



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تحلیل سیستمهای انرژی الکتریکی ۱

فصل دوم – محاسبه پارامترهای خطوط انتقال

دکتر علیرضا عباسی



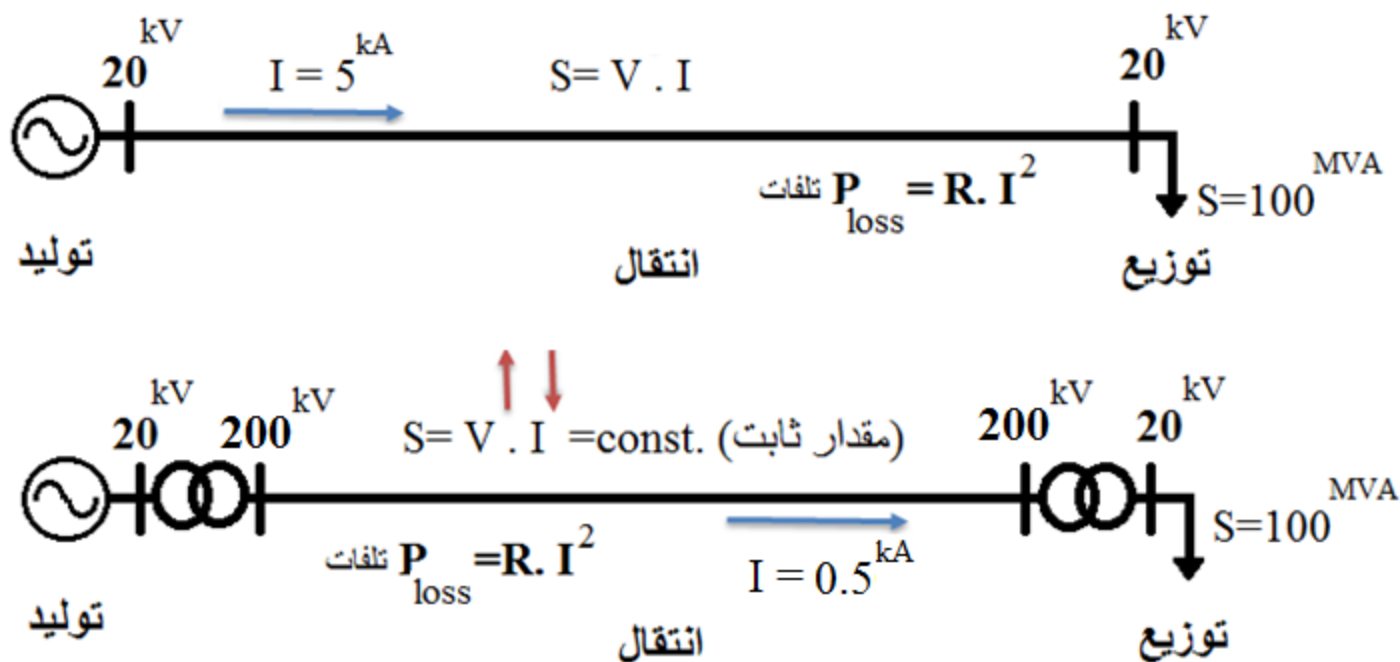
خطوط انتقال



هدف از ایجاد خطوط انتقال:

□ انتقال انرژی الکتریکی از نیروگاهها به پست های توزیع

□ متصل سازی شبکه های برق مجاور هم (کشورها)



❖ راندمان خطوط انتقال با افزایش ولتاژ افزایش می یابد، چراکه این کار باعث کاهش یافتن جریان می شود.

انواع خطوط انتقال

خطوط انتقال زمینی:

- ❑ اولین خطوط انتقال سیستم قدرت، خطوط زمینی بودند.
- ❑ دارای هزینه های فراوان حفاری و ایجاد کانال های زمینی و زیر زمینی هستند.
- ❑ گرفتن انشعاب از این خطوط مستلزم وجود ایستگاه های توزیع و جعبه های انشعاب می باشد.
- ❑ در خطوط زمینی به ندرت اشکالی بوجود می آید و خاموشی آن به مراتب از خطوط هوایی کمتر است.
- ❑ این خطوط به زیبایی محیط آسیب نمی زنند و چون در دسترس نمی باشند، خطرات کمتری دارند.



