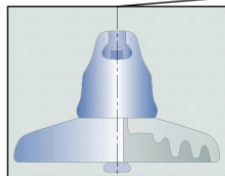
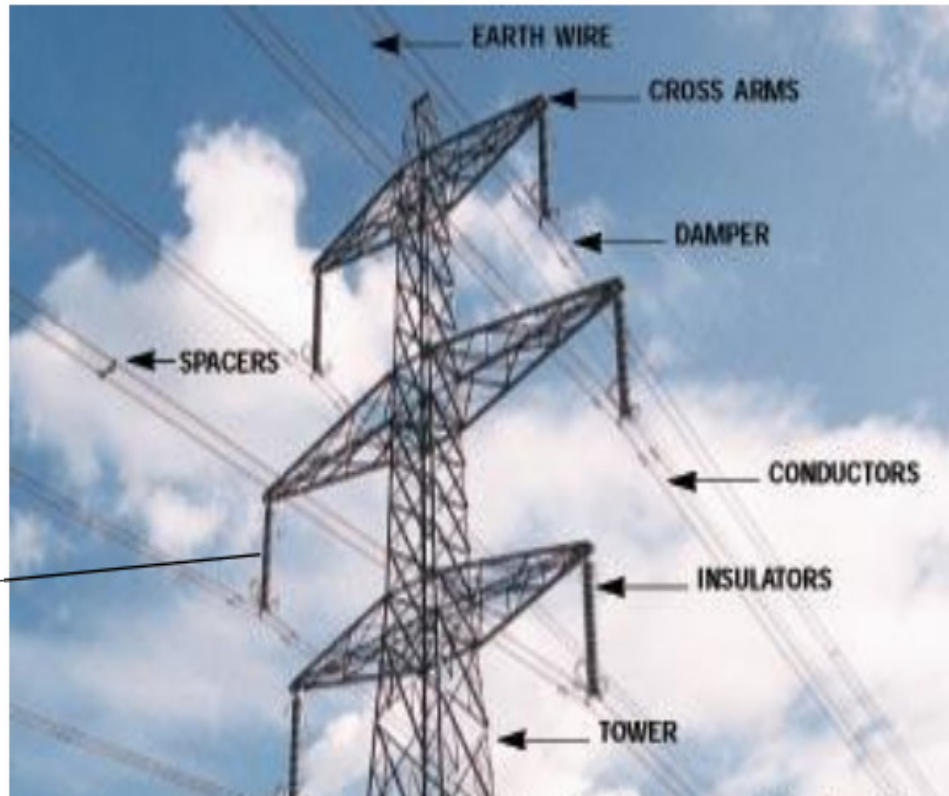


