

## 7. IZOLAȚIA INSTALAȚIILOR ELECTROENERGETICE

### 7.1. Noțiuni introductive

#### 7.1.1. Funcțiile izolației electrice

Izolația instalațiilor electroenergetice are următoarele **funcții**:

- **limitează intensitatea curentului** care circulă între conductoare aflate la potențiale diferite, respectiv realizează **izolarea căilor de curent** față de pământ și între faze;
- asigură **stabilitatea mecanică** (poziția) a căilor de curent;
- permite **transferul căldurii** degajate în conductoare și circuitele magnetice către mediul ambiant.

#### 7.1.2. Solicitățile izolației electrice

**Solicitățile izolației** în exploatare sunt numeroase și simultane:

- **electrice**, prin tensiunea de serviciu și supratensiuni;
- **mecanice** prin sarcini gravitaționale, vânt și forțe electrodinamice;
- **termice** prin căldura transferată de la conductoare sau generată prin pierderi dielectrice în volumul izolației;
- **chimice** prin agenți interni proveniți din descompunere termică a materialelor izolante;
- **precipitații și poluare** din partea unor surse naturale sau artificiale.

#### 7.1.3. Configurația izolației

Izolația unei linii sau a unui echipament trifazat are o structură adeseori complexă. Din punctul de vedere al structurii construcțiilor izolante, se pot delimita componentele:

- a) **izolația transversală** între două căi de curent aflate la potențiale diferite: între fiecare dintre cele 3 faze și pământ, între faze două-câte două, între înfășurările de transformator de pe aceeași fază, între liniile care se intersectează etc.;
- b) **izolația longitudinală** între două puncte ale aceleași căi de curent aflate la potențiale diferite: între bornele aceleași faze ale unui întrerupător sau separator deschis, izolația dintre spirele sau dintre galeții unei înfășurări de transformator, pe aceeași fază, etc .

În funcție de solicitări și de consecințele descărcărilor electrice, se deosebesc:

- **izolație externă** = distanțe izolante în aer și de-a lungul unor suprafețe izolante solide în contact cu atmosfera și care este supusă solicitărilor electrice, poluării, umidității. Este, în general, **autoregeneratoare**, refăcându-și calitățile integral după suportarea unei descărcări electrice.
- **Izolație internă** = materiale izolante solide și distanțe izolante în lichide sau gaze, protejată față de influența condițiilor atmosferice și poluării. Este, în

general, **neautoregeneratoare** pentru că își reduce sau își pierde total proprietățile izolante după o conturnare sau o străpungere.

## 7.2. IZOLAȚIA LINIILOR ELECTRICE AERIENE

### 7.2.1. Structura izolației LEA

Izolația LEA este formată din:

- distanțe de aer între conductoare, față de stâlpi și față de pământ;
- izolatoare de suspensie (sau susținere) și întindere.

**Distanțele izolante** între conductoare și față de stâlpi pot fi asimilate, din punct de vedere al comportării față de solicitările cu tensiune de diferite forme și durate, cu intervale disruptive **vârf-vârf**. Distanțele izolante dintre conductoare și pământ se comportă precum intervalele disruptive **vârf-placă**. Totuși, configurația reală a intervalelor disruptive fiind diferită de aceea a intervalelor standard menționate, se ține seama de acest fapt prin **factorul de interval**.

Acesta reprezintă raportul dintre tensiunea disruptivă a intervalului real și aceea a intervalului vârf-placă cu aceeași distanță dintre electrozi. De exemplu, pentru supratensiuni de comutație, factorul de interval fază-stâlp la linii de 400 kV este cca. 1,22.

Dimensionarea distanțelor disruptive pentru liniile aeriene de foarte înaltă tensiune se realizează pe baza nivelului probabil al supratensiunilor de comutație, determinat prin studii asistate de programe de calcul.

Rezultatul se verifică la supratensiuni de trăsnet prin determinarea numărului specific de deconectări, ținând seama de indicele keraunic al zonei prin care trece linia ca și de rezistivitatea solului.

**Izolatoarele de suspensie, susținere sau de întindere** sunt realizate fie sub formă de lanțuri de izolatoare fie din unul sau mai multe izolatoare tijă. Oricare ar fi construcția lor, repartiția tensiunii de-alungul izolatoarelor este neuniformă, cu atât mai mult cu cât lungimea lor este mai mare. Solicitarea longitudinală neuniformă a izolatoarelor devine dăunătoare în cazul tensiunilor înalte și foarte înalte, determinând creșterea lungimii izolatorului pentru a reduce solicitarea zonelor cele mai expuse până sub limita acceptabilă. Pentru a evita creșterea excesivă a lungimii izolatoarelor, se poate recurge la mijloace constructive care să atenueze neuniformitatea repartiției, chiar și cu consecința creșterii greutateii suspendate de stâlpi sau a creșterii distanțelor dintre faze sau dintre faze și stâlpi.

### 7.2.2. Repartiția tensiunii de serviciu pe lanțurile de izolatoare

Analiza repartiției tensiunii pe lanțurile de izolatoare poate fi efectuată luând în considerare o schemă echivalentă (fig.7.1), care conține capacitățile proprii ale izolatoarelor (**C**), capacitățile parazite între izolatoare și stâlpul legat la pământ (**C<sub>1</sub>**) și capacitățile parazite între izolatoare și conductor, inclusiv armăturile atașate (**C<sub>2</sub>**). Ultimele două sunt numite capacități parazite, deoarece apar în mod natural datorită amplasării izolatoarelor pe stâlpi și nu pot fi evitate.

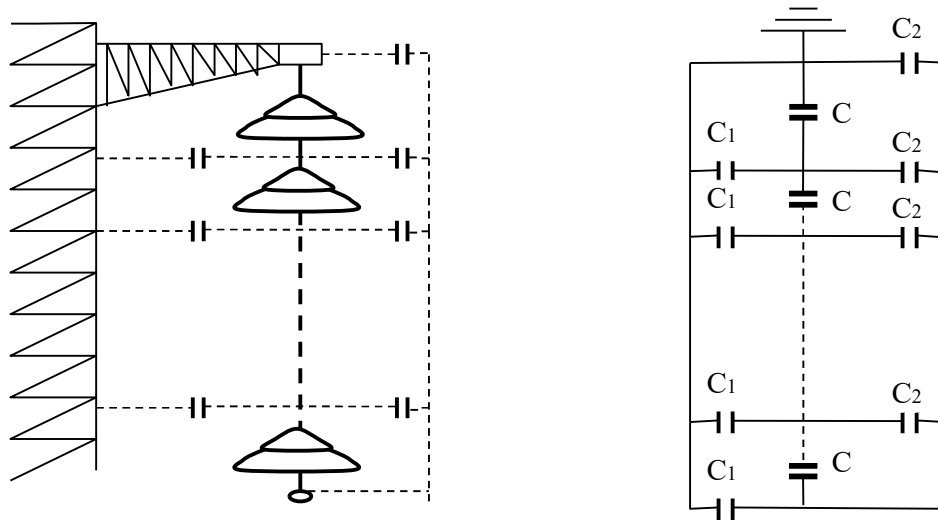


Fig.7.1 – Schema echivalentă a lanțului de izolatoare de suspensie

Prezența capacităților parazite este cauza repartiției neuniforme a tensiunii de-a lungul lanțului de izolatoare.