انواع خطوط انتقال

خطوط انتقال هوایی:

- ❑ از دکلها و تیرها برای نگه داشتن کابلها بالای سطح زمین استفاده می شود.
- ❑ از هوا به عنوان عایق کابلها استفاده می شود
- ❑ این روش انتقال یکی از کم هزینه ترین و رایج ترین روش های انتقال است.
- ❑ عمدتاً کابل های مورد استفاده در خطوط هوایی از جنس مس، آلومینیوم و یا آلیاژی از آن هستند.
- ❑ دسترسی به این خطوط برای تعمیر و ایجاد تغییرات در آن بسیار ساده می باشد .



آشنایی با خطوط فشار قوی

استانداردهای ولتاژ در ایران:

$\underbrace{400^{kv}, 230^{kv}}_{\text{انتقال}}, \underbrace{63^{kv}}_{\text{فوق توزیع}}, \underbrace{20^{kv}}_{\text{توزیع}}, \underbrace{380^v/220^v}_{\text{توزیع فشار ضعیف}}$

نکته: خطوط انتقال مورد استفاده در سیستم های قدرت عمدتاً از نوع خطوط هوایی با هادیهای لخت (و با عایق هوا) هستند.

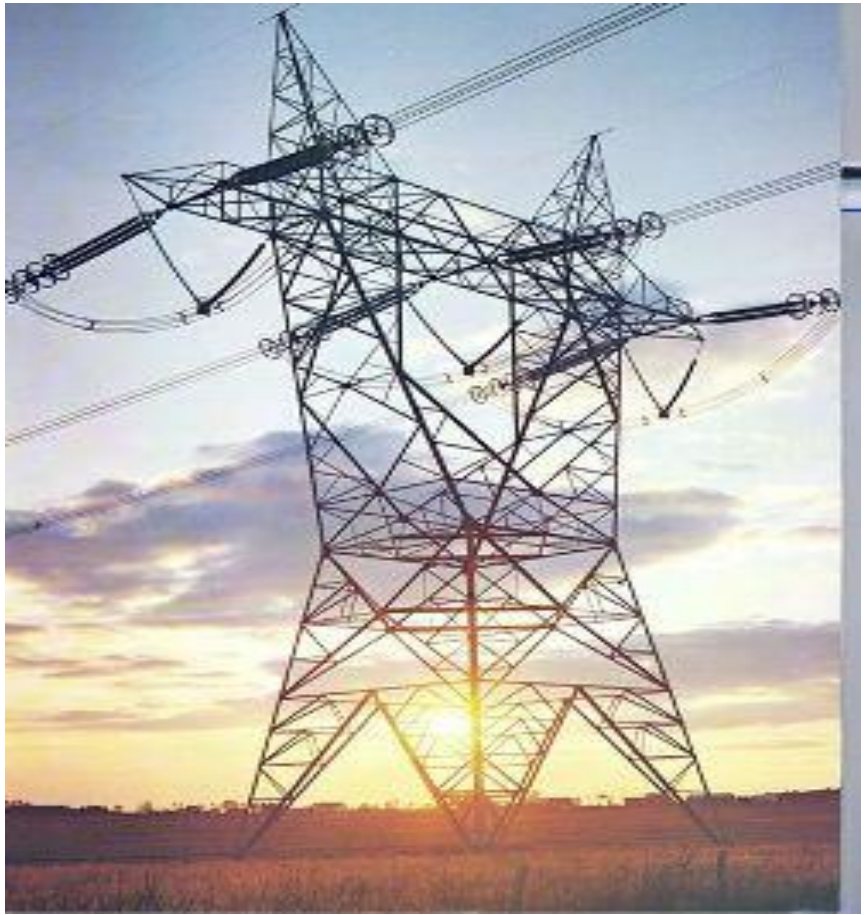
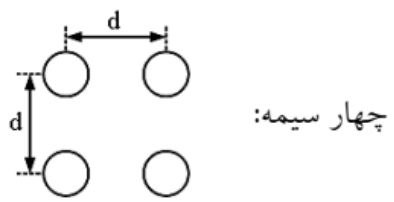
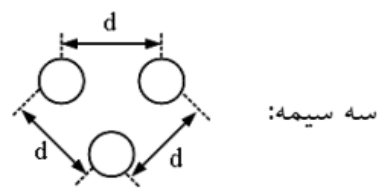
انواع خطوط سه فاز