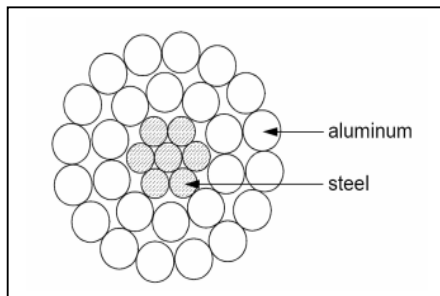
SCHEMELE ECHIVALENTE ȘI PARAMETRII LINIILOR ELECTRICE

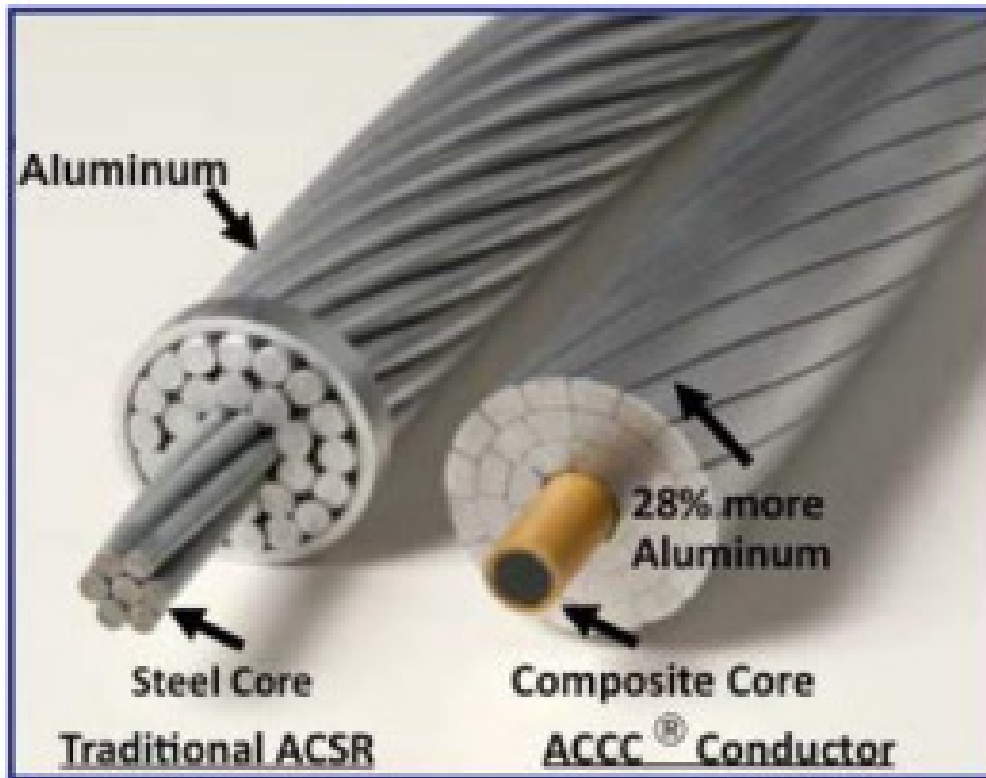
5.1. Tipuri si componente LE

LEA



OI-AI





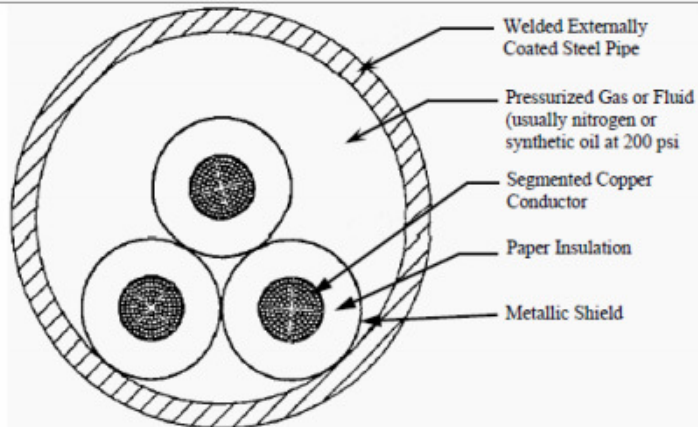
Izolatoare



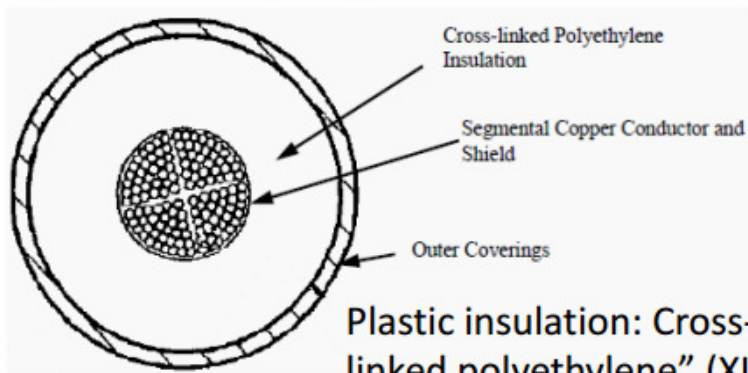
## Amortizor de vibratii



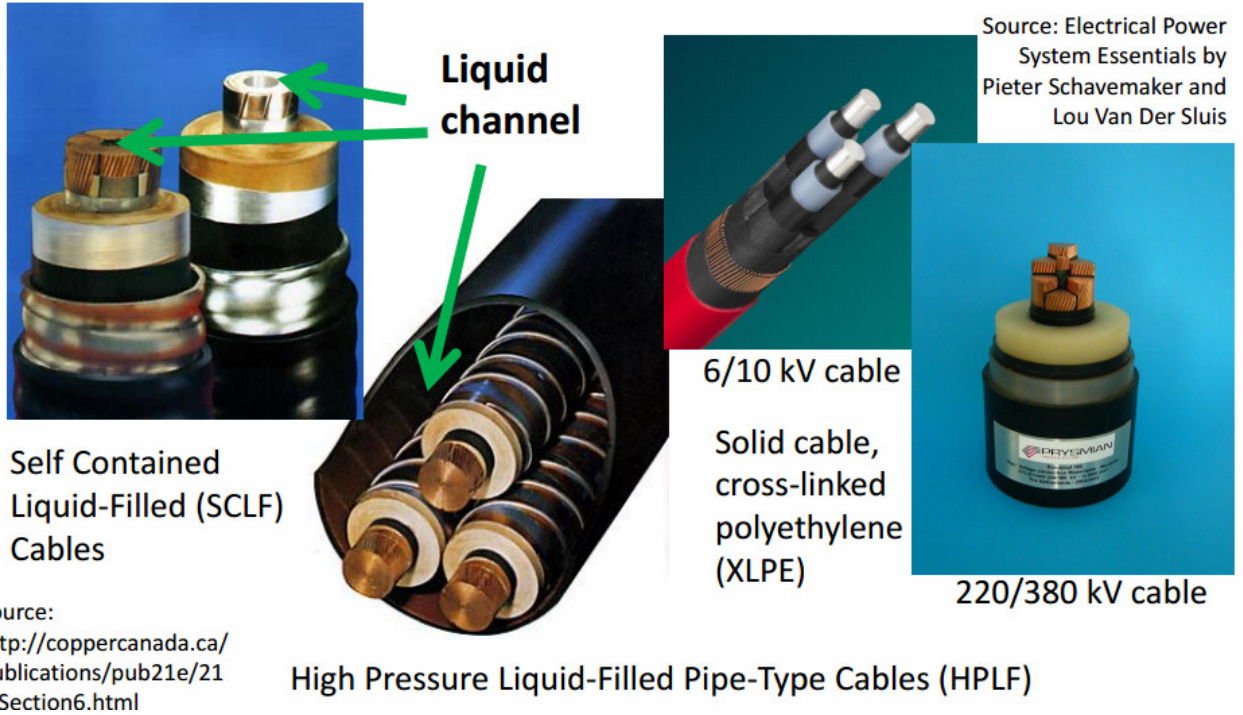
## LEC



**Paper-Gas/ Paper-Oil insulation: High-Pressure, Oil/Gas-Filled Pipe-Type Cable**

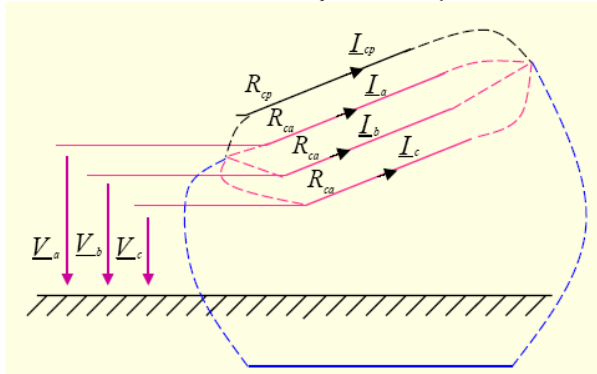


**Plastic insulation: Cross-linked polyethylene" (XLPE)**



## 5.2. Rezistența electrică a LEA

Fie o linie electrică trifazată ( $a, b, c$ ) la care se cunosc rezistențele conductoarelor de fază sau active notate  $R_{ca}$  și rezistența conductorului de protecție  $R_{cp}$ .



În general se cunoaște rezistența unui fir dintr-un conductor la tensiune continuă:

$$R_{cc} = \rho \frac{l}{s} = \frac{1}{\gamma} \frac{l}{s} [\Omega] \quad (1)$$

în care:  $\rho$  este rezistivitatea electrică a materialului în  $[\Omega \text{mm}^2/\text{m}]$ ;

$\gamma$  - conductivitatea materialului, în  $[\text{m}/\Omega \text{mm}^2]$ ;

$l$  - lungimea conductorului, în  $[\text{m}]$ ;

$s$  - secțiunea conductorului, în  $[\text{mm}^2]$ .