Considerând schema echivalentă a lanțului de izolatoare ca un circuit cu parametri uniform distribuți (fig.7.2), se pot scrie ecuațiile corespunzătoare elementului de lungime  $dx$  :

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u + \frac{1}{C} \int idt = 0; \quad (1) \quad i + i_2 = i_1 + i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \quad (2)$$

$$i_1 = C_1 dx \frac{\partial u}{\partial t}; \quad (3) \quad i_2 = C_2 dx \frac{\partial}{\partial t} (U_0 - u) \quad (4)$$

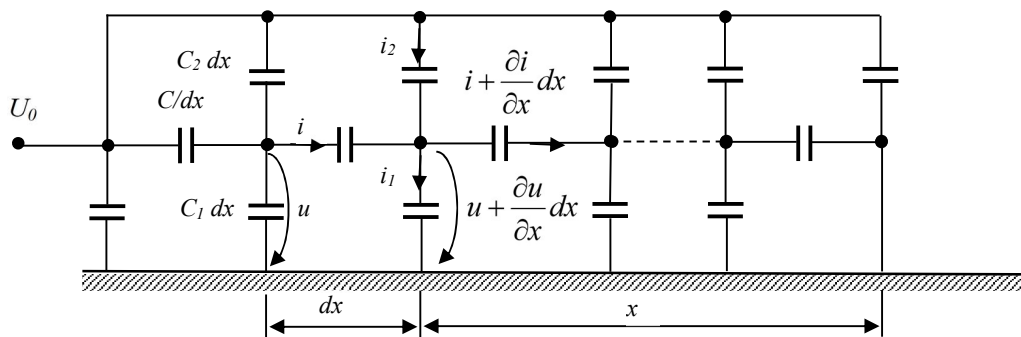


Fig.7.2 – Schema echivalentă de calcul

După reduceri și simplificări, se obține:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{C} \int idt; \quad (5)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} dx = i_2 - i_1 = C_2 dx \frac{\partial U_0}{\partial t} - (C_1 + C_2) \frac{\partial u}{\partial t} dx. \quad (6)$$

Prin derivare dublă în raport cu  $t$  și cu  $x$  a ecuației (5), se obține

$$\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} = -\frac{1}{C} \frac{\partial i}{\partial x}. \quad (7)$$

Folosind ecuația (6), rezultă

$$\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} = -\frac{C_2}{C} \frac{\partial U_0}{\partial t} + \frac{C_1 + C_2}{C} \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (8)$$

Integrând (7) o dată, în raport cu  $t$ , se obține

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{C_2}{C} U_0 + \frac{C_1 + C_2}{C} u. \quad (9)$$

Această ecuație poate fi scrisă cu derivate totale deoarece, prin dispariția variabilei timp rezultă că repartiția tensiunii este funcție numai de coordonata  $x$ :

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{C_1 + C_2}{C} u + \frac{C_2}{C} U_0 = 0. \quad (10)$$

Soluția ecuației (10) se poate scrie sub forma

$$u(x) = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x} + D \quad (11)$$

$$\text{unde} \quad \alpha^2 = \frac{C_1 + C_2}{C}. \quad (12)$$

Determinarea constantelor  $A$ ,  $B$ ,  $D$  necesită folosirea condițiilor la limită, referitoare la aplicarea tensiunii pe lanțul de izolare:

- $x=0, u=0$ ;
- $x=l, u = U_0$ .

O a treia condiție se obține printr-un artificiu de calcul. Astfel, dacă se derivează soluția propusă (11) de două ori în raport cu  $x$ , se obține:

$$\frac{du}{dx} = \alpha A e^{\alpha x} - \alpha B e^{-\alpha x} \quad (13)$$

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \alpha^2 A e^{\alpha x} + \alpha^2 B e^{-\alpha x} = \alpha^2 [u(x) - D]. \quad (14)$$

Folosind ecuația diferențială finală (14) și ținând seama de expresia (12) a lui  $\alpha$ , se obține mai întâi expresia pentru  $D$ :

$$\alpha^2 [u(x) - D] = \frac{C_1 + C_2}{C} u - \frac{C_2}{C} U_0. \quad (15)$$

$$\alpha^2 u(x) - \alpha^2 D = \alpha^2 u(x) - \frac{C_2}{C} U_0. \quad (16)$$

$$D = \frac{C_2}{C} \frac{C}{C_1 + C_2} U_0 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U_0. \quad (17)$$

Urmează determinarea constantelor  $A$  și  $B$ , prin aplicarea condițiilor la limită soluției (11). Rezultă sistemul de ecuații:

$$\begin{aligned} 0 &= A + B + D \\ U_0 &= Ae^{\alpha l} + Be^{-\alpha l} + D \end{aligned} \quad (18)$$

sau

$$\begin{aligned} A + B &= -\frac{C_2}{C_1 + C_2} U_0 \\ Ae^{\alpha l} + Be^{-\alpha l} &= U_0 - \frac{C_2}{C_1 + C_2} U_0 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 \end{aligned} \quad (19)$$

Se rezolvă sistemul de ecuații prin metoda determinanților. Determinantul sistemului este:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ e^{\alpha l} & e^{-\alpha l} \end{vmatrix} = e^{-\alpha l} - e^{\alpha l}. \quad (20)$$

Determinantul corespunzător necunoscutei **A** este

$$\begin{vmatrix} -\frac{C_2}{C_1 + C_2} U_0 & 1 \\ \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 & e^{-\alpha l} \end{vmatrix} = -\frac{U_0}{C_1 + C_2} (C_1 + C_2 e^{-\alpha l}). \quad (21)$$

Determinantul corespunzător necunoscutei **B** este

$$\begin{vmatrix} 1 & -\frac{C_2}{C_1 + C_2} U_0 \\ e^{\alpha l} & \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 \end{vmatrix} = \frac{U_0}{C_1 + C_2} (C_1 + C_2 e^{\alpha l}). \quad (22)$$

Rezultă constantele **A** și **B**

$$A = -\frac{U_0}{C_1 + C_2} (C_1 + C_2 e^{-\alpha l}) \frac{1}{e^{-\alpha l} - e^{\alpha l}} = \frac{U_0}{C_1 + C_2} \frac{C_1 + C_2 e^{-\alpha l}}{2sh\alpha l}. \quad (23)$$

$$B = \frac{U_0}{C_1 + C_2} (C_1 + C_2 e^{\alpha l}) \frac{1}{e^{-\alpha l} - e^{\alpha l}} = -\frac{U_0}{C_1 + C_2} \frac{C_1 + C_2 e^{\alpha l}}{2sh\alpha l}. \quad (24)$$

Prin înlocuirea constantelor obținute în expresia soluției **u(x)**, rezultă

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{U_0}{(C_1 + C_2)2sh\alpha l} (C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{\alpha x - \alpha l} - C_1 e^{-\alpha x} - C_2 e^{-\alpha x + \alpha l} + C_2 2sh\alpha l) \\ u(x) &= \frac{U_0}{(C_1 + C_2)2sh\alpha l} [C_2 2sh\alpha l + C_1 2sh\alpha x - C_2 2sh\alpha(l - x)]. \end{aligned}$$

În final

$$u(x) = \frac{U_0}{C_1 + C_2} \left[ C_2 + C_1 \frac{sh\alpha x}{sh\alpha l} - C_2 \frac{sh\alpha(l - x)}{sh\alpha l} \right]. \quad (25)$$

În cazul lanțurilor cu număr cunoscut de izolatoare, tensiunea în nodurile dintre două izolatoare succesive se obține înlocuind  $x_i = i \frac{l}{n}$ , unde  $i$  este numărul de ordine al izolatorului începând de la capătul legat la consolă. Căderea de tensiune pe izolatorul  $i$  rezultă din diferența

$$\Delta u_i = u(x_i) - u(x_{i-1}).$$

Reprezentarea grafică a funcțiilor  $u(x)$  și  $\Delta u(x)$  este dată în fig.7.3 pentru un lanț format din 7 izolatoare (pentru tensiunea de 110 kV).

