

فصل سوم

پارامترهای خطوط انتقال

۱-۳ مقدمه

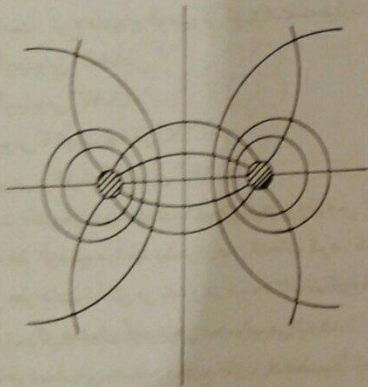
خطوط انتقال وسیله انتقال انرژی الکتریکی از محل تولید به محل های مصرف می باشند. این انرژی تحت ولتاژهای بالا از طریق خطوط هوایی، کابل های زیر زمینی و یا خطوط عایق شده با گاز انتقال می یابد. اکثر خطوط انتقال موجود در دنیا از نوع خطوط هوایی^۱ سه فاز با هادیهای لخت^۲ هستند که عایق بین هادیها هوا می باشد. با افزایش ولتاژ یک خط، افت ولتاژ و تلفات خط کاهش یافته و قابلیت انتقال قدرت^۳ افزایش می یابد.

ولتاژ خطوط انتقال از سال ۱۸۹۰ میلادی از سطح ۳۳۰۰ V به ۱۱ KV در سال ۱۸۹۶ رسید که قدرت ۱۰ MW را از آبشار نیاگارا به بوفالونیویورک با طول ۳۲ Km انتقال می داد. در سال ۱۹۳۶ خط انتقال ۲۸۷KV به طول ۴۳۰ Km با قدرت انتقالی ۲۴۰ MW نصب گردید. اولین خط انتقال ۴۰۰KV که ژنراتورهای آبی شمال سوئد را به بارهای جنوبی آن کشور متصل می کرد شروع بکار کرد. در سال ۱۹۶۴ بهره برداری از اولین خط انتقال ۵۰۰KV در ویرجینیا آغاز شد. در همان سال کمپانی هیدروکبک^۴ در کانادا خط انتقال ۷۳۵KV خود را بطول ۶۰۰ Km مورد استفاده قرار داد. در سال ۱۹۶۹ خط ۷۶۵KV توسط AEP در آمریکا نصب گردید. از سال ۱۹۸۰ بیعد نیز برنامه ریزی و مطالعه جهت استفاده از خطوط ۱۱۰۰KV آغاز شده است.

1. Aerial Lines (Overhead Lines)
2. Bare Conductors
3. Power Transmittability
4. Hydro Quebec

خطوط هوایی و یا از طریق عایق های کابل ها در نظر گرفته می شود. از آنجائیکه تحت بر روی مقره ها در خطوط هوایی قابل صرف نظر است لذا آنرا در محاسبات برابر صفر منظور می کنیم.

بر اثر عبور جریان از یک خط انتقال، میدانهای مغناطیسی و الکتریکی در اطراف آن بوجود می آیند. شکل (۳-۲) یک خط انتقال یک فاز را با میدانهای مغناطیسی و الکتریکی مربوط به آن نشان می دهد. خطوط شار مغناطیسی^۲ حلقه های بسته ای را تشکیل می دهند و خطوط شار الکتریکی^۳ از بارهای الکتریکی مثبت یک هادی شروع و به بارهای منفی روی هادی دیگر ختم می شوند.



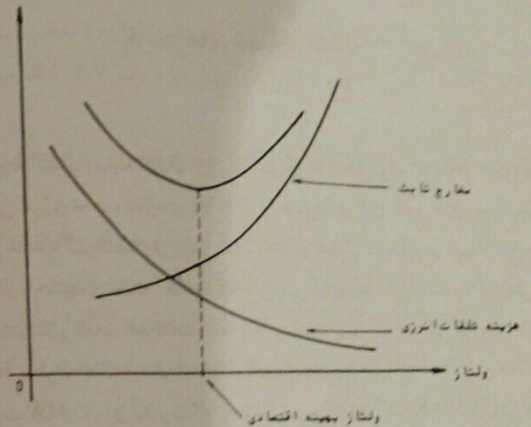
شکل ۳-۲ میدانهای مغناطیسی و الکتریکی مربوط به یک خط دو سیمه

تغییر جریان در هادیها باعث تغییر در تعداد خطوط مغناطیسی پیوست با مدار می گردد. اندوکتانس خاصیتی از مدار است که نسبت ولتاژ القاء شده بر اثر تغییر شار به آهنگ تغییر جریان^۴ نسبت به زمان را نشان می دهد. کاپاسیتانس پذیرده ایست که بین دو هادی بوجود

1. Insulations
2. Magnetic Flux
3. Electric Flux
4. Rate of Change of Current

رابطه (۲-۳۵) نشان می دهد که هزینه تلفات انرژی با افزایش سطح ولتاژ کاهش می یابد، در حالیکه مخارج ثابت شامل برجهای انتقال، مقره ها و ... با زیاد شدن ولتاژ افزایش می یابد. همانطوریکه در شکل (۳-۱) نشان داده شده است، مخارج کل انتقال در سطح ولتاژ مشخصی به حداقل می رسد. این ولتاژ بهینه اقتصادی^۱ با اضافه شدن طول خط افزایش می یابد.

مخارج انتقال

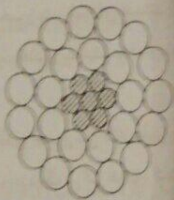


شکل ۳-۱ انتخاب سطح ولتاژ بهینه اقتصادی

یک خط انتقال دارای چهار پارامتر است: اندوکتانس، کاپاسیتانس، مقاومت^۲ و کندوکتانس^۳. در این فصل سه پارامتر اول مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. کندوکتانس بین هادیها و یا بین هادیها و زمین بخاطر جریان ناشی^۴ بر روی مقره های^۵

1. Optimum Economic Voltage
2. Resistance
3. Conductance
4. Leakage Current
5. Insulators

استفاده می شود. این رشته ها از نظر الکتریکی سرآزی یکدیگر بوده و در طول هادی به صورت مارپیچ بر روی هم قرار دارند. برای بالا بردن استقامت مکانیکی هادیها، درون آنها را با رشته های فولادی یا آلیاژ های فلزی دیگر تقویت می کنند. طوری که یکی از انواع هادیهای ACSR و یا ACAR بدست می آید. هادی ACSR بیشتر از تمام هادیهای ذکر شده در خطوط انتقال بکار می رود. شکل (۳-۳) یک هادی آلومینیومی با تقویت فولادی (ACSR) را نشان می دهد. در این هادی ۷ رشته فولادی هست مرکزی را تشکیل می دهند و اطراف آنها ۲۴ لایه از رشته های آلومینیومی قرار دارند. رشته های آلومینیومی در ۲ لایه خارجی ۲۴ عدد می باشد. مشخصات چنین هادی بصورت $24Al/7S$ و یا بطور خلاصه $24/7$ نشان داده می شود.



شکل ۳-۳ هادی آلومینیومی با تقویت فولادی ۲۴/۷

۳-۳ مقاومت خطوط انتقال

عامل اصلی تلفات توان در یک خط انتقال مقاومت اهمی آن می باشد. مقاومت موثر یک خط انتقال که به مقاومت AC موسوم است طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$R = \frac{\text{تلفات قدرت در هادی}}{|I|^2} \quad \Omega \quad (3-1)$$

در این رابطه تلفات قدرت بر حسب وات و I جریان موثر هادی بر حسب آمپر می باشند. مقاومت DC خط انتقال برابر است با:

$$R_c = \frac{\rho l}{A} \quad \Omega \quad (3-2)$$

در این رابطه ρ مقاومت ویژه هادی بر حسب اهم-متر، A طول هادی بر حسب متر و l سطح مقطع هادی بر حسب متر مربع است. مقدار ρ برای آلومینیوم در حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد برابر $\rho = 2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ است. مقدار مقاومت ویژه ρ در نتیجه مقاومت DC بر اثر

می آید و برابری است با نسبت بار الکتریکی روی هادیها به اختلاف پتانسیل بین آنها. مقاومت و اندوکتانس، امپدانس های سری خط را تشکیل می دهند. گندوگتانس و کاپاسیتانس بین هادیهای یک فاز و یا بین یک هادی و نقطه صفر یک خط سه فاز، ادیتمانس موازی خط انتقال هستند. گرچه مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس در طول خط به طور یکنواخت گسترده اند^۱، لیکن مدار معادل خط انتقال را بصورت پارامترهای متمرکز^۲ نشان می دهند.