În realitate, conductoarele sunt realizate sub formă de funie și mărimea  $R_{cc}$  pentru un conductor cu lungimea  $l$ , este afectată de câteva erori:

1. eroarea de lungime: în cazul conductoarelor funie, din cauza răsucirii firelor, lungimea conductoarelor LEA e mai mare cu 2 - 3% și la LEC cu 2 - 6%.

2. eroarea de secțiune: datorită folosirii în calcule a secțiunii standardizate; secțiunile reale sunt de obicei mai mici decât cele standardizate.

3. variația cu temperatura a rezistivității materialului conductor

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^0} [1 + \alpha_{20^0} (\theta - 20^0)] \quad (2)$$

unde  $\alpha_{20}$  este coeficientul de temperatură la  $20^{\circ}\text{C}$ .

|    | $\rho$ [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ] | $\alpha_{20}$ [ $\text{grad}^{-1}$ ] |
|----|---|--------------------------------------|
| Cu | $1,74 \cdot 10^{-2}$                    | 0,00392                              |
| Al | $2,941 \cdot 10^{-2}$                   | 0,00403                              |
| Ol | $14,2 \cdot 10^{-2}$                    | 0,0062                               |

Rezistența la tensiune alternativă se calculează luând în considerare rezistența la tensiune continuă și efectele de proximitate ( $y_p$ ) și pelicular ( $y_s$ ):

$$R_{ca} = R_{cc}(1 + y_p + y_s) \quad (3)$$

Pentru LEA se poate neglija efectul de proximitate pentru că fazele se află la distanțe mari unele de altele;

Efectul de suprafață (pelicular) se poate neglija pentru secțiuni mai mici de 400..500  $\text{mm}^2$  pentru conductoare din Cu, respectiv pentru 600  $\text{mm}^2$  la Al.

Rezistența căii de întoarcere prin pământ se poate calcula conform formulei lui Carson:

$$R_p = \omega \mu \frac{1}{8} 10^3 \quad [\Omega / \text{km}] \quad (4)$$

unde  $\mu$  este permeabilitatea solului care se poate considera egală cu permeabilitatea magnetică a vidului  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{H} / \text{m}$  ;

$\omega = 2\pi f$  este pulsația.

În general, pentru soluri normale se consideră  $R_p=0,05$  [ $\Omega/\text{km}$ ].

## 5.2. Reactanța inductivă a LEA

Reactanța inductivă a unui conductor din componența unei linii electrice trifazate se determină cu relația:

$$X = \omega L = 2\pi f L = x_0 l \quad [\Omega] \quad (5)$$

L - inductivitatea circuitului echivalent;

$x_0$  - reactanța specifică ;

l - lungimea liniei.

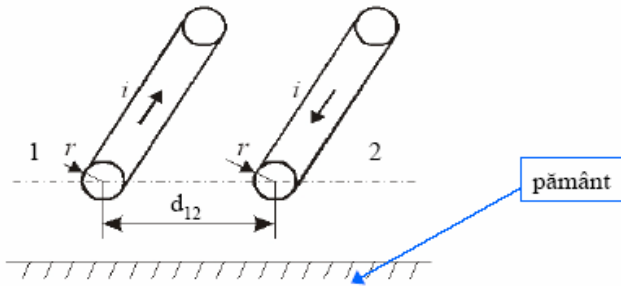
Inductivitatea unui circuit este dată de raportul dintre fluxul care străbate o suprafață care se reazămă pe acest circuit și curentul din contur; prin contur se înțelege circuitul de ducere și de întoarcere a curentului:

$$L = \frac{\phi}{i} \quad [H] \quad (6)$$

Inductivitatea este o mărime de material care depinde de materialul conductor, de dimensiunea și forma spațială a circuitului și de numărul de spire. Inductivitatea nu depinde de mărimea curentului care trece prin circuit.

În cele ce urmează se disting mai multe cazuri:

**i. Inductivitatea atașată unui conductor dintr-un sistem monofazat.**



Considerând cele două conductoare a fi fire masive, inductivitatea acestora este alcătuită din inductivitatea internă și inductivitatea externă, corespunzătoare liniilor de câmp magnetic interioare și exterioare:

$$L = L_{\text{int}} + L_{\text{ext}} = \frac{\mu l}{8\pi} + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{d_{12}}{r} \quad (7)$$

Unde:  $\mu = \mu_0 \mu_r$  este permeabilitatea magnetică absolută;

$\mu_r$  - permeabilitatea magnetică relativă.

Rezultă:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{d_{12}}{r_e} \quad (8)$$

unde  $r_e = r e^{-\mu_r / 4}$  este raza echivalentă a conductorului.

1. Cazul conductoarelor din material nemagnetice  $\mu_r = 1$

- a. 1 conductor masiv  $r_e = 0.778r$
- b. 7 fire  $r_e = 0.725r$
- c. 19 fire  $r_e = 0.757r$

2. Cazul conductoarelor magnetice Al-Ol:

- a. 7 fire  $r_e = 0.770r$
- b. 19 fire  $r_e = 0.812r$

În general, pentru calcul se folosesc parametrii specifici (raportați la unitatea de lungime):

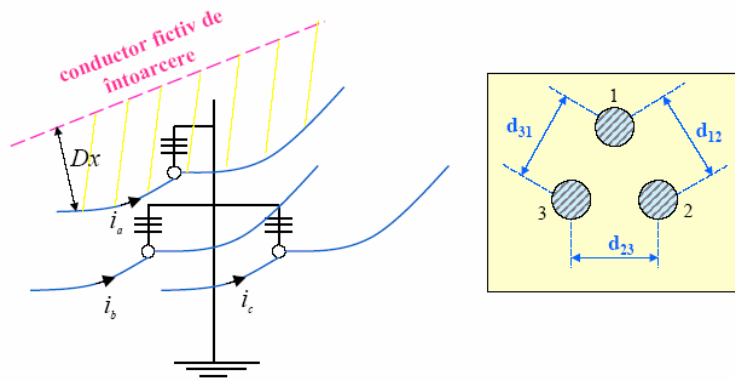
- Inductivitatea specifică:

$$L_0 = 0,461g \frac{d_{12}}{r_e} \quad (9)$$

- Reactanța inductivă specifică:

$$x_0 = \omega L_0 = 0,14451g \frac{d_{12}}{r_e} \quad (10)$$

**ii. Inductivitatea atașată unui conductor în cazul sistemului trifazat cu un singur circuit**



ii.a. Cazul  $d_{12} = d_{23} = d_{31}$  și o încărcare simetrică a fazelor:  $L_a = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{d_{12}}{r_e}$

ii.b. Cazul linie trifazată, simplu circuit, cu conductoarele transpuse.