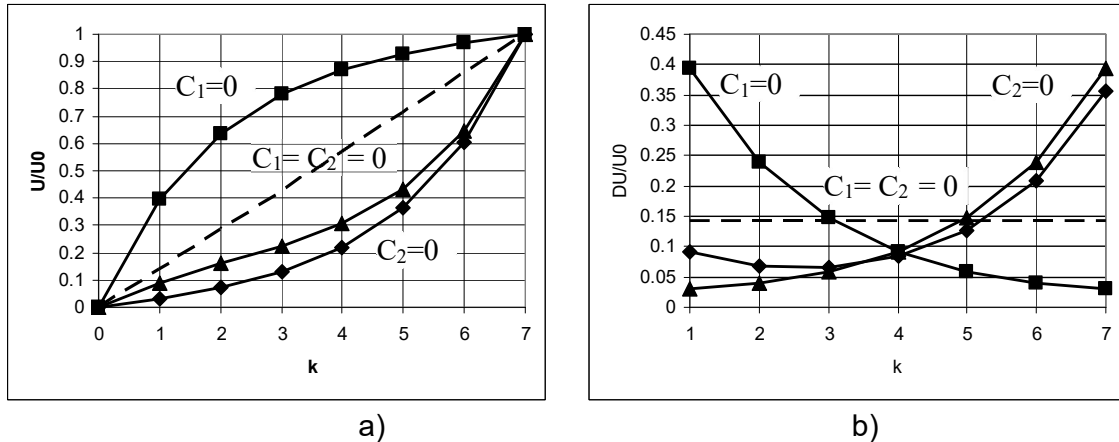


Fig.7.3 – Repartiția tensiunii de-a lungul lanțului de izolatoare(a) și solicitarea izolatoarelor din lanț (b)

Solicitarea maximă a izolatoarelor din lanț apare pe primul izolator (de lângă conductor). Ca urmare, poate apărea descărcarea corona și pericolul de inițiere a conturnării lanțului de izolatoare.

### 7.2.3. Metode de uniformizare a repartiției tensiunii pe izolatoarele LEA

Teoretic, repartiția tensiunii este uniformă dacă  $\alpha = 0$ , adică  $C_1 = C_2 = 0$ , ceea ce este imposibil de obținut practic.

Singura metodă de uniformizare care poate fi aplicată la construcția LEA este folosirea unor armături metalice inelare atașate la extremitățile lanțului de izolatoare. Forma acestor armături poate fi circulară sau ovală, așezate cu axa mare de-a lungul conductorului.

Prezența armăturii la capătul dinspre conductor produce creșterea mărimii capacității parazite față de conductor în acea zonă și, ca urmare, se reduce căderea de tensiune pe primele izolatoare de lângă conductor, mai ales pe primul izolator (cel mai solicitat). Dimensiunile acestor armături sunt limitate pentru a nu fi necesară creșterea excesivă a distanțelor dintre conductoare și stâlp sau dintre faze.

## 7.3. IZOLAȚIA LINIILOR ELECTRICE SUBTERANE

### 7.3.1. Structura izolației cablurilor de înaltă tensiune

Cablurile de medie tensiune, până la 20 kV, sunt realizate în structură trifazată, cu un ecran metalic comun celor trei faze. Conductoarele au formă de sector de cerc astfel că la vârfuri intensitatea câmpului electric este mai mare. O astfel de structură este mai compactă și poate fi admisă chiar dacă intensitatea câmpului electric în izolație este neuniformă, deoarece nivelul tensiunii este destul de coborât, astfel că solicitarea materialului izolant nu este excesivă. Grosimea izolației fazelor acestor cabluri se alege din motive de rezistență la solicitările mecanice.

Pentru  $U_m \geq 20$  kV se folosește numai construcția monofazată, forma conductorului fiind cilindrică sau chiar tubulară dacă cablul este răcit forțat cu ulei. Conductorul cilindric și ecranul metalic, tot cilindric, formează un ansamblu de electrozi coaxiali între care apare un câmp electric radial, slab neuniform. O astfel de structură este favorabilă prin solicitarea electrică mult mai uniformă a materialului izolant.

În privința materialelor izolante, se disting două categorii:

- hârtie impregnată cu ulei;
- polimeri precum policlorura de vinil și polietilena.

În cazul izolației de hârtie, prezența uleiului de impregnare este esențială pentru menținerea proprietăților izolante. Uleiul elimină aerul dintre straturi ca și din porii hârtiei, ceea ce împiedică formarea descărcărilor parțiale.

Pentru păstrarea conținutului de ulei, ecranul cablului trebuie să fie etanș. Materialul adecvat pentru acest scop este Pb, deoarece rezistă bine la îndoire fără fisurare. Ecranul realizat din Pb este denumit manta. Mantaua etanșă din Pb asigură și protecția împotriva umidității, factor deosebit de nociv pentru izolația hârtie-ulei.

Izolația din polimeri, fiind compactă, este mai puțin sensibilă la prezența umidității astfel că nu se impune existența unui înveliș etanș. Ecranul se poate realiza din bandă de cupru sau din conductoare de cupru așezate elicoidal peste izolație.

### 7.3.2. Dimensionarea electrică a izolației cablurilor de înaltă tensiune

Izolația trebuie să poată suporta solicitările electrice, mecanice și termice corespunzătoare tensiunii de serviciu, sarcinii tranzitate și modului de amplasare a cablului. Până la tensiuni de serviciu de 20 kV, importanța preponderentă o are solicitarea mecanică, iar pentru tensiuni mai mari solicitările electrice devin cele mai importante pentru dimensionarea izolației.

Din punct de vedere electric, criteriul de dimensionare îl constituie valoarea admisibilă a intensității câmpului electric în materialul izolant. Aceasta depinde de mărimea tensiunii, de geometria sistemului de electrozi și de natura materialului izolant.

Considerând cazul unui cablu monofazat, cilindric coaxial, intensitatea maximă a câmpului electric apare la suprafața conductorului, scăzând către ecran (fig.7.4).

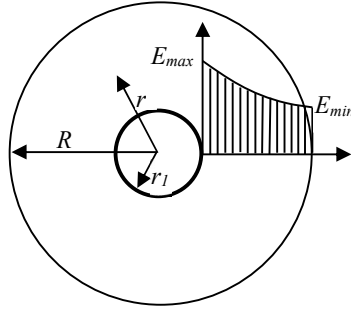


Fig. 7.4-Câmpul electric în izolația omogenă a unui cablu cilindric

Expresiile de calcul ale intensităților maximă și minimă ale câmpului electric în izolația cablului cu izolație omogenă sunt:

$$E_{max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{R}{r_1}} \quad E_{min} = \frac{U}{R \ln \frac{R}{r_1}}, \quad (26)$$

astfel încât raportul acestora este

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{R}{r_1}. \quad (27)$$

Dimensionarea izolației se reduce, în acest caz, la determinarea razei exterioare  $R$ , deoarece raza conductorului este aleasă pe criteriul sarcinii admisibile. Considerând intensitatea maximă a câmpului electric

$$E_{max} = E_{ad} \quad (27)$$

corespunzătoare materialului izolant folosit, se poate calcula mărimea  $R$ :

$$E_{ad} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{R}{r_1}}, \quad \ln \frac{R}{r_1} = \frac{U}{r_1 E_{ad}}, \quad R = r_1 e^{\frac{U}{r_1 E_{ad}}} \quad (29)$$

Rezultă astfel o creștere exponențială a razei exterioare a stratului de material izolant în funcție de tensiunea de serviciu. Aceasta are dezavantajele unui volum mai mare de material izolant cu cât tensiunea este mai mare și a solicitării din ce în ce mai reduse a materialului către exterior (intensitatea câmpului electric devine minimă la suprafața externă a izolației).

Corectarea acestei situații se poate obține prin folosirea izolației neomogene, formată din mai multe straturi concentrice, fiecare din alt material izolant.