۳-۲ انواع هادیهای خط انتقال

در سالهای اولیه انتقال انرژی، از هادیهای مسی استفاده می شد، اما در حال حاضر هادیهای آلومینیومی کاملاً جایگزین هادیهای مسی شده اند. علت استفاده از آلومینیوم وزن سبکتر و قیمت کمتر است. انواع هادیهای آلومینیومی مورد استفاده عبارتند از:

هادی تمام آلومینیومی^۳ AAC

هادی آلیاژ آلومینیومی^۴ AAAC

هادی آلومینیومی با تقویت فولادی^۵ ACSR

هادی آلومینیومی با تقویت آلیاژ فلزی^۶ ACAR

قابلیت هدایت الکتریکی و استقامت مکانیکی آلومینیوم از مس کمتر است. لذا برای عبور جریان مساوی، قطر آلومینیوم را باید بیشتر از مس انتخاب کرد. تنش الکتریکی^۷ هادی آلومینیومی با افزایش قطر هادی کاهش می یابد و در نتیجه تلفات کرونا^۸ کم می شود و این موضوع نیز امتیاز دیگری برای هادیهای آلومینیومی محسوب می شود.

در عمل بخاطر دست یابی به سطح مقطع های زیاد معمولاً از هادیهای رشته ای^۹

1. Uniformly Distributed
2. Lumped Parameters
3. All Aluminum Conductor
4. All Aluminum Alloy Conductor
5. Aluminum conductor Steel Reinforced
6. Aluminum Conductor Alloy Reinforced
7. Electrical Stress
8. Corona Loss
9. Stranded Conductors

تغییر می کند و اگر ضریب نفوذ مغناطیسی¹ ثابت فرض شود شار پیوست متناسب است با جریان، و بنابراین ولتاژ القاء شده متناسب است با آهنگ تغییرات جریان نسبت به زمان. این تناسب را می توان بصورت زیر نوشت:

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (3-5)$$

که L ضریب تناسب رابطه فوق اندوکتانس نامیده می شود و واحد آن هانری (H) است. با مقایسه دو رابطه (3-4) و (3-5) داریم:

$$L = \frac{d\tau}{di} H \quad (3-6)$$

اگر شار مغناطیسی پیوست مدار بر حسب جریان بصورت خطی تغییر کند (ضریب نفوذ مغناطیسی ثابت باشد) داریم:

$$L = \frac{\tau}{i} H \quad (3-7)$$

در اینجا τ و ψ مقادیر لحظه ای شار پیوست و جریان الکتریکی هستند. اگر جریان سینوسی باشد شار پیوست نیز سینوسی بوده و چنانچه ψ و ψ مقادیر فازور شار پیوست و جریان در نظر گرفته شوند خواهیم داشت:

$$\psi = LI \quad \text{یا} \quad L = \frac{\psi}{I} \quad (3-8)$$

چون ψ و I هم فاز هستند L یک عدد حقیقی خواهد بود. مقدار فازور افت ولتاژ بر اثر شار پیوست نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$V = j\omega LI = j\omega\psi \quad (3-9)$$

3-5 اندوکتانس یک هادی بر اثر شار داخلی²

تغییر خطوط شار در داخل هادی، در ولتاژ القاء شده مدار و در نتیجه اندوکتانس آن

1. Permeability
2. Internal Flux

تغییرات حرارت تغییر می کند. اگر R_1 و R_2 بترتیب مقاومت در درجه حرارت هادی باشند داریم:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (3-3)$$

در این رابطه α ضریب حرارت هادی است. این ضریب برای آلومینیوم در حرارت 20° درجه سانتیگراد برابر 0.0039 می باشد. در رابطه (3-3) می توان t_1 را برابر 20° در نظر گرفت و با استفاده از $\alpha = 0.0039$ و R_1 که مقاومت هادی در 20° می باشد مقاومت هادی R_2 را در درجه حرارت t_2 بدست آورد.

مقاومت موثر AC چند درصد از مقاومت DC بیشتر است زیرا:

1- هادیهای خطوط انتقال بصورت رشته ای هستند که بصورت مارپیچ روی هم قرار گرفته اند، لذا طول رشته ها از طول هادی بیشتر بوده و در نتیجه مقاومت خط افزایش می یابد.

2- جریان AC که از یک هادی عبور می کند بطور یکنواخت در سطح مقطع هادی توزیع نمی شود بلکه چگالی جریان در نزدیک مرکز هادی کمتر بوده و تمایل دارد که در سطح جانبی هادی تمرکز یابد. این موضوع به اثر پوستی¹ معروف است. اثر پوستی باعث کاهش سطح مقطع موثر و در نتیجه افزایش مقاومت هادی می گردد.

3-4 تعریف اندوکتانس

ولتاژ القاء شده² در یک مدار برابر است با آهنگ تغییرات شار پیوست³ نسبت به زمان در آن مدار:

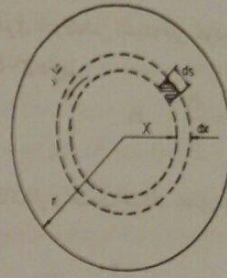
$$e = \frac{d\tau}{dt} \quad (3-4)$$

در این رابطه e ولتاژ القاء شده بر حسب ولت و τ شار پیوست مدار بر حسب وبر-دور (wb-t) می باشد.

بر اثر تغییر جریان یک مدار، میدان مغناطیسی آن (که با شار پیوست بیان می شود) نیز

1. Skin Effect
2. Induced Voltage
3. Linkage Flux

موتور است، در شکل (۳-۴) سطح مقطع یک هادی استوانه ای بلند حامل جریان I نشان داده شده است. مسیر برگشت جریان به اندازه ای دور فرض می شود که تأثیری بر میدان مغناطیسی این هادی ندارد. بنابراین خطوط شار هم مرکز با هادی هستند.



شکل ۳-۴ سطح مقطع یک هادی استوانه ای

جریان محصور شده به شعاع x برابر است با:

$$I_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I = \frac{x^2}{r^2} I$$

در این رابطه I جریان کل هادی و x شعاع هادی می باشد. چنانچه رابطه قانون آمپر را برای مسیر به شعاع x بنویسیم:

$$I_x = \oint H_x ds$$

که H_x شدت میدان مغناطیسی^۱ در هر نقطه از مسیر دایره ای به شعاع x بر حسب آمپر دور بر متر (At/m) می باشد، با فرض توزیع یکنواخت چگالی جریان^۲ داریم:

$$H_x = \frac{I_x}{2\pi x} = \frac{x^2}{r^2} I \frac{1}{2\pi x} = \frac{x}{2\pi r^2} I \quad \text{At/m}$$

1. Magnetic Field Intensity
2. Current Density

چگالی شار^۱ در فاصله x از مرکز هادی برابر است با:

$$B_x = \mu H_x = \frac{\mu x I}{2\pi r^2} \quad \text{wb/m}^2$$

در اینجا μ ضریب نفوذ مغناطیسی هادی می باشد. برای عنصر با ضخامت dx در شکل (۳-۴) شار مغناطیسی در واحد طول برابر است با:

$$d\Phi = \frac{\mu x I}{2\pi r^2} dx \quad \text{wb/m}$$

شار پیوست در واحد طول $d\psi$ که بر اثر شار عنصر با ضخامت dx بوجود می آید برابر است با:

$$d\psi = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} d\Phi = \frac{\mu x^3 I}{2\pi r^2} dx \quad \text{wb/m}$$

با انتگرال گیری در فاصله $x=0$ تا $x=r$ کل شار پیوست داخلی محاسبه می شود:

$$\psi_{in} = \int_0^r \frac{\mu x^3 I}{2\pi r^2} dx$$

$$\psi_{in} = \frac{\mu I}{8\pi} \quad \text{wb/m} \quad (3-10)$$

در صورتیکه ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی برابر یک باشد ($\mu_r = 1$) در اینصورت:

$$\mu = \mu_r \mu_0 = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad \text{H/m} \quad (3-11)$$

$$\psi_{in} = \frac{1}{8} I \times 10^{-7} \quad \text{wb/m} \quad (3-12)$$

ولتا می توان اندوکتانس هادی بر اثر شار داخلی را از رابطه $L_{in} = \frac{\psi_{in}}{I}$ مطابق زیر نشان داد:

$$L_{in} = \frac{1}{8} \times 10^{-7} \quad \text{H/m} \quad (3-13)$$

شار پیوست کل بین نقاط P_1 و P_2 با انتگرال گیری از رابطه فوق در حدود $D_1 = x$ و $x = D_2$ بدست می آید:

$$\psi_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu I}{2\pi x} dx = \frac{\mu I}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad \text{wb-t/m}$$

برای $\mu_r = 1$ و $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ داریم:

$$\psi_{12} = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D_2}{D_1} \quad \text{wb-t/m} \quad (3-14)$$

اندوکتانس هادی فقط بر اثر شار محصور بین P_1 و P_2 برابر است با:

$$L_{12} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad \text{H/m} \quad (3-15)$$