### DE CE transpunerea conductoarelor?

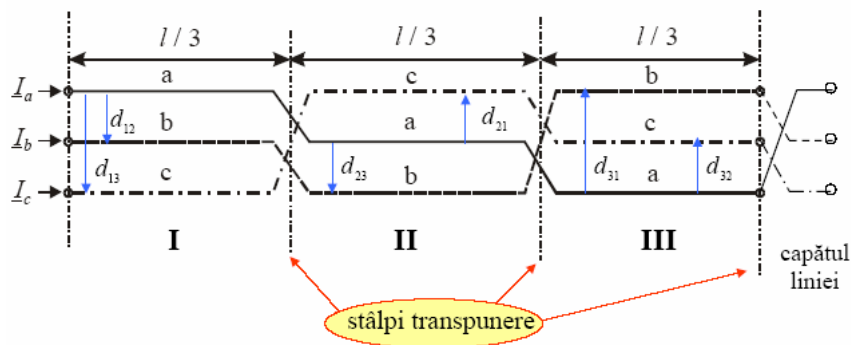
În practica proiectării LEA, pentru a obține construcții economice, mai ușoare și mai puțin înalte, s-au realizat stâlpi la care distanțele între faze sunt diferite.

În aceste cazuri, când distanțele diferă mult, inductivitățile atașate fazelor  $a, b, c$ , sunt diferite între ele; acest fapt determină o nesimetrie a impedanțelor, respectiv a tensiunilor de fază.

Aceasta produce perturbații în liniile de telecomunicații sau LEA învecinate, motiv pentru care se remediază prin transpunerea conductoarelor de fază.

Distanța pe care un conductor de fază ocupă cele trei poziții pe stâlp, s.n. **CICLU DE TRANSPUNERE**, iar distanța între doi stâlpi de transpunere s.n. **PAS DE TRANSPUNERE**.

### ❖ CE ESTE SI CUM se realizează transpunerea?



Numărul ciclurilor de transpunere pe o linie, depinde de lungimea și tensiunea nominală a liniei, și este dictat de necesitatea de a limita influența liniilor de înaltă tensiune (Î.T.) asupra liniilor de telecomunicații.

În prezent la liniile de 110 kV se practică un singur ciclu de transpunere, iar la 220 kV, 400 kV, în funcție de lungimea liniei, între unu și trei cicluri. Pentru țara noastră, având în vedere lungimile liniilor de 400 kV, lungimea ciclului este de cca. 250 km.

În cazul liniilor cu conductoare transpuse, inductivitățile pe cele trei faze vor fi egale. Rezultă:

$$L_a = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{DMG}{r_e}$$

$$x_0 = 0,14451g \frac{DMG}{r_e}$$

unde  $DMG = \sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}}$  este distanța medie geometrică între conductoarele de fază ale unui circuit

### iii. Inductivitatea atașată unui conductor de fază pentru o linie trifazată, dublu circuit.

Se consideră că cele două circuite sunt identice din punct de vedere constructiv și al încărcării fazelor. Rezultă:

$$L_a = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left( \frac{DMG}{r_e} \frac{DMG_1}{DMG_2} \right) \quad (11)$$

unde  $DMG = \sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}}$  este distanța medie geometrică între conductoarele de fază ale primului circuit;

$DMG_1 = \sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}}$  -distanța medie geometrică între conductoarele fazelor neomoloage.

$DMG_2 = \sqrt[3]{d_{1'2'}d_{2'3'}d_{3'1'}}$  -distanța medie geometrică între conductoarele fazelor omoloage.

### iv. Inductivitatea în cazul sistemelor trifazate cu conductoare de fază fasciculate sau jumelate

#### UNDE și DE CE?

- La LEA cu tensiuni foarte înalte:  $Un = 220 \text{ kV}; 400 \text{ kV}; 750 \text{ kV}$ .
- În scopul creșterii capacității de transport și a reducerii pierderilor de putere și energie prin descărcare corona.

**Avantajele** unui număr mai mare de subconductoare pe fază:

- Se diminuează câmpul electric superficial în apropierea conductorului, reducându-se valoarea câmpurilor perturbatoare și pierderile prin descărcare corona: pentru secțiuni uzuale ale conductoarelor la 400 kV, sunt indispensabile 2 subconductoare pe fază, 3 nu sunt absolut necesare, dar în mod evident nu jonează. În Europa, numărul maxim de subconductoare la 400 kV este de 4;
- Crește intensitatea curentului maxim pentru o aceeași secțiune totală a conductorului, datorită faptului că faza se răcește mai bine;
- Conduce la scăderea reactanței inductive a liniei și în consecință la reducerea căderilor de tensiune și a pierderilor de putere reactivă;
- ⇒ pentru secțiuni uzuale ale conductoarelor la 400 kV, sunt indispensabile 2 subconductoare pe fază, 3 nu sunt absolut necesare, dar în mod evident nu jonează. În Europa, numărul maxim de subconductoare la 400 kV este de 4;
- Crește intensitatea curentului maxim pentru o aceeași secțiune totală a conductorului, datorită faptului că faza se răcește mai bine;
- Conduce la scăderea reactanței inductive a liniei și în consecință la reducerea căderilor de tensiune și a pierderilor de putere reactivă;
- Reducerea ușoară a rezistenței electrice a liniei, la aceeași secțiune totală a conductorului, datorită reducerii efectului de suprafață în conductor.



**Dezavantaje:**

- Pentru aceeași secțiune totală, creșterea numărului de subconductoare ridică costul liniei, datorită eforturilor suplimentare prin încărcarea cu gheață a cărei greutate depinde mai mult de suprafața totală de contact între conductor și aer, decât de secțiunea totală.
- Avariile sunt mai frecvente la liniile cu mai multe subconductoare.