Se consideră exemplul din fig.7.5, în care izolația este formată din două straturi.

Acestei structuri îi corespunde o schemă electrică echivalentă formată din două condensatoare înseriate, pe care tensiunea aplicată se repartizează invers proporțional cu capacitățile condensatoarelor (fig.7.6):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}. \quad (30)$$



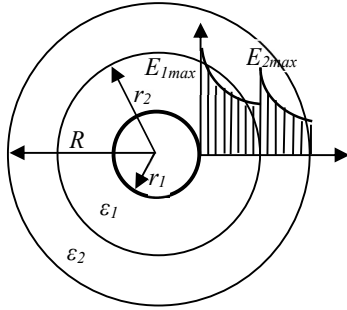


Fig.7.5 – Izolație neomogenă cu două straturi

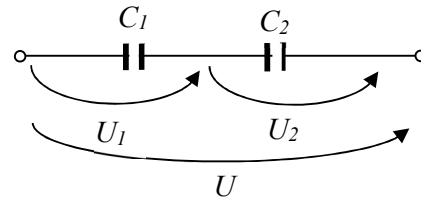


Fig.7.6 – Schema echivalentă a izolației neomogene

Capacitățile celor două straturi de izolație, pe unitatea de lungime a cablului pot fi scrise:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln \frac{R}{r_2}} \quad (31)$$

Intensitățile maxime ale câmpului electric, la limitele interioare ale celor două straturi sunt:

$$E_{1max} = \frac{U_1}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad E_{2max} = \frac{U_2}{r_2 \ln \frac{R}{r_2}} \quad (32)$$

Din relațiile (32) rezultă:

$$\frac{E_{1max}}{E_{2max}} = \frac{U_1}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{r_2 \ln \frac{R}{r_2}}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{r_2 \ln \frac{R}{r_2}}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (33)$$

Folosind relațiile (31), se obține:

$$\frac{E_{1max}}{E_{2max}} = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln \frac{R}{r_2}} \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi\epsilon_1} \cdot \frac{r_2 \ln \frac{R}{r_2}}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (34)$$

sau

$$\frac{E_{1max}}{E_{2max}} = \frac{\epsilon_2 r_2}{\epsilon_1 r_1} \quad (35)$$

Cunoscând parametrii electrici ai materialelor izolante folosite ( $E$ ,  $\epsilon$ ), se ajunge la mărimea razei exterioare,  $r_2$ , a primului strat de material izolat.

Dacă, de exemplu se impune condiția:

$$E_{1max} = E_{2max}, \quad (36)$$

rezultă

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2 \quad (37)$$

Deoarece este evident că  $r_2 > r_1$  rezultă  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ . Așadar straturile de material izolant trebuie să aibă permitivitate descrescătoare de la conductor către ecran, dacă se impune condiția (36).

### 7.3.3. Uniformizarea câmpului electric în izolația cablurilor

Cu cât gradul de neuniformitate al câmpului electric este mai mare, cu atât este nevoie de o grosime mai mare a materialului izolant, care astfel devine tot mai slab folosit. Din acest motiv, cu cât crește tensiunea nominală, în primul rând se renunță la forma de sector de cerc a conductoarelor, deși aceasta permite o construcție mai compactă a cablului trifazat.

Conductoarele cilindrice permit realizarea unui câmp electric slab neuniform, mult mai avantajos pentru reducerea grosimii izolației. Totuși conductoarele nu pot fi perfect cilindrice (monofilare) pentru că ar fi prea rigide și se pot fisura dacă cablul este curbat. Conductoarele cablurilor sunt de tip funie sau, în cazul cablurilor răcite forțat cu ulei, de tip tubular, realizate prin îmbinarea elicoidală a unor conductoare profilate astfel încât ansamblul să fie etanș la ulei. În ambele situații suprafața conductorului prezintă muchii care provoacă intensificarea locală a câmpului electric.

Pentru anularea acestui efect, între conductorul cablului și izolație se așează un strat flexibil dintr-un material cu conducție electrică mică, dar suficientă pentru a realiza o suprafață echipotențială. Acest strat poate fi hârtie sau bandă textilă impregnată cu grafit sau polimer cu filer grafit. Stratul respectiv este numit „**strat semiconductor**” în sensul unei conductivități reduse, dar controlate. Conductivitatea limitată este necesară pentru a limita intensitatea curentului care circulă prin acest strat, de-alungul cablului.

Suprafața exterioară a stratului izolant poate avea, de asemenea, abateri de la forma cilindrică datorită unor deformări mecanice în timpul fabricării. De asemenea, contactul între materialul izolant și ecranul metalic poate fi numai parțial (mai ales în cazul realizării ecranului din sârmă), formându-se cavități de aer sau gaze, expuse formării descărcărilor parțiale. Pentru evitarea unei asemenea situații, se așează un strat „semiconductor” și peste izolație. Acest strat având peste tot același potențial ca și ecranul, în posibilele cavități nu mai pot apărea descărcări electrice.

## 7.4. IZOLAȚIA TRANSFORMATOARELOR

### 7.4.1. Introducere

Izolația transformatoarelor cu două sau trei înfășurări, monofazate sau trifazate are o structură complexă, fiind formată din materiale diferite, aflate în zone cu intensitate diferită a câmpului electric și supuse unor solicitări multiple și simultane: electrice, termice mecanice, chimice.

Soluția clasică de realizare a izolației transformatoarelor constă în utilizarea hârtiei impregnate cu ulei, denumită „izolație hârtie-ulei”. Astfel cilindrii suport pentru bobinaje sunt realizați fie din hârtie impregnată cu lac de bachelită, fie din carton

special pentru transformatoare, „trafo-board”. La capetele bobinajelor se află alte piese izolante din același carton, în formă de cilindru cu un rebord circular și care servește pentru izolarea bobinajului față de jugul circuitului magnetic.

Izolația conductoarelor este realizată fie din hârtie înfășurată în mai multe straturi, fie din lac și fire de bumbac. Între cilindrii suport ai înfășurărilor și miezul magnetic ca și între spirele bobinajelor și între acestea și cuvă există spații destinate circulației uleiului, care asigură simultan izolarea electrică și răcirea înfășurărilor și a miezului.

Există și se extinde și soluția transformatoarelor „uscate”, a căror izolație este realizată exclusiv din materiale solide, nemaifiind necesară cuva metalică. Utilizarea acestora este limitată la domeniul de „medie tensiune” și la puteri relativ reduse. Protejarea față de umiditatea atmosferică se asigură cu lacuri rezistente, iar răcirea se face numai natural, cu aer. Dimensiunile acestor transformatoare sunt, comparativ cu acelea cu ulei, mai mari din motive de răcire eficientă.

Izolația unui transformator trifazat cu două înfășurări, cuprinde trei zone principale:

- izolația dintre înfășurarea de înaltă tensiune și cuvă;
- izolația dintre înfășurarea de joasă tensiune și cuvă;
- izolația dintre înfășurări.

Izolația fiecărei înfășurări poate fi, la rândul ei, divizată în două componente:

- izolație transversală, respectiv între bobinaj și miez sau cealaltă înfășurare;
- izolație longitudinală, respectiv între spirele aceluiasi bobinaj.

Relativ la solicitările electrice ale înfășurărilor de transformator, deosebit interes prezintă solicitarea cu tensiune de impuls, prin supratensiuni de trăsnet sau de comutație. Datorită vitezei mari de variație a tensiunii aplicate, solicitarea izolației are loc în mod diferit față de regimul permanent sinusoidal, ceea ce are consecințe importante asupra dimensionării și structurii construcției izolante.

