}$$

شار پیوندی کل برابر است با:

$$\lambda_{12} = 0.2 \times 200 \angle 0^\circ \ln \frac{5.8}{5} + 0.2 \times 200 \angle -240^\circ \ln \frac{5}{5.8} = 10.38 \angle -30^\circ \text{ mWb/km}$$

ولتاژ القا شده در هر کیلومتر خط تلفن به صورت زیر محاسبه می‌شود: $V = j \omega \lambda_{12} = j 2\pi \times 60 (10.283 \angle -30^\circ) (10^{-3}) = 3.88 \angle 60^\circ \text{ V/km}$



میدان‌های الکتریکی خط انتقال روی اشیای مجاور خط تاثیر می‌گذارند. میدان الکتریکی خطوط فشار قوی جریانی را در اشیایی که در منطقه میدان‌های الکتریکی قرار گرفته‌اند، القا می‌کند. اثرات میدان‌های الکتریکی در ولتاژهای بالا افزایش می‌یابد. میدان‌های الکتریکی که به ولتاژ خط مربوط می‌شوند، علت اصلی القا در وسایل نقلیه، ساختمان‌ها و اجسام هم‌اندازه آنها می‌باشد. بدن انسان در مقابل تخلیه بارهای الکتریکی از اجسام باردار در میدان خط، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. این تاثیر می‌تواند به صورت جریان دائمی یا جرقه‌های ناشی از تخلیه بارها باشد. چگالی جریان القا شده در بدن انسان توسط میدان‌ها الکتریکی خطوط انتقال خیلی بیشتر از جریان القا شده بوسیله میدان‌های مغناطیسی است.

میدان الکتریکی متوجه در مجاورت خط انتقال را می‌توان با در نظر گرفتن اثر زمین بوسیله بارهای فرضی که در عمقی برابر با ارتفاع هادی‌ها و درست زیر آنها قرار گرفته‌اند بدست آورد.

کرونا

چنانچه گرادیان ولتاژ در سطح یک هادی بیش از شدت دی‌الکتریک هوای اطراف هادی گردد، در نواحی نزدیک به سطح هادی یون‌زایی^۲ رخ می‌دهد. این یون‌زایی جزئی را کرونا^۳ می‌گویند. شدت در الکترونیک هوا در شرایط هوای صاف و در دما و فشار طبیعی (NTP^۴)، یعنی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار ۷۶ سانتی‌متر جیوه، تقریباً 30 kV/cm است.

^۱ Electrostatic induction

^۲ Ionization

^۳ Corona

^۴ Natural Temperature and Pressure

کرونا موجب تلفات توان، صدای وزوز قابل شنیدن در نزدیکی خط، تولید ازون^۱ و اختلال در امواج رادیو و تلویزیون می‌گردد. اغتشاش صوتی در شرایط بد آب و هوایی رخ داده و یک مشکل زیست محیطی محسوب می‌شود. تداخل رادیویی در باند AM رخ می‌دهد. در مناطق با علائم ضعیف^۲، باران و برف می‌توانند موجب تداخل امواج تلویزیونی (TVI) گردند. کرونا تابعی از قطر هادی، آرایش خطوط، نوع هادی و شرایط سطح هادی می‌باشد. شرایط محیطی، نظیر چگالی هوا، رطوبت و باد، پدید آمدن کرونا را تحت تاثیر قرار می‌دهند. تلفات کرونا در باران یا برف چندین برابر تلفات در هوای صاف است. ناهمواری روی سطح هادی مانند ذرات آلودگی می‌تواند موجب چنان گرادیانی در ولتاژ سطح هادی شود که آن نقطه منبع تخلیه بار الکتریکی گردد. همچنین، عایق‌ها بوسیله گرد و خاک یا تجمع مواد شیمیایی آلوده شده، ولتاژ شکست کاهش یافته و در نتیجه تلفات کرونا افزایش می‌یابد. برای کاهش ابعاد این مسئله، عایق‌ها به صورت دوره‌ای تمیز می‌شوند. کرونا را می‌توان با افزایش اندازه هادی و استفاده از گزوه‌بندی هادی‌ها کاهش داد.

تلفات توان مربوط به کرونا را می‌توان با رسانایی موازی^۳ نمایش داد. هرچند، در شرایط عملکرد عادی، g که نشان‌دهنده نشت مقاومتی^۴ بین یک فاز و زمین است اثر ناچیزی بر عملکرد خط داشته و معمولاً صرف‌نظر می‌شود (یعنی $g = 0$).