**Inductivitatea specifică atașată unei faze având conductoare fasciculate:**

- Cazul conductorului făcând parte dintr-o linie trifazată, simplu circuit

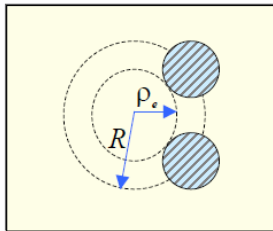
$$L_0 = 0.461g \frac{DMG}{\rho_e} \tag{12}$$

pentru cazul real cu conductoare transpuse

unde:  $\rho_e$  este raza medie echivalentă a conductorului fasciculat.

- LEA cu dublu circuit cu transpunerea fazelor:

$$L_0 = 0.461g \left( \frac{DMG}{\rho_e} \frac{DMG_1}{DMG_2} \right) \tag{13}$$



Se consideră un conductor de fază constituit din mai multe subconductoare.

$$\rho_e = \sqrt[n]{nr_e R^{n-1}}$$

unde: n este numărul de subconductoare pe fază

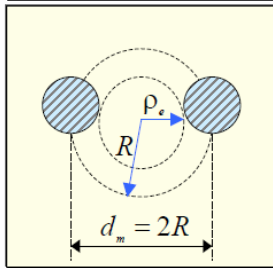
$r_e$  - raza echivalentă a subconductorului din fascicul

$$r_e = re \frac{\mu_r}{4}$$

R - raza de fasciculare

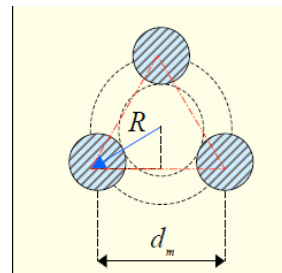
Pentru **cazul particular**  $n = 2$ :  $R = \frac{d_m}{2}$

$$\rho_e = \sqrt{r_e d_m}$$



Pentru **cazul particular**

$$\rho_e = \sqrt[3]{r_e d_m^2}$$



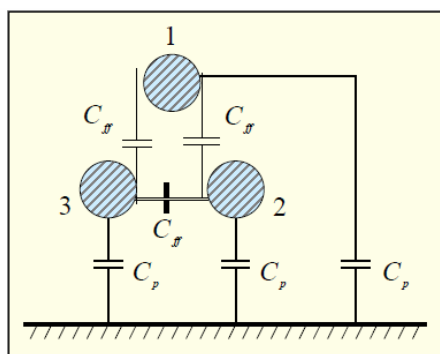
$$n = 3: R = \frac{d_m}{\sqrt{3}}$$

În ceea ce privește **calculul reactanței inductive a cablurilor**, acesta este mult mai sofisticat, în special datorită secretului de fabricație. Fabricantul pune la dispoziția specialiștilor direct valorile reactanței sau susceptanței, în funcție de tensiunea și de tipul cablului.

În general,  $L_{cablu} < (4 \dots 5) L_{LEA}$ . Inductivitatea specifică a unui cablu este mult mai mică decât inductivitatea specifică a LEA.

Pentru LEC nu se fac transpuneri ale fazelor, deoarece acestea nu se influențează între ele datorită ecranării; se fac însă transpuneri ale ecranelor metalice.

### 5.3. Susceptanța capacitivă a liniilor electrice



$$B = \omega C_s \quad [S/km]$$

Unde  $C_s$  este capacitatea de serviciu:

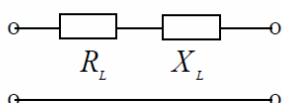
$$C_s = 3C_{ff} + C_p$$

Pentru o linie trifazată, există curenți capacitivi între faze și între faze și pământ caracterizați de:

$C_{ff}$  - capacitatea fază-fază

$C_p$  - capacitatea fază-pământ

$C_s$  se poate introduce în mod distribuit de-a lungul liniei.



La LEA de medie tensiune, curenții (laterali) de convecție fiind foarte mici se pot neglija, a.î. în schema echivalentă nu apare capacitatea de serviciu  $C_s$  și rămân în circuit numai rezistența  $R_L$  și reactanța inductivă  $X_L$ ; rezultă astfel un **dipol electric**.

La LEA de înaltă tensiune și foarte înaltă tensiune, dar în special la liniile în cablu (LEC), nu se mai poate neglija capacitatea de serviciu deoarece **curenții de convecție sunt foarte mari!!!**

Efectul imediat al prezenței unei  $C_s$  importante este că liniile de f.î.t. sau LEC, sunt “generatoare” importante de putere reactivă cu caracter capacitiv.

$$C_s = \frac{0.0242}{\lg \frac{DMG}{r_e}}$$

|                    |     |     |      |     |
|--------------------|-----|-----|------|-----|
| Un [kV]            | 110 | 220 | 400  | 750 |
| $C_s$ [nF/km/fază] | 9   | 9,3 | 11,2 | 13  |

Prezența conductorului sau conductoarelor de protecție legate la pământ mărește capacitatea față de pământ a liniei, pentru că liniile de câmp electric se închid și prin conductorul de protecție și prin pământ.

În cazul conductoarelor fasciculate, raza echivalentă a fazei crește, ceea ce atrage după sine mărirea capacității și susceptanței capacitiv.

#### Efectul de compensare a liniilor electrice de înaltă tensiune

O particularitate a liniilor electrice de înaltă tensiune, aeriene, dar în special a LEC, constă în faptul că susceptanța capacitivă provoacă o circulație de curenți capacitivi și din această cauză **linia poate fi considerată ca un “generator de putere reactivă” (Q)**.

În consecință crește nivelul de tensiune și se îmbunătățește factorul de putere al transportului de energie, care la liniile de f.î.t. ajunge la 1.