- یک مداره (روی یک دکل یک سیستم سه فاز)
 - ساده: از سه سیم تشکیل شده
 - باندل: هر کدام از فازها از دو یا سه یا چهار سیم تشکیل شده است. در واقع به جای سه تک سیم، سه دو سیمه، سه سه سیمه و یا سه چهار سیمه داریم.
- دو مداره (روی یک دکل دو سیستم سه فاز)
 - ساده
 - باندل
 - دو سیمه
 - سه سیمه
 - چهار سیمه



خطوط سه فاز تک مداره ساده

خطوط سه فاز تک مداره باندل



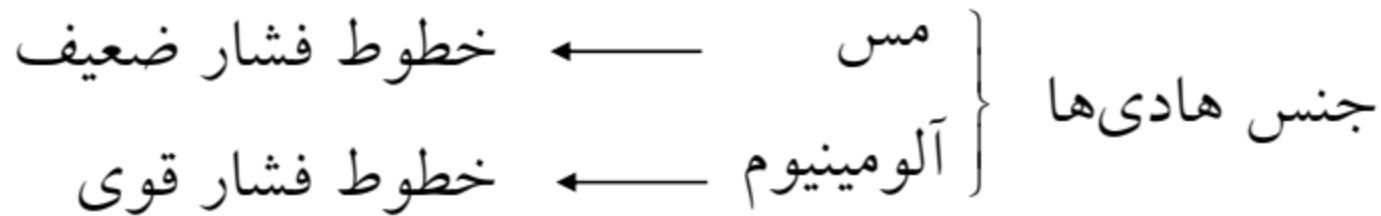


خطوط سه فاز دو مداره ساده ←

→ خطوط سه فاز دو مداره باندل



انواع هادیها در خطوط انتقال



مقایسه آلومینیم با مس در خطوط انتقال هوایی:

- وزن آلومینیم نسبت به مس در یک حجم و مقاومت یکسان کمتر است.
- هزینه آلومینیم از مس کمتر است پس با صرفه تر است.
- آلومینیم در مقایسه با مس فراوان تر است.
- هادی آلومینیمی در مقایسه با هادی مسی در مقاومت یکسان قطر بزرگتری دارد (کاهش کرونا).

- مزایای مس: هدایت الکتریکی بهتر، قدرت کششی مکانیکی بهتر
 - مزایای آلومینیوم: معمولاً ارزان تر، سبک تر و به طور نسبی سطح مقطع بزرگ تر
- بطور کلی:**

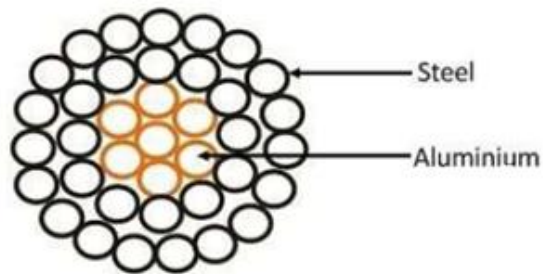
متداول ترین هادیهای آلومینیمی خطوط انتقال ولتاژ بالا



هادی ها } هادی توپر
هادی رشته ای

نکته: هادی های توپر: برای سطح مقطع های کوچک

❖ معمولاً برای انعطاف پذیری بیشتر هادیها را به صورت رشته ای می سازند.