#### **7.4.2. Solicitarea izolației unei înfășurări de transformator cu tensiune de impuls**

Schema echivalentă pentru analiza comportării la tensiune de impuls a unui transformator trifazat este deosebit de complexă, astfel încât, foarte frecvent, se recurge la modelarea monofazată. Teoretic, acest model este valabil, pentru că influențele dintre înfășurări datorate circuitului magnetic sunt foarte reduse, având în vedere rapiditatea variației tensiunilor de impuls. Mai mult, se poate renunța, pentru claritate, la considerarea înfășurării secundare, întrucât principalele solicitări apar în înfășurarea supusă tensiunii de impuls.

Se propune astfel, schema echivalentă din fig.7.7, obținută pe baza următoarelor ipoteze:

- schema este un circuit cu parametri uniform distribuiți;
- se neglijează prezența circuitului magnetic și a înfășurării secundare;
- se neglijează rezistența conductorului de bobinaj;
- tensiunea aplicată este de forma impulsului treaptă.

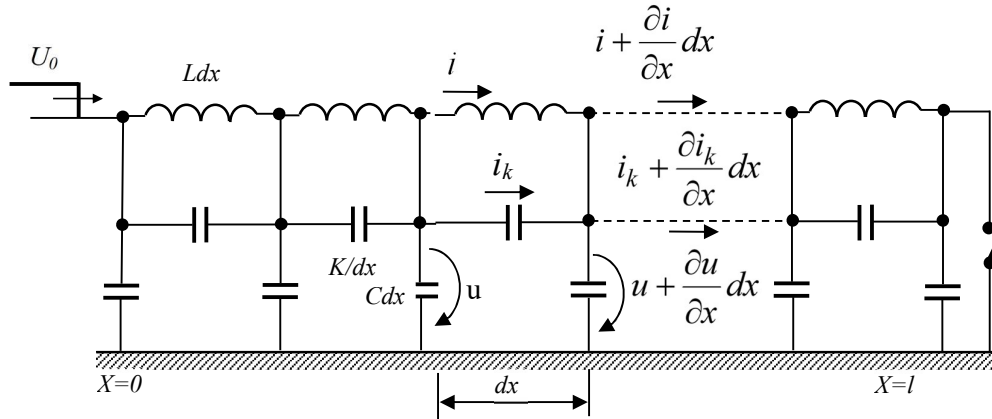


Fig.7.7-Schema echivalentă a înfășurării monofazate de transformator:  
 $L$ -inductanța bobinajului,  $K$ -capacitatea longitudinală,  $C$ -capacitatea transversală. Toți parametrii se referă la unitatea de lungime a înfășurării.

Pentru elementul de bobinaj cu lungimea  $dx$  sunt valabile ecuațiile:

$$\begin{aligned}
 u - \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) &= L dx \frac{\partial i}{\partial t} \\
 i_k &= \frac{K}{dx} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[ u - \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \right] \\
 i + i_k &= i + \frac{\partial i}{\partial x} dx + i_k + \frac{\partial i_k}{\partial x} dx + C dx \frac{\partial u}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{37}$$

După reducerea termenilor asemenea și simplificare cu  $dx$ , se obține:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial x} &= -L \frac{\partial i}{\partial t} \\
 i_k &= -K \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \\
 \frac{\partial i}{\partial x} + \frac{\partial i_k}{\partial x} &= -C \frac{\partial u}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{39}$$

Pentru rezolvarea acestui sistem de ecuații cu derivate parțiale, se folosește calculul operațional (transformarea Laplace). Sistemul de ecuații devine:

$$\begin{aligned}
 \frac{dU}{dx} &= -LsI \\
 I_k &= -Ks \frac{dU}{dx} \\
 \frac{dI}{dx} + \frac{dI_k}{dx} &= -CsU
 \end{aligned} \tag{40}$$

Prin derivarea, în raport cu  $x$  a primelor două ecuații din (40), rezultă:

$$\frac{dl}{dx} = -\frac{1}{Ls} \frac{d^2U}{dx^2} \quad (41)$$

$$\frac{dl_k}{dx} = -Ks \frac{d^2U}{dx^2}$$

Înlocuind aceste rezultate în ultima ecuație (40), se obține:

$$\left( -\frac{1}{Ls} - Ks \right) \frac{d^2U}{dx^2} = -CsU \quad (42)$$

Ecuația (42) se transformă succesiv în:

$$\frac{d^2U}{dx^2} - \frac{Cs}{\frac{1}{Ls} + Ks} U = 0; \quad \frac{d^2U}{dx^2} - \gamma^2 U = 0; \quad (43)$$

cu

$$\gamma^2 = \frac{LCs^2}{1 + LKs^2}$$

Soluția ecuației (43) se poate scrie sub forma:

$$U(x, s) = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (44)$$

Constantele de integrare **A** și **B** se determină din condițiile la limită privind tensiunea de-a lungul înfășurării. Acestea diferă în funcție de modul de tratare a sfârșitului înfășurării și de forma tensiunii aplicate.

Se mai consideră că tensiunea aplicată este de formă treaptă cu amplitudinea **U<sub>0</sub>**, iar sfârșitul înfășurării poate fi legat la pământ sau izolat.

#### a) sfârșitul înfășurării legat la pământ

Condițiile la limită pentru acest caz sunt:

- $x=0, u=U_0, U=U_0/s;$
- $x=l, u=0, U=0;$

Aplicând aceste condiții soluției (44), se obține:

$$\frac{U_0}{s} = A + B$$

$$0 = Ae^{\gamma l} + Be^{-\gamma l}$$

Folosind metoda de rezolvare prin substituție, se obține succesiv:

$$B = \frac{U_0}{s} - A; \quad 0 = Ae^{\gamma l} + \left( \frac{U_0}{s} - A \right) e^{-\gamma l}; \quad A = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{-\gamma l}}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}}$$

$$B = \frac{U_0}{s} \left( 1 - \frac{e^{-\gamma l}}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}} \right); \quad B = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{-e^{-\gamma l}}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}}$$

Înlocuind expresiile obținute pentru **A** și **B** în soluția (44) se obține:

$$U(x, s) = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{-\gamma l} \cdot e^{\gamma x}}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}} - \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{\gamma l} \cdot e^{-\gamma x}}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}} = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{\gamma(l-x)} - e^{-\gamma(l-x)}}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}.$$

În final, observând forma dezvoltată a funcției **sinhx**, soluția, în operațional este:

$$U(x, s) = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l}. \quad (45)$$

### b) sfârșitul înfășurării izolat

Condițiile la limită pentru acest caz sunt:

- $x=0, u=U_0, U=U_0/s;$
- $x=l, i=0, I=0;$

Pentru aplicarea celei de a doua condiții, se extrage din (40) expresia pentru  $I$ :

$$I = -\frac{1}{Ls} \cdot \frac{dU}{dx} = -\frac{1}{Ls} (\gamma A e^{\gamma l} - \gamma B e^{-\gamma l}) \quad (46)$$

Aplicând condițiile la limită soluției (44) și relației (46), se obține:

$$\frac{U_0}{s} = A + B$$

$$0 = A e^{\gamma l} - B e^{-\gamma l}$$

Folosind metoda de rezolvare prin substituție, se obține succesiv:

$$B = \frac{U_0}{s} - A; \quad A e^{\gamma l} - \frac{U_0}{s} e^{-\gamma l} + A e^{-\gamma l} = 0; \quad A = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}.$$

$$B = \frac{U_0}{s} \left( 1 - \frac{e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}} \right); \quad B = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}.$$

Înlocuind expresiile obținute pentru  $A$  și  $B$  în soluția (44) se obține:

$$U(x, s) = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{-\gamma l} \cdot e^{\gamma x}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}} + \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{\gamma l} \cdot e^{-\gamma x}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}} = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{e^{\gamma(l-x)} + e^{-\gamma(l-x)}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}.$$

În final, observând forma dezvoltată a funcției **coshx**, soluția, în operațional este:

$$U(x, s) = \frac{U_0}{s} \cdot \frac{\cosh \gamma(l-x)}{\cosh \gamma l}. \quad (47)$$

Obținerea funcției original  $u(x, t)$  este dificilă pentru că  $\gamma$  este funcție de  $s$ . Se vor obține aici numai funcțiile  $u(x, 0)$  și  $u(x, \infty)$  valabile respectiv pentru momentele inițial și final ale regimului tranzitoriu în înfășurare.