۳-۷ اندوکتانس خط یک فاز دو سیمه

در شکل (۳-۶) دو هادی استوانه ای توپر با شعاع های r_1 و r_2 که به فاصله D از یکدیگر قرار گرفته اند نشان داده شده است. ابتدا فقط شار پیوست مدار را که بر اثر جریان هادی ۱ ایجاد می شود در نظر می گیریم. اندوکتانس مدار بر اثر عبور جریان از هادی ۱ از مجموع اندوکتانس های بدست آمده بر اثر شار پیوست داخلی و خارجی هادی بدست می آید. اندوکتانس بخاطر شار خارجی با جایگزینی $D_1 = D$ و $D_2 = r_1$ در رابطه (۳-۱۵) بدست می آید:

$$L_{1_{\text{ext}}} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1} \quad \text{H/m} \quad (3-16)$$

و اندوکتانس فقط بخاطر شار داخلی نیز مطابق رابطه (۳-۱۳) برابر است با:

$$L_{1_{\text{int}}} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \quad \text{H/m}$$

کل اندوکتانس مدار بخاطر عبور جریان از هادی ۱ از رابطه زیر حساب می شود:

$$L_1 = \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{D}{r_1} \right) 10^{-7} = 2 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r_1} \right)$$

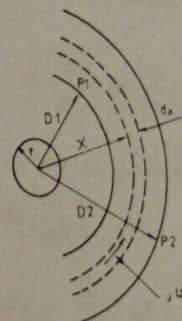
۳-۶ شار پیوست در خارج از یک هادی

شکل (۳-۵) یک هادی استوانه ای با شعاع r حامل جریان I را نشان می دهد. دو نقطه P_1 و P_2 را در فواصل D_1 و D_2 از مرکز هادی در نظر بگیرید. شدت میدان مغناطیسی در نقطه ای به فاصله x از مرکز هادی طبق قانون آمپر برابر است با:

$$H_x = \frac{I}{2\pi x} \quad \text{At/m}$$

برای عنصر با ضخامت dx که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است چگالی شار از رابطه زیر بدست می آید:

$$B_x = \mu H_x = \frac{\mu I}{2\pi x} \quad \text{wb/m}^2$$



شکل ۳-۵ هادی استوانه ای و شار پیوست خارجی

شار $d\Phi$ در عنصر با ضخامت dx برای طول یک متر برابر است با:

$$d\Phi = \frac{\mu I}{2\pi x} dx \quad \text{wb/m}$$

شار خارجی ψ هادی با تمام جریان هادی پیوست می باشد، بنابراین:

$$d\psi = d\Phi = \frac{\mu I}{2\pi x} dx \quad \text{wb/m}$$

$$= 2 \times 10^{-7} \left(\ln e^{\frac{1}{r_1}} + \ln \frac{D}{r_1} \right) = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1 e^{\frac{1}{r_1}}} \quad \text{H/m}$$

معمولاً شعاع هادیهای یک خط تک فاز مساوی هستند، لذا با جایگزینی $r_1' = r_2' = r_1'$ در رابطه (۳-۲۱) داریم:

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1'} \quad \text{H/m} \quad (3-22)$$

در این رابطه $r_1' = 0.7788 r$ شعاع متوسط هندسی GMR هر یک از هادیهای خط تک فاز می باشد. رابطه (۳-۲۲) اندوکتانس یک خط دو سیمه را نشان می دهد. اندوکتانس هر هادی نصف آن بوده و از رابطه زیر بدست می آید:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1'} \quad \text{H/m} \quad (3-23)$$

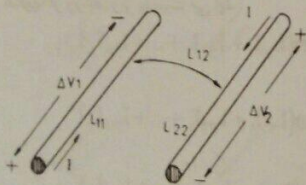
اندوکتانس خط تک فاز دو سیمه را می توان بر حسب اندوکتانس ظاهری خود القاء^۱ هر هادی و اندوکتانس ظاهری متقابل^۲ بین آنها نوشت. شکل (۳-۷) خط تک فاز را در واحد طول (یک متر) نشان می دهد. اندوکتانس های ظاهری خود القاء دو هادی در واحد طول به ترتیب با L_{11} و L_{22} و اندوکتانس ظاهری متقابل آنها در واحد طول با L_{12} نشان داده شده است. افت ولتاژهای ΔV_1 و ΔV_2 (افت ولتاژ در واحد طول هر یک از هادیهما) از روابط زیر بدست می آیند:

$$\Delta V_1 = j\omega L_{11} I - j\omega L_{12} I$$

$$\Delta V_2 = j\omega L_{22} I - j\omega L_{12} I$$

افت ولتاژ کل در مدار این چنین محاسبه می شود:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = j\omega(L_{11} + L_{22} - 2L_{12}) I$$



شکل ۳-۷ خط تک فاز دو سیمه در واحد طول

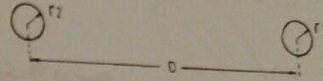
1. Apparent Self Inductance
2. Apparent Mutual Inductance

اگر $r_1' = r_2'$ را برای $r_1 e^{\frac{1}{r_1}}$ جایگزین کنیم داریم:

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1'} \quad \text{H/m} \quad (3-17)$$

در این رابطه r_1' را می توان شعاع یک هادی فرضی در نظر گرفت که اندوکتانس داخلی آن صفر بوده لیکن اندوکتانس آن با اندوکتانس هادی واقعی با شعاع r_1 برابر است.

$$r_1' = r_1 e^{\frac{1}{r_1}} = 0.7788 r_1 \quad (3-18)$$



شکل ۳-۶ خط تک فاز دو سیمه

با توجه به روابط (۳-۱۷) و (۳-۱۸) در محاسبات اندوکتانس، از اندوکتانس داخلی صرف نظر می کنیم و در عوض بجای شعاع r از r_1' استفاده کرده و از رابطه (۳-۱۷) مستقیماً اندوکتانس را بدست می آوریم. کمیت r_1' بعنوان «شعاع متوسط هندسی^۱ هادی توپر (GMR) معروف است.

بطور مشابه اندوکتانس مدار بر اثر عبور جریان از هادی ۲ برابر است با:

$$L_r = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1'} \quad \text{H/m} \quad (3-19)$$

$$r_1' = r_1 e^{\frac{1}{r_1}} = 0.7788 r_1 \quad (3-20)$$

و اندوکتانس کل مدار این چنین محاسبه می شود:

$$L = L_1 + L_r = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{\sqrt{r_1 r_1'}} \quad \text{H/m} \quad (3-21)$$

1. Geometric Mean Radius

$$L = L_{11} + L_{22} - 2L_{12} \quad H/m \quad (3-24)$$

اندوکتانس خط را با توجه به رابطه (3-21) بصورت زیر می توان نوشت:

$$L = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r_1'} + \ln \frac{1}{r_2'} - 2 \ln \frac{1}{D} \right) \quad H/m$$

به این ترتیب اندوکتانس های ظاهری خود القاء و القاء متقابل بصورت زیر تعریف می شوند:

$$L_{11} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r_1'}$$

$$L_{22} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r_2'} \quad (3-25)$$

$$L_{12} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D}$$

3-8 بررسی مجتمع هادیا

مطالعه مجتمعی که دارای چندین هادی می باشد ما را قادر می سازد تا بتوانیم اندوکتانس چنین هادی هائی را در وضعیت های مختلف بدست آوریم. گروهی از هادیا را مطابق شکل (3-8) در نظر بگیرید. مجموع جریان این هادیا برابر صفر است. افت ولتاژ در واحد طول هر یک از این هادیا از روابط زیر بدست می آید:

$$V_1 = j\omega(L_{11}I_1 + L_{12}I_2 + \dots + L_{1n}I_n)$$

$$V_2 = j\omega(L_{21}I_1 + L_{22}I_2 + \dots + L_{2n}I_n) \quad (3-26)$$

\vdots

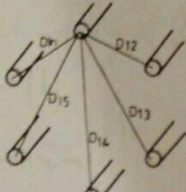
$$V_n = j\omega(L_{n1}I_1 + L_{n2}I_2 + \dots + L_{nn}I_n)$$

هر یک از اندوکتانس های ظاهری خود القاء و القاء متقابل L_{jj} و L_{jk} از روابط زیر محاسبه

می شوند:

$$L_{jj} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r_j'} \quad H/m \quad (3-27)$$

$$L_{jk} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D_{jk}} \quad H/m \quad (3-28)$$

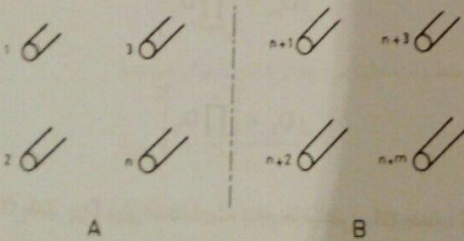


شکل 3-8 مجتمع Π هادی

در این روابط r_j شعاع هادی شماره j و D_{jk} فاصله دو هادی j و k از یکدیگر می باشد.

3-9 اندوکتانس خطوط انتقال مرکب¹

یکی از کاربردهای مهم معادلات (3-26) محاسبه اندوکتانس خط یک فاز دو سیمه مرکب می باشد. فرض کنید که هادی A (هادی رفت) از n رشته مشابه با جریان $\frac{I}{n}$ و هادی B (هادی برگشت) از m رشته مشابه با جریان $-\frac{I}{m}$ تشکیل شده باشند.