Curentul capacitiv la începutul unei linii, în ipoteza că tensiunea de fază  $V$  este constantă pe toată lungimea liniei, se poate scrie:

$$I_c = Vb_0l \quad [A]$$

iar puterea reactivă capacitivă produsă de cele trei faze este:

$$Q_{cap} = U_n^2 B_L \quad [VAr]$$

#### Valori medii ale puterilor capacitiv generate

- Pentru o LEA de 110 kV,  $Q_{cap}$  generată pe 100 km este  $Q_{cap} = 3[MVAr]$ ;
- La 220 kV, tot pe 100 km:  $Q_{cap} = 12...14[MVAr]$ ;

- La 400 kV, pe 100 km:  $Q_{cap} = 55...60 [MVar]$ ;

**Linii electrice în cablu** produc o putere capacitivă mult mai mare, de cca. 20 de ori mai mare decât în cazul LEA, la aceeași tensiune.

Spre deosebire de liniile la tensiune alternativă, cele la tensiune continuă nu produc putere reactivă capacitivă. De aceea, se preferă cabluri la tensiune continuă pe lungimi mari (de exemplu cabluri submarine).

#### 5.4. Conductanța liniilor electrice

Conductanța  $GL$  constituie parametrul LEA corespunzător pierderilor transversale de putere activă, datorate imperfecțiunilor izolației și descărcărilor corona:

$$G_L = \frac{\Delta P_{iz} + \Delta P_{cor}}{U_n^2}$$

##### a) Pierderile de putere activă datorate imperfecțiunii izolației $\Delta P_{iz}$

În punctele de fixare a conductoarelor la stâlp apar “scurgeri” de curent prin izolație spre pământ care sunt cu atât mai intense cu cât condițiile atmosferice sunt mai defavorabile.

De ex., pentru un lanț de izolatoare pentru o LEA cu tensiunea nominală  $U_n = 220 \text{ kV}$  care prezintă o rezistență de izolație, în condiții normale de mediu înconjurător, de cca.  $2,4 \cdot 10^9 [\Omega / fază]$ , conductanța corespunzătoare este:

$$G_0 = \frac{1}{R_{iz}} = 1.25 [nS / km]$$

În consecință, această conductanță determină pierderi de putere pe o fază:

$$\Delta P_{iz} = G_0 V^2 \cong 20 [W / km]$$

Pe timp nefavorabil (ploaie, ceață), valoarea pierderilor de putere crește de 5 - 6 ori, dar rămân totuși neglijabile în calculele de regimuri. În zonele poluate, datorită depunerilor intense de murdărie, valoarea conductanței crește foarte mult, 20...400 [nS/km].

Având în vedere faptul că, prin proiectare, se aleg izolatoare care nu favorizează depunerile, care se “autospală” la căderea intemperiilor sau sunt curățate periodic, în practică valoarea  $\Delta P_{iz}$  se neglijează.

**b) Pierderile de putere activă prin descărcare corona** – trebuie luate în considerare încă din faza de proiectare a liniei.

##### CE ESTE ȘI ÎN CE CONDIȚII APARE?

Efectul corona este o descărcare electrică autonomă, incompletă ce se produce la suprafața conductorului sub forma unei coroane luminoase, fiind însoțită de un zgomot caracteristic.

Această descărcare electrică apare atunci când intensitatea câmpului electric la suprafața conductoarelor depășește valoarea critică  $E_{cr} = 21.1 [kV / cm]$

În cazul neuniformităților existente pe suprafața conductoarelor funie, datorate deteriorărilor mecanice, murdăriei, picăturilor de apă, răsucirii conductoarelor, această valoare inițială se poate modifica, descărcarea corona producându-se la valori mai mici ale tensiunii decât cele corespunzătoare câmpului critic.

Sub tensiunea critică, pierderile datorate descărcării corona sunt mai mici. Peste tensiunea critică, aceste pierderi cresc vertiginos cu creșterea tensiunii.

Pierderile care apar și sub tensiunea critică se datorează unor *descărcări locale* cauzate de asperitățile de pe suprafața conductoarelor, de depuneri de particule lichide sau solide; acesta s.n. *regimul de pierderi localizate*.

Dacă tensiunea liniei crește, sau dacă ploaia sau ceața amplifică fenomenul de neliniaritate, sarcinile spațiale din jurul conductorului devin mai dense, ne apropiem de  $U_{cr}$  de apariție a descărcării corona și avem de-a face cu *regimul generalizat*.

Normele prevăd ca pe timp frumos să nu apară descărcări corona.

La liniile aeriene de 400 kV, pierderile prin descărcare corona ajung până la 5...7 % din pierderile Joule, iar la liniile de 750 kV pierderile prin descărcare corona sunt de 4 ori mai mari decât la liniile de 400 kV.

**Influența descărcării corona** se manifestă prin:

- creșterea pierderilor de putere și energie în rețelele electrice;
- scurtarea duratei de viață a conductoarelor, armăturilor, clemelor prin corodarea acestora;
- producerea de perturbații de înaltă frecvență, puternice, care deranjează emisiunile radio, TV etc., precum și zgomote acustice deranjante;

Pentru **evitarea apariției fenomenelor corona** este necesar a mări valoarea lui  $U_{cr}$ :

- prin mărirea razei conductorului, măsură care însă conduce la dificultăți de montare și în exploatarea liniilor;
- folosirea conductoarelor jumelate (fasciculate), obținându-se în felul acesta o mărire a suprafeței aparente a grupului de subconductoare și scăzând intensitatea câmpului critic la suprafața conductorului; aceasta este metoda cea mai eficace, fiind cea mai răspândită.

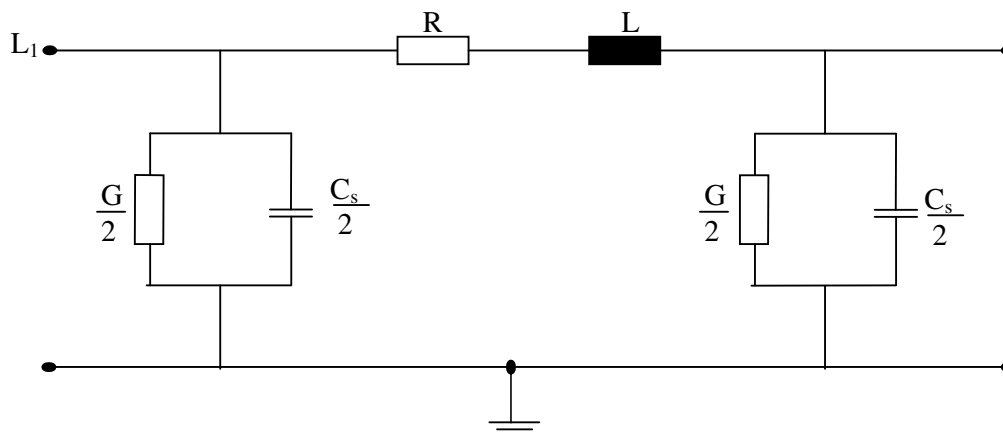
În **cazul liniilor în cablu**, conductanța apare datorită pierderilor de putere prin fenomene de ionizare în dielectricul cablului, „scurgerii” de curent datorat imperfecțiunii izolației sau pierderilor de putere datorită ciclului de histerezis în dielectric.