Aluminium Conductor Steel Reinforced



انواع هادیها مورد استفاده در خطوط انتقال عبارتند از:

□ هادی تمام آلومینیمی (AAC)

□ هادی با آلیاژ تمام آلومینیمی (AAAC)

■ هادی آلومینیمی تقویت شده با فولاد (ACSR)

□ هادی آلومینیمی تقویت شده با آلیاژ (ACAR)

نکته: برای مراجعه آسان، کلمات رمز (اسامی پرندگان) به هر یک از هادی ها اختصاص یافته است.

پارامترهای خطوط انتقال

❖ مقاومت (R)

❖ اندوکتانس (L)

❖ ظرفیت خازنی یا کاپاسیتانس (C)

❖ رسانایی موازی یا کنداکتانس (G): جریان‌های نشتی را که بر روی عایق‌ها و مسیرهای یونیزه

شده در هوا جاری می‌شوند را نشان می‌دهد، که چون جریان نشتی در مقایسه با جریان‌های

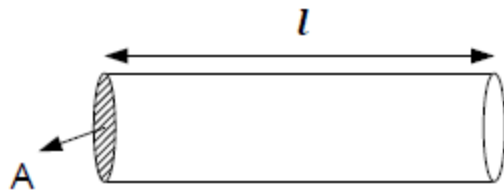
جاری در خطوط انتقال ناچیز هستند، معمولاً این پارامتر قابل صرف‌نظر کردن است.

مقاومت الکتریکی خطوط انتقال

برای هر هادی می توان دو نوع مقاومت الکتریکی تعریف نمود:

الف) **مقاومت DC**: که مقاومت الکتریکی هادی در فرکانس صفر است.

ب) **مقاومت AC**: که مقاومت الکتریکی ها دی در فرکانس غیر صفر (مثلاً فرکانس ۵۰ هرتز) شبکه است.



هادی به طول l و سطح مقطع A

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A}, \quad \rho \text{ : مقاومت ویژه}$$

مقاومت DC

مقاومت AC

$$R_{AC} = \frac{\text{توان حقیقی تلف شده در هادی (W)}}{I_{rms}^2 (A)} \Omega$$

$$R_{AC} > R_{DC} \quad \text{نکته:}$$

عوامل مؤثر:

❖ دما (درجه حرارت) ❖ اثر پیچش یا تاباندن رشته ها ❖ اثر پوستی

عوامل موثر در تغییر مقاومت هادی ها

□ اثر دما:

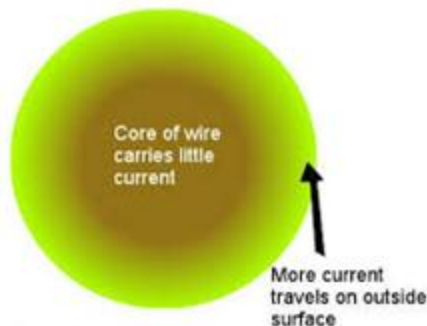
مقاومت هادی با افزایش دما زیاد می شود. اگر تغییر مقاومت را خطی فرض کنیم خواهیم داشت:

$$R_2 = R_1 \frac{T + \theta_2}{T + \theta_1}$$

□ اثر پوستی:

هنگامی که جریان I_{ac} از هادی عبور می کند، توزیع جریان در سطح مقطع هادی یکسان نبوده و چگالی جریان در سطح هادی بیشترین مقدار را دارد. این اثر موجب می شود تا R_{ac} بیشتر از R_{dc} هادی گردد.

Skin effect in a solid wire



مثلا در فرکانس ۶۰ هرتز، R_{ac} تقریبا ۲٪ بیشتر از R_{dc} است.