- **Pentru momentul inițial  $t=0, s \rightarrow \infty$** , astfel încât

$$\gamma^2 = \frac{C}{K} = \alpha^2 \quad (47)$$

Deoarece  $\alpha$  este independent de  $s$ , funcțiile  $u(x, 0)$  se scriu înlocuind  $\gamma$  cu  $\alpha$  în soluțiile (45) și (47) și revenind la forma tensiunii aplicate în domeniul timpului,  $U_0$ :

- $u(x,0) = U_0 \cdot \frac{\sinh \alpha(l-x)}{\sinh \alpha l}$  , pentru sfârșitul înfășurării legat la pământ;
- $u(x,0) = U_0 \cdot \frac{\cosh \alpha(l-x)}{\cosh \alpha l}$  pentru sfârșitul înfășurării izolat.

- **Pentru momentul final  $t \rightarrow \infty$ ,  $s \rightarrow 0$ ,  $\gamma \rightarrow 0$ .**

În cazul înfășurării cu sfârșitul legat la pământ, înlocuind  $\gamma \rightarrow 0$  în soluția (45), se obține o nedeterminare de tipul 0/0. Pentru ridicarea acesteia se aplică regula Hopital:

$$\left[ \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l} \right]_{s=0} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l} \right]' =$$

$$\left[ \frac{(l-x) \cosh \gamma(l-x)}{l \cosh \gamma l} \right]_{s \rightarrow 0} = \frac{l-x}{l}.$$

Astfel

$$U(x,s) = \frac{U_0}{s} \frac{l-x}{l},$$

iar

$$u(x,\infty) = U_0 \frac{l-x}{l}.$$

Dacă înfășurarea are sfârșitul izolat,

$$U(x,\infty) = U_0 \frac{\cosh 0(l-x)}{\cosh 0l} = U_0$$

Așadar, rezultă:

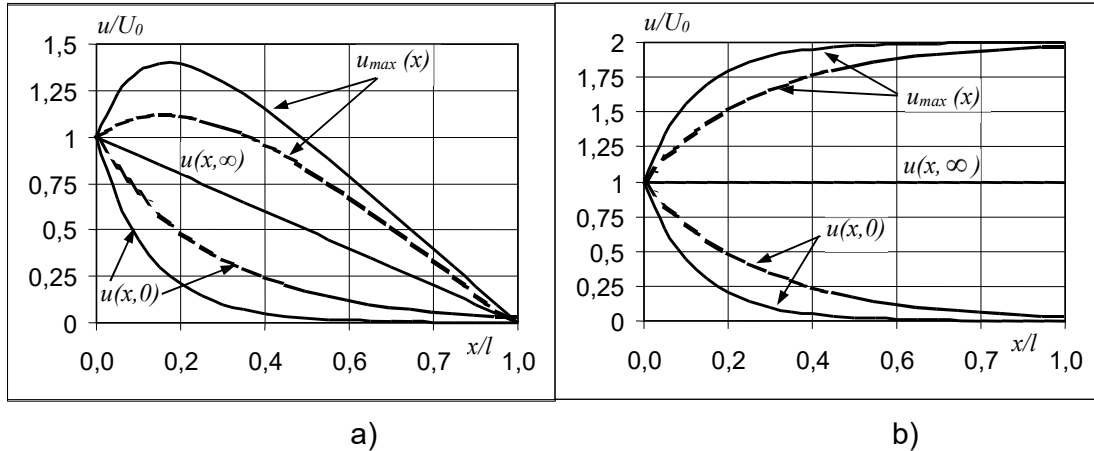
- $u(x,\infty) = U_0 \left( 1 - \frac{x}{l} \right)$  , pentru sfârșitul înfășurării legat la pământ;
- $u(x,\infty) = U_0$  pentru sfârșitul înfășurării izolat.

Analiza rezultatelor obținute pentru repartiția tensiunii de-a lungul înfășurării se poate realiza, în ceea ce privește solicitările izolației, cu ajutorul reprezentărilor grafice din fig.7.8.

Astfel, **solicitarea izolației longitudinale** este proporțională direct cu panta repartiției tensiunii de-alungul înfășurării. Se poate observa că, pentru ambele moduri de tratare a sfârșitului înfășurării, cea mai mare solicitare a izolației longitudinale apare la borna de intrare a impulsului în bobinaj, la momentul inițial al regimului tranzitoriu. La sfârșitul regimului tranzitoriu, solicitarea izolației longitudinale este uniformă dacă sfârșitul înfășurării este legat la pământ și inexistentă dacă sfârșitul înfășurării este izolat.

**Solicitarea izolației transversale** este direct proporțională cu amplitudinea tensiunii care apare în bobinaj în raport cu pământul. Această amplitudine apare în fig.7.8 pe curba valorilor maxime ale oscilațiilor de regim tranzitoriu a tensiunii în înfășurare. Amplitudinea oscilațiilor din regimul tranzitoriu în fiecare punct de pe înfășurare este proporțională cu diferența dintre valorile tensiunii, în punctul respectiv, în momentele inițial și final ale regimului tranzitoriu. Se observă că această solicitare este maximă în prima parte (25-30%) a înfășurării dacă sfârșitul înfășurării este legat

la pământ, dar depășește puțin amplitudinea impulsului aplicat. În cazul înfășurării cu sfârșitul izolat, cele mai mari oscilații apar la sfârșitul bobinajului, având amplitudinea dublă în raport cu amplitudinea impulsului aplicat.

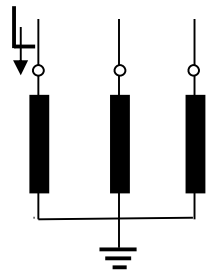


**Fig.7.8** Repartiția tensiunii de impuls pe înfășurarea monofazată de transformator:  
a) înfășurare cu sfârșitul legat la pământ; b) înfășurare cu sfârșitul izolat;  
cu linie plină – înfășurare normală; cu linie întreruptă – înfășurare întretesută

### 7.4.3. Solicitarea izolației transformatoarelor trifazate cu tensiune de impuls

Datorită conexiunilor dintre bobinajele de pe cele trei faze ale înfășurării, solicitarea izolației acestora poate fi diferită față de cazul monofazat așa cum a fost analizat mai sus. Se vor examina situațiile posibile ale conexiunilor trifazate, folosind observațiile anterioare cu privire la solicitarea izolației înfășurărilor monofazate.

#### **Conexiunea stea cu neutrul legat la pământ**



Indiferent dacă impulsul de tensiune se aplică uneia sau mai multor faze ale înfășurării, izolația fazelor respective este solicitată la fel ca în cazul înfășurării monofazate cu sfârșitul legat la pământ. Această conexiune este cea mai favorabilă în privința solicitării izolației cu tensiune de impuls.

#### **Conexiunea în stea cu neutrul izolat**

Această situație se poate întâlni în cazul în care, datorită valorii prea mari a curentului de scurtcircuit monofazat în raport cu curentul de scurtcircuit trifazat, unele puncte neutre ale transformatoarelor existente într-o rețea cu multe surse interconectate se izolează față de pământ, astfel crescând reactanța homopolară de scurtcircuit în rețea. Solicitarea izolației unui astfel de transformator este diferită în funcție de modul de aplicare a impulsului de tensiune: pe una sau pe toate fazele înfășurării.