Pentru evaluarea pierderilor în dielectric se folosește tangenta unghiului de pierderi  $tg\delta$ , ce reprezintă raportul dintre componentele activă și reactivă ale curentului total care circulă prin cablu. În funcție de calitatea izolației aceasta are valori între 0,002...0,008.

La cabluri cu tensiuni de 110 kV și 220 kV pierderile de putere în izolație ajung până la valoarea de  $5 \div 10 [kW / km]$ .

## 5.5. Scheme echivalente ale liniilor electrice

Cu excepția sistemelor de joasă tensiune este de dorit ca liniile să funcționeze simetric (sarcina uniform distribuită pe cele trei faze). Astfel, la funcționarea normală, tensiunile și curenții de fază vor forma sisteme simetrice de mărimi (fazori egali în modul și defazați cu  $120^\circ$ ). Din acest motiv, este suficientă determinarea mărimilor de stare și parametrică ale unei singure faze, pentru sistem fiind deasemenea suficientă o reprezentare monofilară, ca în figura de mai jos.



Schema echivalentă monofilară a unei linii electrice

În cadrul teoriei cuadripolilor, acest element de sistem (linie electrică) poate fi reprezentat cu ajutorul unei scheme simetrice în  $\Pi$ . Trebuie deasemenea precizat că în reprezentarea monofilară vom avea de-a face cu tensiuni de fază (fază-pământ).

Toate valorile puterilor determinate în cadrul reprezentării monofilare trebuie multiplicat cu 3 când vor fi asociate sistemului trifazat originar. Rezistența, conductanța transversală și inductanța unei linii sunt date de aceleași cantități  $R$ ,  $G$ ,  $L$  ca în schema echivalentă trifazată. Așa-numita *capacitate de serviciu*  $C_s$  este introdusă aici ca o cantitate echivalentă, în scopul includerii capacităților între conductoare și între conductoare și pământ.

Capacitatea de serviciu ar trebui să aibă același efect ca și cele două capacități deja menționate mai sus  $C_p$  și  $C_{ff}$  (generează aceeași putere reactivă). Conform acestei condiții rezultă următoarea relație între capacități:

$$C_s = 3C_{ff} + C_p$$

Capacitatea de serviciu și conductanța transversală în circuitul echivalent monofazat (modelul  $\Pi$ ) sunt împărțite egal la cele două capete ale liniei, în scopul evitării introducerii unui nod la mijlocul liniei (modelul T).

Așa cum s-a mai spus, rezistențele, conductanțele transversale, inductivitățile și capacitățile sunt în realitate distribuite pe întreaga lungime a liniei sub forma unor cantități specifice. Pentru a putea crea un model exact, este necesară conceperea unei linii de lungime  $l$  dintr-un număr infinit de elemente cu lungimea diferențială  $dl$ .

Din acest concept au derivat ecuațiile liniilor lungi, necesare pentru calculul liniilor electrice de lungimi mari. În acest context devine utilă o reprezentare în domeniul complex a parametrilor liniei.

Utilizarea simbolurilor complexe în domeniul c.a. trifazat permite, de exemplu, reprezentarea simultană a amplitudinilor și fazelor tensiunilor și curenților. Dacă nu se specifică, valorile menționate sunt efective.

Impedanțele furnizează în domeniul c.a. informații atât asupra parametrului activ (rezistență), cât a celui reactiv (reactanță). Există două modalități de reprezentare matematică a mărimilor complexe la fel de eficiente: forma carteziană (reprezentarea părții active și reactive) și forma polară (reprezentarea amplitudinii și fazei). Reprezentarea grafică a mărimilor complexe în spațiul numeric gaussian se face cu ajutorul vectorilor sau fazorilor. Utilizând diagramele fazoriale, curenții și tensiunile unui circuit trifazat de c.a. pot fi reprezentate clar și interpretate fără cunoștințe detaliate despre calculul complexe.

În ecuațiile liniilor mai apare un factor numit *impedanță caracteristică a liniei*  $Z_c$ . Aceasta este o mărime complexă, determinată pe baza relației:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C_s}} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'_s}}$$

cu  $\omega = 2\pi f$ ; mărimile cu ' sunt mărimi specifice (pe unitatea de lungime).

Un alt factor complex care apare în ecuațiile liniilor electrice se referă la *constantă de propagare* a undei de-a lungul liniei  $\gamma$ , definită astfel:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C'_s)}$$

Ecuațiile liniilor electrice pot fi astfel exprimate sub forma:

$$\underline{U}_1 = \cosh(\underline{\gamma}l)\underline{U}_2 + \underline{Z}_c \sinh(\underline{\gamma}l)\underline{I}_2$$

$$\underline{I}_1 = \sinh(\underline{\gamma}l)\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} + \cosh(\underline{\gamma}l)\underline{I}_2$$

(indicele 1 se referă la începutul liniei, iar indicele 2 la sfârșitul liniei).

Dacă sunt cunoscute valorile (complexe) tensiunilor și curenților la unul din capetele liniei, pe baza relațiilor precedente pot fi determinate și valorile la celălalt capăt.

Din motive economice întotdeauna liniile electrice sunt proiectate astfel încât pierderile lor active să fie mici în raport cu cele pe elementele capacitive și inductive. În consecință:  $R \ll \omega L; G \ll \omega C_s$ .