شکل 3-9 سیستم یک فاز با دو هادی مرکب

$$V_1 = 2 \times 10^{-9} j\omega \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln \frac{1}{D_{1j}} - \frac{1}{m} \sum_{j=n+1}^{n+m} \ln \frac{1}{D_{1j}} \right) \quad (3-29)$$

از طرفی می توان نوشت:

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln \frac{1}{D_{1j}} = \ln \frac{1}{\left[\prod_{j=1}^n D_{1j} \right]^{\frac{1}{n}}}$$

بنابراین افت ولتاژ V_1 این چنین محاسبه می شود:

$$V_1 = 2 \times 10^{-9} j\omega I \ln \frac{\left[\prod_{j=n+1}^{n+m} D_{1j} \right]^{\frac{1}{m}}}{\left[\prod_{j=1}^n D_{1j} \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (3-30)$$

در این رابطه $D_{1j} = r_j'$ بوده و علامت \prod نشان دهنده عامل ضرب است. صورت و مخرج رابطه (۳-۳۰) را می توان مطابق زیر تعریف نمود:

$$D_m = \left[\prod_{j=n+1}^{n+m} D_{1j} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3-31)$$

$$D_n = \left[\prod_{j=1}^n D_{1j} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3-32)$$

در رابطه (۳-۳۱) مقدار D_m برابر است با ریشه m ام حاصلضرب m جمله، که هر یک از این جملات فاصله رشته هادی ۱ از همه رشته های هادی B می باشد. در رابطه (۳-۳۲) نیز D_n برابر است با ریشه n ام حاصلضرب n جمله، که هر یک از جملات فاصله رشته هادی ۱ از همه

رشته های هادی A می باشد. به این ترتیب داریم:

$$V_1 = 2 \times 10^{-9} j\omega I \ln \frac{D_m}{D_n} \quad (3-33)$$

برای رشته شماره i در هادی A می توان نوشت:

$$V_i = 2 \times 10^{-9} j\omega I \ln \frac{D_m}{D_{is}} \quad (3-34)$$

$$D_m = \left[\prod_{j=n+1}^{n+m} D_{ij} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3-35)$$

$$D_{is} = \left[\prod_{j=1}^n D_{ij} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3-36)$$

اندوکتانس L_{1i} برای رشته هادی شماره i از رابطه زیر بدست می آید:

$$V_i = j\omega L_{1i} I_i = j\omega L_{1i} \frac{I}{n} \quad (3-37)$$

از مقایسه دو رابطه (۳-۳۴) و (۳-۳۷) داریم:

$$L_{1i} = 2 \times 10^{-9} n \ln \frac{D_m}{D_{is}} \quad (3-38)$$

اندوکتانس متوسط رشته های موجود در هادی A برابر است با:

$$L_m = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{n}$$

و چون n رشته در هادی A با یکدیگر موازی هستند لذا اندوکتانس کل هادی A برابر است با:

$$L_A = \frac{L_m}{n} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{n^2} = \frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^n L_{1j} \quad (3-39)$$

ها را می توان از رابطه زیر تعیین کرد:

$$L = L_A = L_B = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \quad H/m \quad (3-44)$$

در این رابطه:

$$GMD = \left[\prod_{i=1}^n \prod_{j=n+1}^n D_{ij} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3-45)$$

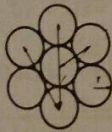
$$GMR = \left[\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n D_{ij} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3-46)$$

روابط کلی (۳-۴۱) و (۳-۴۲) را به شکل های زیر نیز می توان نوشت:

$$D_m = \sqrt[n]{D_{1,n+1} \dots D_{1,n+m} D_{2,n+1} \dots D_{2,n+m} \dots D_{n,n+1} \dots D_{n,n+m}} \quad (3-47)$$

$$D_{s_A} = \sqrt[n]{(D_{11} \dots D_{1n})(D_{21} \dots D_{2n}) \dots (D_{n1} \dots D_{nn})} \quad (3-48)$$

مثال ۳-۱ یک هادی ν رشته ای با شعاع r مطابق شکل (۳-۱۰) را در نظر بگیرید. D_s یا GMR این هادی را محاسبه کنید.



شکل ۳-۱۰ هادی ν رشته ای

حل:

$$D_s = \sqrt[n]{r^{\nu} (2r)^{\nu} (2\sqrt{3}r)^{\nu} (4r)^{\nu}}$$

$$= \sqrt[n]{(0.7788)^{\nu} r^{\nu} (2r)^{\nu} (2\sqrt{3}r)^{\nu} (4r)^{\nu}} = 2/1767r$$

مثال ۳-۲ یک خط انتقال یک فاز مطابق شکل (۳-۱۱) از سه سیم توپر به شعاع 0.25 cm برای

$$L_A = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\left[\prod_{i=1}^n \prod_{j=n+1}^n D_{m_i} \right]^{\frac{1}{n}}}{\left[\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n D_{s_i} \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (3-40)$$

صورت و مخرج رابطه (۳-۴۰) را مطابق زیر تعریف می کنیم:

$$D_m = \left[\prod_{i=1}^n D_{m_i} \right]^{\frac{1}{n}} = \left[\prod_{i=1}^n \prod_{j=n+1}^n D_{ij} \right]^{\frac{1}{nm}} \quad (3-41)$$

$$D_{s_A} = \left[\prod_{i=1}^n D_{s_i} \right]^{\frac{1}{n}} = \left[\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n D_{ij} \right]^{\frac{1}{n^2}} \quad (3-42)$$

D_m ریشه nm ام حاصلضرب nm جمله است که این جملات فواصل n رشته مربوط به هادی A از m رشته مربوط به هادی B می باشند. D_m را فاصله متوسط هندسی^۱ نامیده آتراً با علامت اختصاری GMD نیز نشان می دهند. D_{s_A} ریشه n^2 ام حاصلضرب n^2 جمله است که این جملات فواصل n رشته مربوط به هادی A از یکدیگر می باشند. باید دقت نمود که جمله D_{ii} برابر r_i است. D_{s_A} را شعاع متوسط هندسی^۲ هادی A می نامند و آتراً با علامت اختصاری GMR نشان می دهند. رابطه اندوکتانس هادی A را می توان این چنین نوشت:

$$L_A = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_{s_A}} \quad H/m \quad (3-43)$$

اندوکتانس هادی B نیز به روش مشابهی قابل محاسبه است. اندوکتانس کل مدار نیز از جمع اندوکتانس های دو هادی A و B بدست می آید.

در خط انتقال هادی های A و B کاملاً مشابه هستند، لذا اندوکتانس هر یک از هادی

1. Geometric Mean Distance
2. Geometric Mean Radius

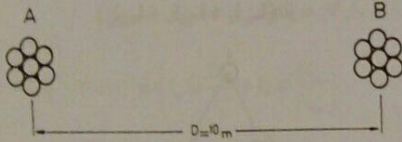
برای هادی B نیز GMR این چنین محاسبه می شود:

$$D_{S_B} = \sqrt[4]{(0.5 \times 0.7788 \times 10^{-7})^2 \times 5^2} = 0.1395 \text{ m}$$

$$L_A = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1/51}{0.426} = 5/99 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$L_B = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1/51}{0.1395} = 1/22 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$L = L_A + L_B = 14/21 \times 10^{-7} \text{ H/m} \\ = 1/421 \text{ mH/Km}$$



شکل ۳-۱۲ خط یک فاز با هادیهای رشته ای

اگر خط یک فاز از دو هادی رشته ای تشکیل شده باشد احتیاجی به محاسبه GMD نیست و این مقدار برابر با فاصله مرکز دو هادی می باشد. مثلاً اگر هادی مثال (۳-۱) ، ۷ رشته ای ، بعنوان هادی رفت و برگشت انتخاب شود و فاصله هادیها از یکدیگر مطابق شکل (۳-۱۲) برابر ۱۰m و شعاع هر رشته در هادیها ۰/۸۴ cm باشد داریم:

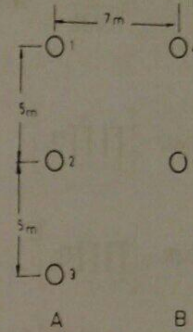
$$D_m = D = 10 \text{ m}$$

$$D_{S_A} = D_{S_B} = 2/1767 \times 0.84 \times 10^{-7} = 0.183 \text{ m}$$

$$L_A = L_B = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{10}{0.183} = 12/6 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

اگر در شکل (۳-۱۱) هادیهای بکار رفته هر کدام رشته ای باشند در اینصورت در رابطه

هادی رفت و دو سیم توپیر به شعاع ۰/۵ cm برای هادی برگشت تشکیل شده است. اندک کتاب هادی رفت و برگشت و اندوکتانس کل خط را بدست آورید.