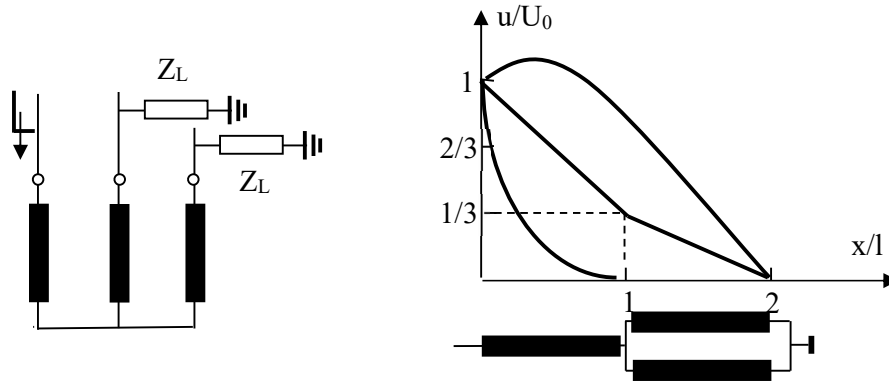
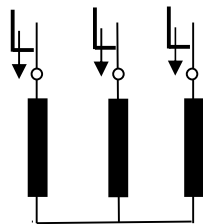


Fig.7.9 – Conexiunea în stea cu neutrul izolat- impuls de tensiune aplicat unei faze

Dacă impulsul de tensiune este aplicat unei faze a înfășurării (fig.7.9) atunci apar solicitări ale izolației și pe celelalte două faze. Deoarece la bornele de linie a acestor două faze este prezentă impedanța caracteristică a liniei aeriene, mult mai mică decât a înfășurării transformatorului, se poate considera că aceste borne sunt legate la pământ. Schema echivalentă a transformatorului devine aceea din partea dreaptă a fig.7.9, astfel că impedanța caracteristică este de două ori mai mică în zona celor două bobinaje conectate în paralel. Repartiția tensiunii pe această schemă arată că solicitarea izolației longitudinale este maximă la intrarea în faza solicitată, iar a izolației transversale, în prima jumătate a aceleiași înfășurări. Din forma repartiției finale a tensiunii rezultă că izolația punctului neutru este supusă unei solicitări egale cu  $\frac{1}{3}$  din amplitudinea impulsului aplicat. Acest rezultat este de importanță practică



pentru construcția transformatoarelor care pot funcționa în acest regim.

Dacă impulsul de tensiune este aplicat simultan celor trei faze, izolația fiecăreia va fi solicitată ca și izolația înfășurării monofazate cu sfârșitul izolat.

### Conexiunea în triunghi

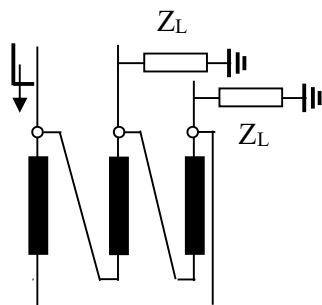


Fig.7.10- Solicitarea pe o fază a înfășurării în triunghi

Și în acest caz solicitarea izolației diferă în funcție de modul de aplicare a impulsului de tensiune.

Dacă impulsul de aplică unei singure faze (fig.7.10), atunci bornele de linie ale celorlalte două faze pot fi considerate ca legate la pământ, dată fiind valoarea mult mai mică a impedanței caracteristice a liniei aeriene comparativ cu aceea a transformatorului. Rezultă că două dintre fazele înfășurării vor fi solicitate la fel ca înfășurările monofazate cu sfârșitul legat la pământ. De observat însă că una dintre faze primește impulsul de tensiune prin borna de început (borna de linie), iar cealaltă prin borna de sfârșit.

Dacă impulsul de tensiune se aplică simultan celor trei faze ale înfășurării (fig.7.11), atunci fiecăreia dintre acestea i se va aplica impulsul simultan la ambele extremități. Ca urmare repartiția

tensiunii pe fiecare fază are același aspect, dar modul de solicitare a izolației este diferit față de cazurile anterioare.

Astfel, solicitarea maximă a izolației longitudinale apare la ambele extremități ale bobinajelor. Izolația transversală este maxim solicitată la mijlocul înfășurării pe fiecare fază. Lucrurile se petrec ca și cum două semi-înfășurări cu sfârșitul izolat ar fi conectate în serie diferențial.

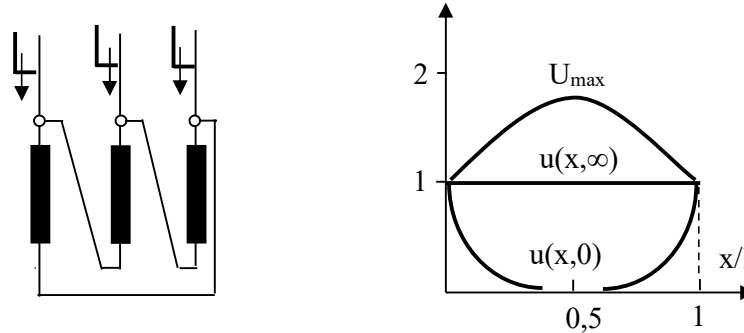


Fig.7.11- Solicitarea cu impuls de tensiune simultan pe toate fazele înfășurării în triunghi

#### 7. 4 Concluzii privind izolația transformatoarelor trifazate

În cazul **conexiunii în stea**, solicitările izolației se reduc de la borna de intrare în înfășurare către neutru. Totuși, borna de neutru nu poate avea nivelul de izolație zero decât dacă transformatorul va funcționa permanent cu neutru legat la pământ. Dacă uneori punctul neutru trebuie izolat (de exemplu pentru reducerea mărimii curentului de scurtcircuit monofazat), atunci nivelul de izolație al punctului neutru trebuie să fie de cel puțin  $\frac{1}{3}$  din nivelul de izolație al bornei de linie. De obicei, în această situație, se protejează izolația punctului neutru cu un descărcător. În ambele situații, nivelul de izolație al înfășurării scade de la borna de linie către neutru. Izolația realizată în acest mod se numește *gradată* sau *degresivă*.

În cazul **conexiunii în triunghi**, solicitările maxime ale izolației longitudinale pot apărea la ambele extremități ale bobinajelor. Izolația transversală este maxim solicitată la mijlocul bobinajului. Datorită acestor solicitări, nivelul de izolație trebuie să fie același de-a lungul înfășurării. Izolația realizată în acest mod se numește *uniformă*.

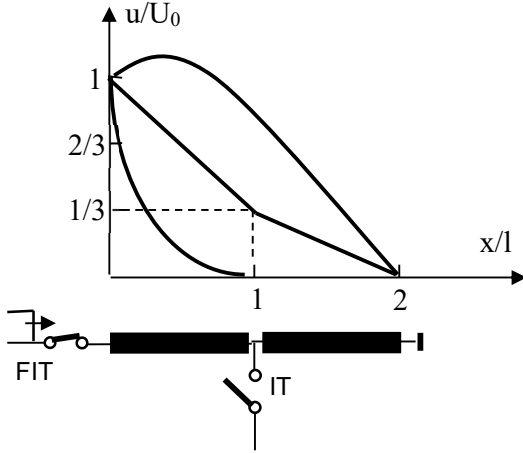
##### 7.4.5. Solicitarea izolației autotransformatoarelor

Autotransformatoarele se construiesc în conexiune Yyd și funcționează permanent cu neutru legat direct la pământ. Înfășurările de înaltă și foarte înaltă tensiune au o porțiune de bobinaj comună (legătură galvanică), iar bornele de linie sunt ambele racordate la linii aeriene. Astfel impulsurile de tensiune de trăsnet pot intra în ambele înfășurări. Modul de solicitare a izolației depinde de borna prin care pătrunde impulsul ca și de starea întrerupătoarelor de borne.