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

□ تاباندن هادی

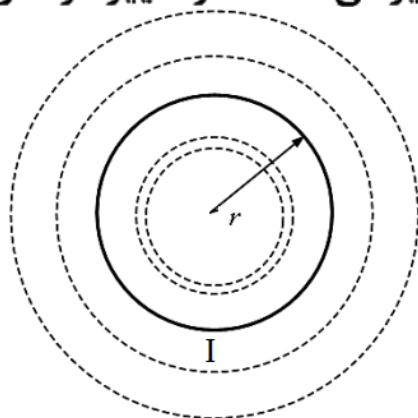


از آنجا که هادی انتقال رشته ای تابانده شده است، پس طول واقعی هر رشته بیشتر از طول هادی است و لذا مقاومت واقعی کمی بیشتر از مقدار R_{dc} بدست می آید.

محاسبه اندوکتانس خطوط انتقال (L)

□ اثر اندوکتانس:

عبور جریان از هادی موجب ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف آن می گردد که در نتیجه آن شار مغناطیسی در اطراف هادی ایجاد می گردد. وقتی که جریان تغییر می کند، شار تغییر کرده و ولتاژ در مدار القا می گردد.



هادی بلند با شعاع r و جریان I

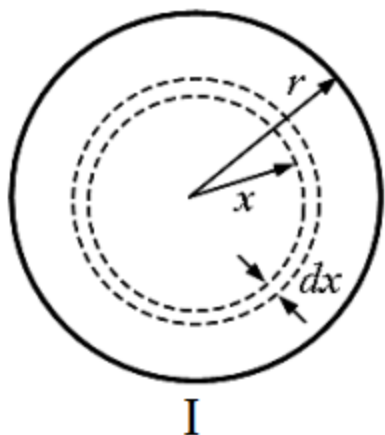
□ اندوکتانس بصورت نسبت کل شار پیوندی مغناطیسی به جریان عبوری از هادی تعریف می شود.

$$\text{اندوکتانس} \quad L \triangleq \frac{\lambda}{I} \quad \lambda = N \phi \quad \text{شار دور یا شار پیوندی}$$

□ اندوکتانس هادی را می توان بصورت مجموع شار پیوندی داخلی و خارجی هادی تعریف کرد.

$$\left. \begin{array}{l} \text{اندوکتانس داخلی} \\ \text{اندوکتانس خارجی} \end{array} \right\} \text{محاسبه اندوکتانس خط}$$

• اندوکتانس داخلی (نیازی به حفظ کردن اثبات نیست)



$$\int_0^{2\pi x} H_x \cdot dl = I_x \Rightarrow H_x (2\pi x) = I_x \Rightarrow H_x = \frac{I_x}{2\pi x} \quad \text{قانون آمپر:}$$

I_x : جریان احاطه شده با دایره ای به شعاع x

با فرض چگالی جریان یکسان در سرتاسر سطح مقطع هادی:

$$\frac{I}{\pi r^2} = \frac{I_x}{\pi x^2} \Rightarrow I_x = \frac{x^2}{r^2} I, \quad H_x = \frac{I}{2\pi r^2} x, \quad B_x = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x$$

ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هوای آزاد: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

$$d\phi_x = B_x dA = B_x (dx \times 1) = B_x dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x dx$$

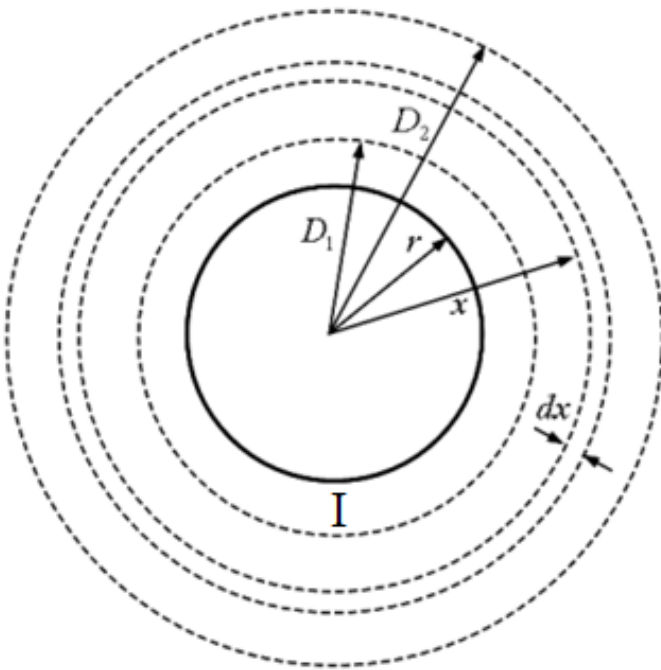
$$d\lambda_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} d\phi_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} x^3 dx \quad \text{شار پیوندی با هادی از مرکز هادی تا دایره ای به شعاع } x:$$