شکل ۳-۱۱ مربوط به مثال (۳-۲)

حل: ابتدا GMD بین هادی های A و B را بدست می آوریم:

$$D_m = \sqrt[4]{D_{14} D_{15} D_{24} D_{25} D_{34} D_{35}}$$

$$D_{14} = D_{15} = 7 \text{ m}$$

$$D_{12} = D_{23} = D_{25} = \sqrt{5^2 + 7^2} = 8/6 \text{ m}$$

$$D_{24} = \sqrt{10^2 + 7^2} = 12/2 \text{ m}$$

$$D_m = \sqrt[4]{7^2 \times 8/6^2 \times 12/2^2} = 8/51 \text{ m}$$

حال GMR را برای هادی A محاسبه می کنیم:

$$D_{S_A} = \sqrt[4]{D_{11} D_{12} D_{13} D_{14} D_{15} D_{21} D_{22} D_{23} D_{24} D_{25} D_{31} D_{32} D_{33} D_{34} D_{35}} \quad (3-49)$$

$$D_{11} = D_{22} = D_{33} = r' = 0.025 \times 0.7788 = 0.0195 \text{ m}$$

$$D_S = \sqrt[4]{(0.0195)^2 \times 5^2 \times 10^2} = 0.426 \text{ m}$$

$$V_a = 2 \times 10^{-4} j\omega \left(I_a \ln \frac{1}{r'_a} + I_b \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{D_{ac}} \right)$$

$$V_b = 2 \times 10^{-4} j\omega \left(I_a \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_b \ln \frac{1}{r'_b} + I_c \ln \frac{1}{D_{bc}} \right) \quad (3-51)$$

$$V_c = 2 \times 10^{-4} j\omega \left(I_a \ln \frac{1}{D_{ac}} + I_b \ln \frac{1}{D_{bc}} + I_c \ln \frac{1}{r'_c} \right)$$

در روابط فوق فرض بر این بوده است که هادیها توپر باشند. اگر هادیها بصورت رشته ای باشند بجای r'_a باید D_{sa} ، بجای r'_b باید D_{sb} و بجای r'_c باید D_{sc} را جایگزین نمود. با توجه به اینکه در سیستم های متقارن سه فاز $I_a + I_b + I_c = 0$ است، لذا در هر یک از معادلات فوق می توان یکی از جریانها را حذف نمود. بنابراین:

$$V_a = 2 \times 10^{-4} j\omega \left(I_a \ln \frac{D_{bc}}{r'_a} + I_b \ln \frac{D_{ac}}{D_{ab}} \right)$$

$$V_b = 2 \times 10^{-4} j\omega \left(I_a \ln \frac{D_{bc}}{D_{ab}} + I_b \ln \frac{D_{bc}}{r'_b} \right) \quad (3-52)$$

$$V_c = 2 \times 10^{-4} j\omega \left(I_b \ln \frac{D_{ac}}{D_{bc}} + I_c \ln \frac{D_{ac}}{r'_c} \right)$$

این روابط نشان می دهند که افت ولتاژ در هر فاز فقط به جریان آن فاز بستگی ندارد و اندوکتانس ها برای سه فاز با هم مساوی نخواهند بود.

در حالتی که هادیهای سه فاز یکسان بوده و فاصله آنها از یکدیگر مساوی باشد

$$D_{ab} = D_{bc} = D_{ac} = D$$

$$r'_a = r'_b = r'_c = r' \quad \text{داریم:}$$

با جایگزینی این مقادیر در رابطه (3-51) خواهیم داشت:

$$V_a = 2 \times 10^{-4} j\omega I_a \ln \frac{D}{r'}$$

(3-49) باید مسافتی برابر $D_{11} = 2/1\sqrt{3}r'$ و $D_{22} = 2/1\sqrt{3}r'$ و $D_{33} = 2/1\sqrt{3}r'$ باشد تا مساله را حل کرد تا L_{aa} بدست آید و برای هادیهای 4 و 5 نیز باید به همین ترتیب عمل نمود تا L_{bb} تعیین شود.

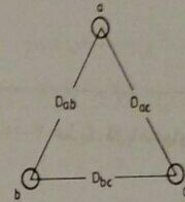
3-10 اندوکتانس خطوط انتقال سه فاز

هادیهای یک خط انتقال سه فاز مطابق شکل (3-13) نشان داده شده اند. افت ولتاژ در واحد طول هر یک از فازها را می توان بصورت زیر نوشت:

$$V_a = j\omega(L_{aa}I_a + L_{ab}I_b + L_{ac}I_c)$$

$$V_b = j\omega(L_{ba}I_a + L_{bb}I_b + L_{bc}I_c)$$

$$V_c = j\omega(L_{ca}I_a + L_{cb}I_b + L_{cc}I_c)$$



شکل 3-13 نمایش خط سه فاز

در این روابط L_{aa} و L_{bb} و L_{cc} اندوکتانس های ظاهری خود القاء هر یک از فازها و L_{ab} و L_{bc} و L_{ac} اندوکتانس های ظاهری القاء متقابل بین هر یک از دو فاز می باشند. L_{aa} و L_{bb} را می توان بصورت زیر نوشت:

$$L_{aa} = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{1}{r'_a} \quad (3-50)$$

$$L_{ab} = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{1}{D_{ab}}$$

بقیه اندوکتانس ها نیز بطریق مشابه بدست می آیند. بنابراین داریم:

در هر یک از فواصل، اندوکتانس های فازهای a و b و c با یکدیگر متفاوت است، لیکن چون هر سه فاز در سه فاصله مذکور هر سه موقعیت ۱ و ۲ و ۳ را اشغال می کنند، اندوکتانس فازها در یک سیکل کامل جابجائی با یکدیگر مساوی خواهد شد. روابط افت ولتاژ در واحد طول را در فاصله های I و II و III با استفاده از رابطه (۳-۵۱) برای فاز a می نویسیم:

$$V_{a_1} = 2 \times 10^{-7} j \omega \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{1r}} + I_c \ln \frac{1}{D_{1r}} \right)$$

$$V_{a_{II}} = 2 \times 10^{-7} j \omega \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{2r}} + I_c \ln \frac{1}{D_{2r}} \right)$$

$$V_{a_{III}} = 2 \times 10^{-7} j \omega \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{3r}} + I_c \ln \frac{1}{D_{3r}} \right)$$

در این روابط برای حالت کلی از D_s استفاده کرده ایم. اگر هادیها توپر باشند بجای D_s از مقدار r' استفاده می کنیم و اگر هادیها رشته ای باشند D_s را محاسبه کرده و در این روابط قرار می دهیم. افت ولتاژ متوسط برای فاز a برابر است با:

$$V_a = \frac{1}{3} (V_{a_1} + V_{a_{II}} + V_{a_{III}})$$

$$= 2 \times 10^{-7} j \omega \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{[D_{1r} D_{2r} D_{3r}]^{\frac{1}{3}}} + I_c \ln \frac{1}{[D_{1r} D_{2r} D_{3r}]^{\frac{1}{3}}} \right)$$

از طرفی داریم:

$$I_b + I_c = -I_a$$

لذا خواهیم داشت:

$$V_a = 2 \times 10^{-7} j \omega I_a \ln \frac{[D_{1r} D_{2r} D_{3r}]^{\frac{1}{3}}}{D_s}$$

$$V_b = 2 \times 10^{-7} j \omega I_b \ln \frac{D}{r'}$$

$$V_c = 2 \times 10^{-7} j \omega I_c \ln \frac{D}{r'}$$

و بنابراین:

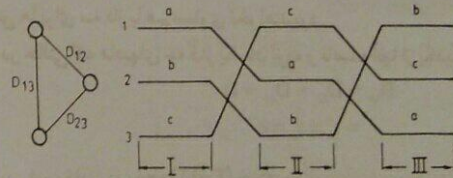
$$L_a = L_b = L_c = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad \text{H/m} \quad (3-53)$$

و این رابطه نشان می دهد که اندوکتانس هر سه فاز با یکدیگر برابرند. اگر هر فاز بصورت هادی رشته ای باشد بجای r' از D_s استفاده می شود:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} \quad \text{H/m} \quad (3-54)$$

۳-۱۱ جابجائی^۱ فازها در خط انتقال سه فاز

اگر فواصل هادیهای یک خط سه فاز با یکدیگر برابر نباشند اندوکتانس فازها با یکدیگر مساوی نبوده و سیستم قدرت نامتقارن می گردد. از طرف دیگر تنها راه حل تقارن سیستم ها استفاده از مثلث متساوی الاضلاع هادیها نمی باشد و آرایش های مختلفی برای نصب هادی ها موجود است. یکی از روش های متقارن کردن یک خط انتقال، جابجائی فازها است. شکل (۳-۱۴) یک سیکل کامل از جابجائی فازها را نشان می دهد. در این سیکل که دارای سه فاصله مساوی می باشد، هر یک از فازها در سه فاصله مذکور، در سه موقعیت مختلف قرار می گیرد.