Liniile la care R și G sunt ignorate complet se numesc *linii fără pierderi*. În acest caz impedanța caracteristică și constanta de propagare vor avea valori reale:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C_s}}, \beta = \omega \sqrt{L' C_s} (\alpha = 0)$$

Se obțin astfel ecuațiile simplificate ale liniilor sub forma:

$$\underline{U}_1 = \cosh(\beta l) \underline{U}_2 + j Z_c \sinh(\beta l) \underline{I}_2$$

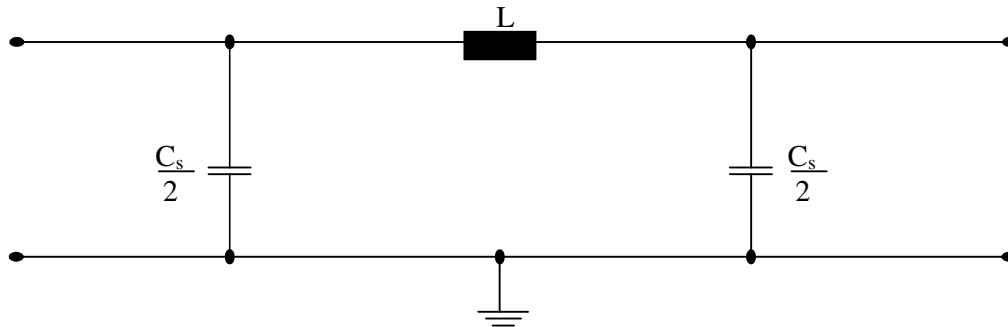
$$\underline{I}_1 = \sinh(\beta l) \frac{\underline{U}_2}{Z_c} + \cosh(\beta l) \underline{I}_2$$

Este cunoscut faptul că în practică nu pot fi realizate linii fără pierderi; cu toate acestea simplificările anterioare sunt cu atât mai utilizate cu cât nivelul de tensiune este mai mare.

Pentru studiul funcționării în regim staționar este suficientă utilizarea unuia sau mai multor elemente  $\Pi$ . În acest caz se utilizează cantitățile specifice. Simplificarea este suficient de exactă pentru lungimile de linii utilizate în prezent în practică.

În calculele simplificate, care nu sunt utilizate pentru evaluări cantitative, liniile electrice de înaltă și foarte înaltă tensiune pot fi modelate doar printr-o inductanță și o capacitate, ca în figura de mai jos.

Această schemă echivalentă este suficientă pentru a pune în evidență caracteristicile de bază ale unei linii în funcțiune. Pentru considerații suplimentare (ex. determinarea randamentului) trebuie luată în considerație cel puțin rezistența echivalentă.



Schema echivalentă monofazată a unei linii electrice trifazate fără pierderi

## 5.5. Caracteristici de funcționare ale liniilor electrice

Studiul caracteristicilor de funcționare ale unei linii electrice se poate limita la următoarele trei cazuri:

### Funcționarea în gol

Această situație apare dacă la unul din capetele liniei tensiunea are valoarea nominală, în timp ce la celălalt capăt nu este conectată nici o sarcină (în gol) - ex. datorită apariției unui defect la consumatorul conectat.

În anumite condiții, tensiunea la capătul deschis al liniei poate să crească peste valorile admise datorită capacității liniei. Acest fenomen se numește *efect Ferranti* și reprezintă o

situație periculoasă în cazul liniilor electrice lungi, care ar trebui protejate de sistemul de protecție al rețelei. Într-o formă mai ușoară, efectul Ferranti poate deasemenea să apară când rețeaua alimentează o sarcină mică (ex. încărcarea de noapte).

### **Linii funcționând doar cu putere activă, egală cu puterea naturală (cu sarcină naturală)**

Această situație apare când la linia electrică este conectat o sarcină rezistivă cu rezistența egală cu valoarea impedanței caracteristice. Puterea transmisă în acest caz se numește *putere naturală a liniei* și se definește:

$$P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_c}$$

Curentul prin linie este suficient de mare ca puterea reactivă consumată de inductanța liniei să fie anulată de cea generată de capacitatea liniei; linia electrică nu absoarbe astfel în cadrul funcționării putere reactivă din exterior (se autocompensează). Cum în acest caz, pierderile de putere activă în liniile electrice reale sunt minime, poate fi privit ca o situație optimă. Trebuie ținut însă cont că sarcina într-un sistem se modifică permanent, conform performanțelor consumatorilor. De aceea, funcționarea fără pierderi poate apărea doar aleator. Modificarea curentului într-o linie electrică duce la dezechilibrarea bilanțului de putere reactivă. Pentru valori mici ale curentului, linia se comportă capacitiv, în timp ce la creșterea curentului linia capătă caracteristici inductive.

În ambele cazuri, în liniile electrice reale, pierderile de putere activă cresc. Dacă tensiunea la începutul liniei este menținută constantă, la sfârșitul liniei se poate înregistra o creștere a tensiunii la o încărcare ușoară (ex. caz limită - funcționarea în gol). Tensiunea la capătul liniei cade pentru sarcini severe (ex. caz limită - scurt-circuite).

Pentru garantarea unei tensiuni constante la consumator în cazul modificării sarcinilor din rețea, este necesar reglajul tensiunii la transformatoarele din stații.

Capacitatea de încărcare a liniilor electrice aeriene (ex. valoarea limită termică) este semnificativ mai mare decât puterea naturală ( $P > P_{nat}$ ). În practică, LEA sunt de cele mai multe ori supraîncărcate.

Pe de altă parte însă, cablurile de înaltă tensiune au de obicei o limită termică mai mică decât puterea naturală. De aceea este posibilă doar o funcționare subîncărcată ( $P < P_{nat}$ ).

### **Scurt-circuite**

În acest caz, impedanța consumatorului este scurt-circuitată de un defect (metalic sau prin arc) astfel încât curentul prin linie crește foarte mult. Trebuie făcută o distincție clară între scurt-circuitele simetrice (trifazate) și cele nesimetrice (mono- sau bifazate). Doar scurt-circuitele trifazate pot fi reprezentate cu ajutorul schemelor echivalente monofilare. De aceea, doar aceste tipuri de defecte pot fi examinate în următorul experiment. La apariția unui scurt-circuit, puterea transmisă este în general mult mai mare decât limita termică a liniei electrice. Condițiile de defect trebuie sesizate de dispozitivele de protecție ale rețelei și înlăturate în cel mai scurt timp posibil.