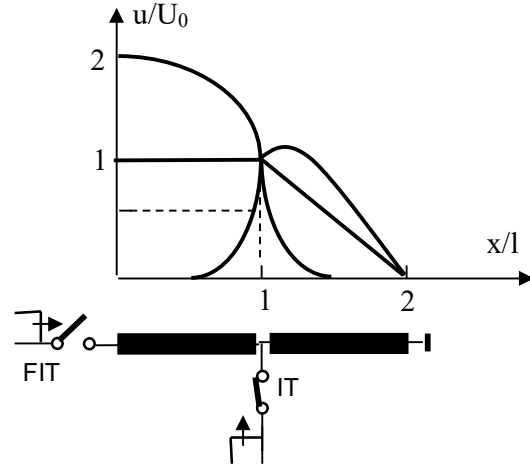
##### a) impulsul aplicat prin borna de FIT

Dacă întrerupătorul IT este deschis (fig.7.12), atunci solicitarea izolației are loc ca și

În cazul înfășurării monofazate cu sfârșitul legat la pământ. Dacă distanța între borna de IT și întrerupătorul de IT este mare (frecvent în stațiile de transformare această distanță este de 70-100 m), atunci au loc reflexii repetate între borna IT a înfășurării și borna în gol a întrerupătorului IT, ceea ce poate provoca o amplificare a solicitării izolației transformatorului.



**Fig. 7.12** – Aplicarea impulsului de trăsnet bornei de foarte înaltă tensiune



**Fig.7.13** - Aplicarea impulsului de trăsnet bornei de înaltă tensiune

Dacă întrerupătorul IT este închis, impedanța caracteristică a racordului la borna IT a înfășurării este mică, putând considera această bornă ca fiind legată la pământ. Ca urmare în zona de înfășurare dintre această bornă și neutru nu apar solicitări ale izolației.

#### **b) impulsul aplicat prin borna de IT**

Dacă întrerupătorul FIT este închis, se poate considera că borna de FIT a înfășurării este legată la pământ prin impedanța caracteristică a LEA FIT. Izolația celor două secțiuni ale înfășurării este solicitată la fel ca în cazul înfășurărilor cu sfârșitul legat la pământ.

Dacă însă întrerupătorul FIT este deschis, zona de înfășurare dintre bornele IT și FIT este solicitată ca o înfășurare cu sfârșitul izolat, iar înfășurarea de IT este solicitată ca o înfășurare cu sfârșitul legat la pământ. (fig.14). Se observă o solicitare mare a izolației transversale la intrarea în înfășurarea de FIT, ceea ce poate fi foarte periculos pentru autotransformator.

Aceste regimuri diferite sunt posibile în exploatare, ceea ce impune protecția AT cu descărcătoare legate direct la borne, fără intermediul unor separatoare.

### **7.4.6 Metode de limitare a solicitării izolației transformatoarelor cu tensiune de impuls**

Din punct de vedere teoretic, repartiția tensiunii și a solicitării izolației de-a lungul înfășurării devin uniforme dacă

$$\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}} = 0.$$

O asemenea condiție nu poate fi realizată în construcția transformatoarelor din sistemul energetic, dar se pot aplica unele măsuri constructive de reducere a valorii  $\alpha$  cel puțin în zonele din înfășurare unde solicitările izolației sunt cele mai importante.

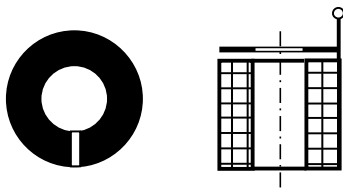
Metodele folosire practic sunt:

a) *întărirea izolației longitudinale la începutul înfășurării.*

Se procedează la mărirea distanței dintre spire și folosirea mai multor straturi de izolație a conductorului înfășurării. Ambele măsuri contravin principiului teoretic enunțat mai sus deoarece produc scăderea valorii capacității  $K$  și deci mărirea valorii  $\alpha$ . Faptul că metoda are succes înseamnă că mărirea rigidității dielectrice a spațiului dintre spire depășește creșterea solicitării izolației respective datorată mării valorii  $\alpha$ .

b) *folosirea inelului de gardă*

Deasupra bobinajului fiecărei faze se așează un disc de carton, de forma unei coroane circulare, învelit în folie de aluminiu cu excepția unui sector îngust. Acest disc se leagă galvanic la borna de intrare în înfășurare (fig.7.14).



Prezența acestui electrod, având potențialul bornei de intrare în înfășurare, creează capacități suplimentare față de spirele din primul strat al înfășurării, astfel încât capacitatea longitudinală  $K$  crește în această zonă. Metoda este eficace deoarece reducerea solicitării izolației longitudinale este foarte necesară exact în această zonă.

**Fig.7.14-** Inelul de gardă

O variantă a acestui procedeu este extinderea inelului de gardă sub forma unui trunchi de con în jurul înfășurării, ceea ce implică și creșterea distanței dintre faze. O astfel de soluție nu poate fi adoptată pentru transformatoarele din sistemul energetic.

c) *Înfășurarea întretesută.*

Este un procedeu de executare a bobinajului așezând spirele pe strat în altă ordine decât aceea a succesiunii normale (fig. 7.15). Prin aceasta, în izolația dintre două spire alăturate geometric, dar îndepărtate electric se acumulează o sarcină mai mare decât în cazul înfășurării normale, ceea ce poate fi echivalat cu o mărire a capacității dintre spire. Există mai multe procedee de execuție a întreteserii, iar efectul procedeuului este deosebit de bun. Numai costul ridicat al execuției și consumul mai mare de conductor face ca aceasta să se folosească numai în zonele cu izolația longitudinală cel mai intens solicitată.



**Fig. 7.15** – Înfășurare normală și înfășurare întretesută

d) *Atașarea unor condensatoare la galeții înfășurării*

Metoda presupune folosirea unor condensatoare construite prin bobinarea cilindrică a armăturilor din folie de aluminiu și a izolației din hârtie de condensator,

urmată de o aplatizare prin presare. Acestea vor folosi uleiul din cuva transformatorului drept mediu de impregnare între straturile de hârtie.

Condensatoarele se conectează între bornele de intrare și de ieșire ale galeților dubli (1 și 12 în fig.7.15), măbind astfel capacitatea longitudinală a înfășurării. Ca urmare mărimea parametrului  $\alpha$  se reduce, iar repartiția tensiunii pe înfășurare se uniformizează.

Deși prin această metodă posibilitățile de uniformizare a repartiției tensiunii sunt mult mai mari, ea este rar folosită și numai în cazuri speciale. Transformatoarelor din sistemul electroenergetic nu li se aplică o astfel de metodă deoarece ar conduce la mărirea dimensiunilor cuvei, cât și datorită riscului mai mare de defectare datorită componentelor suplimentare introduse.

#### e) *Folosirea varistoarelor*

În locul condensatoarelor menționate mai sus, la galeții înfășurării pot fi conectate varistoare din oxizi metalici, de fapt niște mici descărcătoare lipsite de eclatoare. Acestea ar limita tensiunea pe galet la nivelul tensiunii reziduale a varistorului.

Metoda este efectiv folosită la marile transformatoare și autotransformatoare pentru protejarea zonei de înfășurare conectată la comutatorul cu ploturi pentru modificarea raportului de transformare. Această zonă se află la intrarea în înfășurare dinspre borne, deci este cel mai puternic solicitată în privința izolației longitudinale. O parte importantă dintre defecțiunile din asemenea transformatoare neprotejate astfel au loc în zona comutatorului cu ploturi.