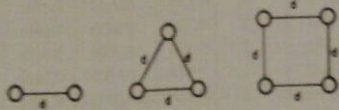
شکل ۳-۱۴ یک سیکل از جابجائی فازها

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{0.7889}{0.0001} = 9.123 \times 10^{-4} \text{ H/m}$$

$$= 0.9123 \text{ mH/Km}$$

۳-۱۲ هادیهای گروهی^۱ (باندل)

در خطوط انتقال بیش از ۲۳۰ KV (فوق فشار قوی) تاثیر کرونا^۲ بر مدار بسیار زیاد می شود. پدیده کرونا که نتیجه مستقیم وجود گرادیان ولتاژ بر سطح هادی است باعث ایجاد تلفات در سیستم انتقال و همچنین ایجاد تداخل در سیستم های مخابراتی می گردد. برای کاهش تاثیر کرونا در ولتاژهای خیلی زیاد از هادیهای گروهی (باندل) استفاده می شود. هادی در هر فاز شامل ۲، ۳ یا ۴ هادی می باشند. در شکل (۳-۱۶) چنین باندهای نشان داده شده اند.



شکل ۳-۱۶ هادی های باندها

یکی دیگر از مزایای خطوط باندها، کاهش اندوکتانس می باشد. هر چه تعداد هادی های یک باندها بیشتر باشد اندوکتانس خط و اثر کرونا کمتر خواهد شد. کاهش اندوکتانس بر اثر افزایش GMR هر فاز است. محاسبه GMR دقیقاً مشابه یک هادی رشته ای است. اگر GMR یک باندها را با D_{eq}^b و GMR هر هادی از باندها را با D_s نشان دهیم، برای باندهای شکل (۳-۱۶) خواهیم داشت:

$$D_{eq}^b = \sqrt[3]{(D_s \times d)} = \sqrt{D_s d} \quad (3-57)$$

1. Bundle Conductors
2. Corona

بنابراین اندوکتانس فاز a برابر است با:

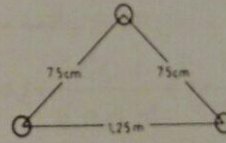
$$L_a = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \text{ H/m} \quad (3-55)$$

اندوکتانس فازهای b و c نیز با L_a برابر است. صورت رابطه (۳-۵۵) یعنی D_{eq} را می توان بعنوان GMD خط سه فاز در نظر گرفت که بصورت زیر قابل نوشتن است:

$$D_{eq} = GMD = \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3} \quad (3-56)$$

اغلب سیستم های قدرت از هادیهای رشته ای ACSR استفاده می کنند. در جدول (۳-۱) انواع این هادیها با نام مصطلح خود مشخص شده اند. در این جدول نسبت تعداد رشته های آلومینیوم به فولاد Al/St، قطر خارجی هادی بر حسب اینچ، تعداد لایه های آلومینیوم، مقاومت DC و AC، و D_s یا GMR هادیها بر حسب فوت داده شده اند. از این جدول معمولاً برای تعیین D_s و قطر خارجی هادیها استفاده می شود.

مثال ۳-۳ یک خط سه فاز در فرکانس ۶۰ Hz مطابق شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است. هادیها از نوع Hawk می باشند. اندوکتانس هر فاز را در یک کیلومتر بدست آورید.



شکل ۳-۱۵ مربوط به مثال (۳-۳)

حل: با استفاده از جدول (۳-۱) شعاع متوسط هندسی هادی GMR را بدست می آوریم. سپس با تعیین D_{eq} مقدار اندوکتانس را محاسبه می کنیم.

$$D_s = 0.289 \text{ ft} = 0.289 \times 0.305 = 0.088 \text{ m}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{0.75 \times 0.75 \times 1.25} = 0.889 \text{ m}$$

$$D_0^0 = \sqrt[3]{(D_1 \times d^2)^2} = \sqrt[3]{D_1 d^2} \quad (3-58)$$

هادی گروهی با سه رشته

$$D_0^0 = \sqrt[3]{(D_1 \times d^2 (\sqrt{2}d))^2} = 1/0.9 \sqrt[3]{D_1 d^2} \quad (3-59)$$

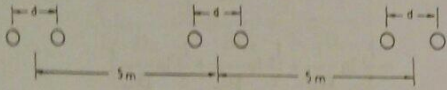
هادی گروهی با چهار رشته

برای محاسبه اندوکتانس هر فاز از یک خط سه فاز باندل از رابطه زیر استفاده می کنید:

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{eq}}{D_0^0} \quad \text{H/m} \quad (3-60)$$

در این رابطه D_0^0 شعاع متوسط هندسی (GMR) هادی گروهی (باندل) می باشد که با توجه به تعداد رشته های باندل از روابط (۳-۵۷)، (۳-۵۸) و یا (۳-۵۹) بدست می آید. فاصله متوسط هندسی (GMR) که در رابطه (۳-۶۰) با D_{eq} نشان داده شده است نیز از رابطه (۳-۵۶) بدست می آید. در این رابطه مقصود از D_0^0 فاصله مرکز هادی باندل از مرکز هادی باندل l می باشد.

مثال ۳-۴ در یک خط انتقال سه فاز از باندلهای دو رشته ای در هر فاز استفاده شده است (مطابق شکل ۳-۱۷). نوع هادیها Pheasant بوده و فاصله هر دو رشته مجاور $d = 35 \text{ cm}$ می باشد. اندوکتانس هر فاز را محاسبه کنید.



شکل ۳-۱۷ خط انتقال سه فاز با باندل های دو رشته ای

حل: با استفاده از جدول (۳-۱) مقدار D_0^0 را برای یک رشته هادی بدست می آوریم:

$$D_0^0 = 0.466 \text{ ft}$$

$$= 0.466 \times 0.3048 = 0.1422 \text{ m}$$

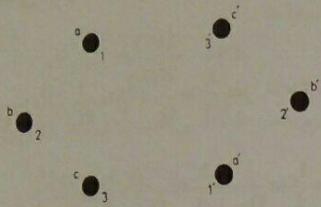
$$D_0^0 = \sqrt{D_1 d} = \sqrt{0.1422 \times 0.35} = 0.22 \text{ m}$$

نام هادی	Al/St	تعداد لایه های آلومینیوم	قطر خارجی به اینچ	R_{dc}	R_{ac}	R_{ac}	GMR
				20°C $\Omega/1000\text{ft}$	20°C Ω/mi	$\Delta T^\circ\text{C}$ Ω/mi	
Waxwing	18/1	2	0.609	0.0646	0.3488	0.3831	0.0198
Partridge	26/7	2	0.642	0.0640	0.3452	0.3792	0.0217
Ostrish	26/7	2	0.680	0.0569	0.3070	0.3372	0.0229
Merlin	18/1	2	0.684	0.0512	0.2767	0.3037	0.0222
Linnet	26/7	2	0.721	0.0507	0.2737	0.3006	0.0243
Oriole	30/7	2	0.741	0.0504	0.2719	0.2987	0.0255
Chickadee	18/1	2	0.743	0.0433	0.2342	0.2572	0.0241
Ibis	26/7	2	0.783	0.0430	0.2323	0.2551	0.0264
Pelican	18/1	2	0.814	0.0361	0.1957	0.2148	0.0264
Flicker	24/7	2	0.846	0.0359	0.1943	0.2134	0.0284
Hawk	26/7	2	0.858	0.0357	0.1931	0.2120	0.0289
Hen	30/7	2	0.883	0.0355	0.1919	0.2107	0.0304
Osprey	18/1	2	0.879	0.0309	0.1679	0.1842	0.0284
Parakeet	24/7	2	0.914	0.0308	0.1669	0.1832	0.0306
Dove	26/7	2	0.927	0.0307	0.1663	0.1826	0.0314
Rook	24/7	2	0.977	0.0269	0.1461	0.1603	0.0327
Grosbeak	26/7	2	0.990	0.0268	0.1454	0.1596	0.0335
Drake	26/7	2	1.108	0.0215	0.1172	0.1284	0.0373
Tern	45/7	3	1.063	0.0217	0.1188	0.1302	0.0352
Rail	45/7	3	1.165	0.0181	0.0997	0.1092	0.0386
Cardinal	54/7	3	1.196	0.0180	0.0988	0.1082	0.0402
Ortolan	45/7	3	1.213	0.0167	0.0924	0.1011	0.0402
Bluejay	45/7	3	1.250	0.0155	0.0861	0.0941	0.0415
Finch	54/19	3	1.293	0.0155	0.0856	0.0937	0.0436
Bittern	45/7	3	1.345	0.0136	0.0762	0.0832	0.0444
Pheasant	54/19	3	1.382	0.0135	0.0751	0.0821	0.0466
Bobolink	45/7	3	1.427	0.0121	0.0684	0.0746	0.0470
Plover	54/19	3	1.465	0.0120	0.0673	0.0735	0.0494
Lapwing	45/7	3	1.502	0.0109	0.0623	0.0678	0.0498
Falcon	54/19	3	1.545	0.0108	0.0612	0.0667	0.0523
Bluebird	84/19	4	1.762	0.0080	0.0476	0.0515	0.0586

$$D_{eq} = \sqrt{5 \times 5 \times 10} = 6/3 \text{ m}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{6/3}{0.7} = 9 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 9 \times 10^{-7} \times 10^3 = 0.283 \text{ } \Omega/\text{Km}$$