$$\Rightarrow \lambda_{\text{int}} = \int_0^r d\lambda_x = \int_0^r \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} x^3 dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \left(\frac{1}{4} r^4 \right) = \frac{\mu_0}{8\pi} I$$

$$\Rightarrow L_{\text{int}} = \frac{\lambda_{\text{int}}}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

نکته: اندوکتانس داخلی مستقل از شعاع هادی است.

• اندوکتانس خارجی



چون دایره به شعاع x کل جریان هادی را احاطه می کند: $I_x = I$

$$H_x = \frac{I}{2\pi x}$$

$$B_x = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

$$d\phi_x = B_x dA = B_x (dx \times 1) = B_x dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx$$

از آنجا که کل جریان I با شار خارج از هادی پیوند دارد:

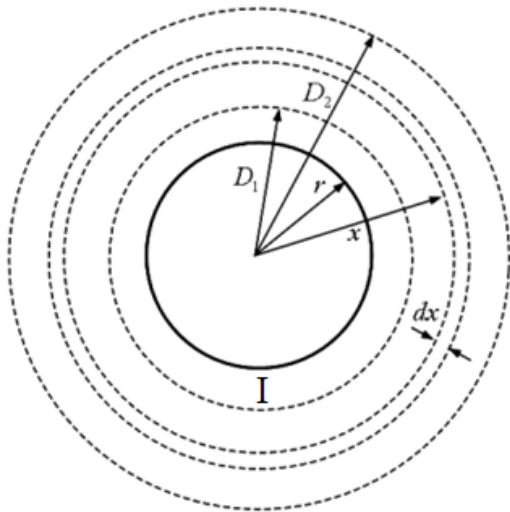
$$d\lambda_x = d\phi_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx$$

$$\Rightarrow \lambda_{\text{ext}} = \int_{D_1}^{D_2} d\lambda_x = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} (\ln D_2 - \ln D_1) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1}$$

$$\Rightarrow L_{\text{ext}} = \frac{\lambda_{\text{ext}}}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_2}{D_1} \text{ H/m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

اندوکتانس بین دو نقطه خارج از هادی



$$L_{\text{int}} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7}$$

$$L_{\text{ext}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_2}{D_1}$$

اگر $r = D_1$ نقطه‌ی روی هادی و $D = D_2$ نقطه‌ای در بیرون هادی باشد داریم:

$$L_T = L_{\text{int}} + L_{\text{ext}} = \frac{1}{2} * 10^{-7} + 2 * 10^{-7} L_n D/r$$

$$= 2 * 10^{-7} \left[\frac{1}{4} + L_n D/r \right] = 2 * 10^{-7} \left[\frac{1}{4} L_n e + L_n D/r \right]$$

$$= 2 * 10^{-7} \left[L_n e^{\frac{1}{4}} + L_n D/r \right] = 2 * 10^{-7} \left[L_n \frac{e^{\frac{1}{4}} D}{r} \right] = 2 * 10^{-7} L_n \frac{D}{r e^{-\frac{1}{4}}} = 2 * 10^{-7} L_n \frac{D}{r'}$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r e^{-\frac{1}{4}}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r'}$$

$r' = r e^{-\frac{1}{4}} = 0.7788r$ شعاع متوسط هندسی (GMR)