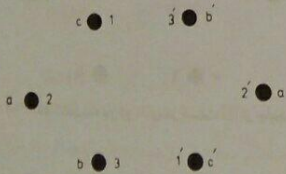


شکل ۳-۱۸ خط انتقال سه فاز دو مداره در قسمت I جابجایی

در قسمت II از جابجایی فازها که در شکل (۳-۱۹) نشان داده شده است، افت ولتاژ فازهای a و a' از روابط زیر بدست می آید.

$$V_{a_1} = 2 \times 10^{-7} j\omega \left(\frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_s} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{12}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{13}} + \frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_{12'}} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{13'}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{11'}} \right)$$

$$V_{a_1} = 2 \times 10^{-7} j\omega \left(\frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_s} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{12}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{13}} + \frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_{12'}} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{13'}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{11'}} \right)$$



شکل ۳-۱۹ خط انتقال سه فاز دو مداره در قسمت II از جابجایی فازها

۳-۱۳ خطوط انتقال سه فاز دو مداره (دوبل)

یک خط انتقال سه فاز دو مداره از دو خط سه فاز مجزا که از لحاظ الکتریکی با یکدیگر موازی هستند تشکیل شده است. اگر دو مدار ذکر شده با یکدیگر فاصله نسبتاً زیادی داشته باشند اندوکتانس هر فاز خط دوبل برابر نصف اندوکتانس هر فاز هر یک از مدارها می باشد. چنانچه هادیهای خط انتقال سه فاز دوبل همه روی یک دکل قرار گرفته باشند در اینصورت نمی توان اندوکتانس خط را با نصف کردن اندوکتانس یک مدار بدست آورد، مگر اینکه از اندوکتانس متقابل هادیهای یک مدار با مدار دیگر صرف نظر کنیم.

شکل (۳-۱۸) یک خط انتقال سه فاز دو مداره را برای قسمت I از سه فاصله جابجایی فازها نشان می دهد. افت ولتاژ در واحد طول برای فازهای a و a' را می توان این چنین نوشت:

$$V_{a_1} = 2 \times 10^{-7} j\omega \left(\frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_s} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{12}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{13}} + \frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_{12'}} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{13'}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{11'}} \right)$$

$$V_{a_1} = 2 \times 10^{-7} j\omega \left(\frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_s} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{12}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{13}} + \frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_{12'}} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{13'}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{11'}} \right)$$

همچنین در روابط گذشته می توان $I_a = -(I_b + I_c)$ را بکاربرد و پس از چندین مرحله عملیات ریاضی خواهیم داشت:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \quad H/m \quad (3-61)$$

در این رابطه GMD فاصله متوسط هندسی خط دو مداره است که این چنین محاسبه می شود:

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab_{eq}} D_{bc_{eq}} D_{ac_{eq}}} \quad (3-62)$$

فاصله های متوسط از روابط زیر تعریف می شوند:

$$D_{ab_{eq}} = \sqrt[3]{D_{1r} D_{1r'} D_{1r''} D_{1r'''}} \quad (3-63)$$

$$D_{bc_{eq}} = \sqrt[3]{D_{2r} D_{2r'} D_{2r''} D_{2r'''}} \quad (3-63)$$

$$D_{ac_{eq}} = \sqrt[3]{D_{3r} D_{3r'} D_{3r''} D_{3r'''}} \quad (3-63)$$

همچنین در رابطه $GMR(3-61)$ شعاع متوسط هندسی خط دو مداره بترتیب زیر محاسبه می شود:

$$GMR = \sqrt[3]{GMR_a \cdot GMR_b \cdot GMR_c} \quad (3-64)$$

شعاع های متوسط هندسی هر فاز نیز از روابط زیر تعریف می شوند:

$$GMR_a = \sqrt{D_s \cdot D_{1r}} \quad (3-65)$$

$$GMR_b = \sqrt{D_s \cdot D_{2r}} \quad (3-65)$$

$$GMR_c = \sqrt{D_s \cdot D_{3r}} \quad (3-65)$$

مثال ۳-۵ یک خط انتقال سه فاز دو مداره با هادیهای نوع Drake در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است. اندوکتانس هر فاز این خط را بدست آورید.

در قسمت III از جابجائی فازها که در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است چنین محاسبه می شوند:

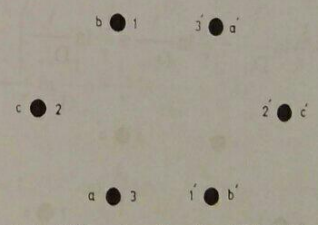
$$V_{a_{III}} = 2 \times 10^{-7} j\omega \left(\frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_s} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{1r}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{2r}} \right. \\ \left. + \frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_{rr'}} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{rr''}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{rr'''}} \right)$$

$$V_{a'_{III}} = 2 \times 10^{-7} j\omega \left(\frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_s} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{1r}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{2r}} \right. \\ \left. + \frac{I_a}{2} \ln \frac{1}{D_{rr'}} + \frac{I_b}{2} \ln \frac{1}{D_{rr''}} + \frac{I_c}{2} \ln \frac{1}{D_{rr'''}} \right)$$

افت ولتاژ متوسط در واحد طول برای هر یک از فازهای a و a' برابر است با:

$$V_a = \frac{1}{3} (V_{a_1} + V_{a_{II}} + V_{a_{III}})$$

$$V_{a'} = \frac{1}{3} (V_{a'_1} + V_{a'_{II}} + V_{a'_{III}})$$



شکل ۳-۲۰ خط انتقال سه فاز دو مداره در قسمت III از جابجائی فازها

چون فازهای a و a' با یکدیگر موازی هستند لذا افت ولتاژ در کل فاز a برابر است با:

$$\Delta V_a = \frac{V_a + V_{a'}}{2}$$

$$GMD = D_{eq} = \sqrt[3]{6/56 \times 6/56 \times 8/367} = 7/115 \text{ m}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_{con}} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR}$$

$$= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{7/115}{0/3395} = 6/085 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

روش دیگر این است که از اثر القاء متقابل بین هادیهای دو مدار صرف نظر کنیم و اندوکتانس یک مدار را بدست آوریم، سپس آنرا نصف کنیم تا اندوکتانس خط دوپل بدست آید. برای این کار داریم:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{5 \times 5 \times 10} = 6/3 \text{ m}$$

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{6/3}{0/1137} = 12/634 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$L_2 = \frac{1}{4} L_1 = 6/317 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

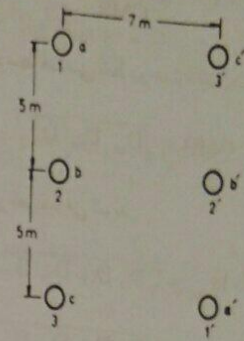
$$\text{خطای نسبی} = \frac{6/085 - 6/317}{6/085} = -0/038$$

همانطور که مشاهده می شود خطای محاسبات با صرف نظر از اثر القاء متقابل دو مدار بر یکدیگر کمتر از ۴ درصد است.

۳-۱۴ خطوط انتقال دو مداره با هادیهای باتدل

در خطوط انتقال سه فاز دو مداره ممکن است از هادیهای گروهی (باتدل) استفاده شود. در این صورت برای محاسبه اندوکتانس هر فاز خط انتقال همانند خطوط دو مداره از روابط (۳-۶۱) تا (۳-۶۵) استفاده می شود و تنها تفاوت در این است که در روابط مذکور بجای D_{eq} از شعاع متوسط هندسی باتدل یعنی D_{eq}^0 استفاده می کنیم. مثال زیر روش تعیین اندوکتانس را روشن تر می کند.

$$D_1 = 0/373 \text{ ft} = 0/1137 \text{ m}$$



شکل ۳-۲۱ نمایش خط انتقال سه فاز دو مداره مربوط به مثال (۳-۵)

ابتدا GMR معادل خط دوپل را بدست می آوریم:

$$GMR_a = \sqrt{D_1 D_{1'}} = \sqrt{0/1137 \times \sqrt{149}} = 0/3725 \text{ m}$$

$$GMR_b = \sqrt{D_2 D_{2'}} = \sqrt{0/1137 \times 7} = 0/2821 \text{ m}$$

$$GMR_c = \sqrt{D_3 D_{3'}} = \sqrt{0/1137 \times \sqrt{149}} = 0/3725 \text{ m}$$

$$GMR = \sqrt[3]{0/3725 \times 0/2821 \times 0/3725} = 0/3395 \text{ m}$$

برای تعیین GMD خط دوپل داریم:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{5 \times 5 \times \sqrt{74} \times \sqrt{74}} = 6/56 \text{ m}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{5 \times 5 \times \sqrt{74} \times \sqrt{74}} = 6/56 \text{ m}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{10 \times 10 \times 7 \times 7} = 8/367 \text{ m}$$

مثال ۳-۶ اندوکتانس خط سه فاز دو مداره را که در شکل (۳-۲۲) نشان داده شده است آورید. هادیها از نوع Hawk هستند.

$$GMD = D_{eq} = \sqrt[3]{\frac{2}{3} \times \frac{2}{3} \times \frac{2}{3} \times \frac{3}{24}} = 2/645 \text{ m}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2/645}{0/465} = 3/47 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

۳-۱۵ خلاصه محاسبه اندوکتانس خطوط انتقال

رابطه اصلی تعیین اندوکتانس خطوط انتقال در حالت های مختلف بصورت زیر نوشته می شود:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} \quad (3-66)$$

راکتانس القائی بر حسب Ω/Km در فرکانس ۵۰ Hz نیز از ضرب کردن مقدار اندوکتانس در $2\pi 50 \times 1000$ بدست می آید:

$$X_L = 0/0628 \ln \frac{D}{D_s} \quad (3-67)$$

برای استفاده از روابط (۳-۶۶) و (۳-۶۷) حالت های مختلف زیر را در نظر می گیریم:

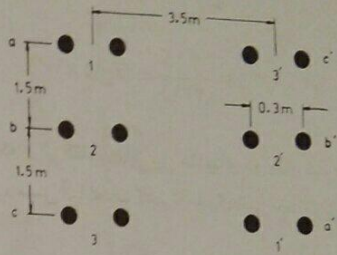
الف: خط انتقال یک فاز. در این صورت D_{eq} فاصله بین دو هادی خط بوده، D_s نیز شعاع متوسط هندسی هادی است که از جدول (۳-۱) بدست می آید. اگر هادی توپر باشد در اینصورت بجای D_s از r' استفاده می شود. اندوکتانس بدست آمده، اندوکتانس یک هادی از خط یک فاز می باشد.

ب: خط انتقال سه فاز. در این حالت D_{eq} از رابطه زیر بدست می آید:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}} \quad (3-68)$$

ج: خط سه فاز با هادیهای باندد. در اینصورت بجای D_s از D_s^b استفاده می شود و D_{eq} نیز از رابطه (۳-۶۸) بدست می آید، در اینجا D_{12} و D_{13} و D_{23} مراکز باندها از یکدیگر می باشد.

د: خط انتقال سه فاز دو مداره. در اینصورت با تقریب قابل قبولی می توان



شکل ۳-۲۲ خط انتقال سه فاز دو مداره با هادیهای باندد در رشته ای

حل: برای هادی Hawk از جدول (۳-۱) شعاع متوسط هندسی هادی را بدست می آوریم:

$$D_s = 0/0289 \text{ ft} = 0/0088 \text{ m}$$

$$D_s^b = \sqrt{D_s d} = \sqrt{0/0088 \times 0/3} = 0/0514 \text{ m}$$

$$D_{s_a} = D_{s_c} = \sqrt{D_s D_{12}} = \sqrt{0/0514 \times \sqrt{2/25}} = 0/487 \text{ m}$$

$$D_{s_b} = \sqrt{D_s D_{23}} = \sqrt{0/0514 \times 3/5} = 0/424 \text{ m}$$

$$D_{s_{eq}} = GMR = \sqrt[3]{0/487 \times 0/487 \times 0/424} = 0/465 \text{ m}$$

در تعیین GMD باید دقت نمود که مقصود از فاصله بین فازها، فاصله از مراکز باندد ها می باشد. لذا داریم:

$$D_{ab_{eq}} = \sqrt[3]{1/5 \times 1/5 \times \sqrt{14/5} \times \sqrt{14/5}} = 2/39 \text{ m}$$

$$D_{bc_{eq}} = \sqrt[3]{1/5 \times 1/5 \times \sqrt{14/5} \times \sqrt{14/5}} = 2/39 \text{ m}$$

$$D_{ac_{eq}} = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 3/5 \times 3/5} = 3/24 \text{ m}$$

اندوکتانس خط یک مداره را نصف نمود و برای محاسبه دقیق تر، باید $D_{eq} = \sqrt{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$ را از رابطه زیر بدست آورد:

$$D_{eq} = \sqrt{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} \quad (3-69)$$

همچنین باید GMR خط دو مداره را با استفاده از روابط (3-64) و (3-65) محاسبه نمود تا بتوان از رابطه (3-66) اندوکتانس خط دو مداره را بدست آورد.

هـ: **خط انتقال سه فاز دو مداره با هادیهای باتدل.** محاسبه اندوکتانس مانند حالت (د) است و تنها باید بجای D_1 هادی D_1^0 را جایگزین نمود و توسط D_1^0 شعاع متوسط هندسی معادل یعنی GMR را تعیین و در رابطه (3-66) قرار داد.

۳-۱۶ کاپاسیتانس خطوط انتقال

تا اینجا دو پارامتر خط انتقال شامل مقاومت و اندوکتانس که جمعاً امپدانس سری خط را تشکیل می دهند مورد بحث قرار گرفته اند. اندوکتانس خط قسمت اعظم امپدانس سری را تشکیل داده و در تعیین میزان ظرفیت انتقال قدرت خط نقش اساسی را بازی می کند. دو پارامتر دیگر خط انتقال که جمعاً ادmittانس موازی را تشکیل می دهند عبارتند از کاندوکتانس و کاپاسیتانس (ظرفیت خازنی).

مقدار کاندوکتانس یک خط کاملاً متغیر است و به جریان نشی روی مقره ها، تغییرات شرایط جوی و تغییر خواص هدایتی جرم های جمع شده روی مقره هابستگی دارد و لذا محاسبه آن بسیار مشکل می باشد. خوشبختانه از آنجائی که نقش کاندوکتانس در تشکیل ادmittانس موازی خط در مقایسه با کاپاسیتانس ناچیز می باشد از بررسی و تاثیر آن صرف نظر کرده و بحث ادmittانس موازی خطوط را روی کاپاسیتانس متمرکز می کنیم.

کاپاسیتانس یک خط انتقال نتیجه وجود اختلاف پتانسیل بین هادیها از یک طرف و بین هادیها و زمین از طرف دیگر می باشد. چون ولتاژ اعمال شده روی خط انتقال ولتاژ متناوب AC است لذا بار الکتریکی روی هادیها نیز AC بوده و با افزایش و کاهش اختلاف پتانسیل بین هادیها افزایش و کاهش می یابد. در نتیجه جریانی از مسیر کاپاسیتانس خط عبور می کند که بطور متناوب باعث شارژ و دشارژ خط می گردد. این جریان به جریان شارژ کننده خط^۱ یا

1. Line Charging Current

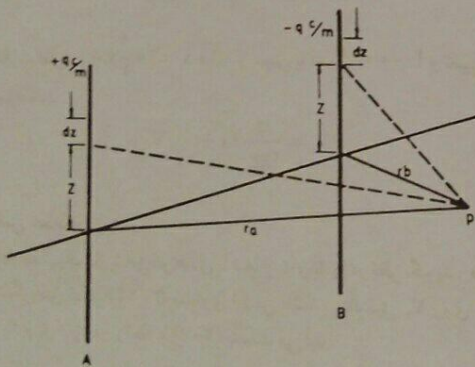
جریان کاپاسیتیو موسوم است. جریان های کاپاسیتیو حتی در شرایط بی باری خط نیز وجود دارند. کاپاسیتانس یک خط در افت ولتاژ، بهره و ضریب قدرت خط و همچنین در پایداری کل سیستم نقش مهمی را بازی می کند. در خطوط کمتر از ۸۰ Km اثر کاپاسیتانس قابل ملاحظه نبوده و از آن صرف نظر می شود، لیکن در خطوط طولانی تر باید در محاسبات وارد شود.

۳-۱۷ پتانسیل الکتریکی یک نقطه در نزدیکی دو هادی موازی

دو هادی موازی با طول بسیار زیاد را که بار الکتریکی یکتواخت $\pm q$ کلمب بر متر روی هر یک از آنها وجود دارد در نظر بگیرد (شکل ۳-۲۳). در بررسی اولیه این هادیها بسیار نازک فرض می شوند. می خواهیم پتانسیل الکتریکی در نقطه دلخواهی مانند P به فواصل r_a و r_b از دو هادی را تعیین کنیم. باید دقت نمود که در حالت کلی نقطه P در صفحه شامل دو سیم قرار ندارد.

قسمت بسیار کوچکی از دو هادی را با طول dz در نظر بگیرد. هر یک از دو قسمت با طول dz می تواند بعنوان نقطه ای با بار الکتریکی $+qdz$ و $-qdz$ محسوب گردد. پتانسیل الکتریکی v در نقطه ای بفاصله r از بار الکتریکی q برابر است با:

$$v = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (3-70)$$



شکل ۳-۲۳ تعیین پتانسیل در نزدیکی دو هادی موازی