

Lucrarea 15 - STUDIUL REPARTIȚIEI TENSIUNII PE IZOLATOARELE DE SUSPENSIE FOLOSIND MODELAREA FIZICĂ

1. Noțiuni teoretice

Tensiunea alternativă sau de impuls se repartizează în mod neuniform pe elementele unui lanț de izolatoare. Aceasta înseamnă că din tensiunea aplicată întregului lanț, fiecare dintre izolatoarele componente îi revin părți diferite, unele fiind mai sollicitate electric decât altele.

Astfel, pentru un lanț de izolatoare de suspenție precum cel prezentat în figura 1.a), îi corespunde o schemă echivalentă ca aceea din figura 1.b), în care:

- C - capacitățile proprii ale fiecărui izolator (capacitatea dintre armăturile metalice ale izolatorului);
- C_1 - capacitățile parazite dintre armăturile metalice ale lanțului și pământ (de fapt față de elementele constructive ale stâlpului - coloană, traverse);
- C_2 - capacitățile parazite dintre armăturile metalice ale lanțului și conductorul liniei (inclusiv clema și armăturile de uniformizare).

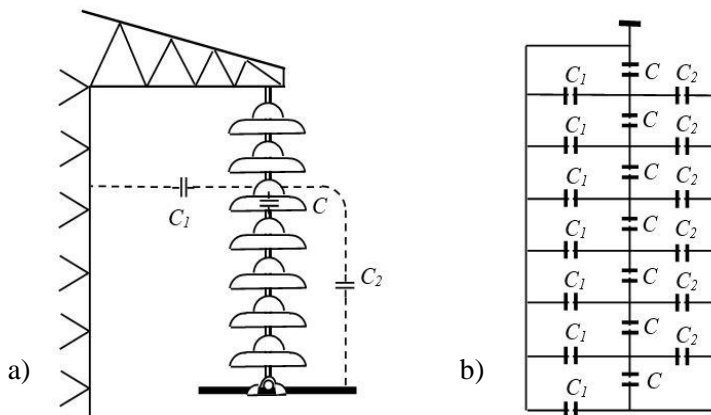


Fig. 1 – Lanț de izolatoare de suspenție: a) schiță constructivă; b) schema electrică echivalentă.

Capacitățile parazite, a căror dielectric este aerul, se formează inevitabil datorită configurației coronamentului liniei, iar mărimea lor depinde de dimensiunile armăturilor metalice și de distanțele dintre acestea și stâlp, respectiv conductor.

Izolatoarele din lanț fiind identice, capacitățile C sunt egale între ele, având valori de ordinul a 50..70 pF. Este evident că, datorită dimensiunilor mult mai mari ale stâlpului decât ale conductorului, capacitățile C_1 sunt mai mari decât C_2 . Orientativ: $C_1 \approx 4 - 5 \text{ pF}$, $C_2 \approx 0.5 - 1 \text{ pF}$.

Aceeași schemă echivalentă este valabilă și pentru izolatoarele tijă, frecvent folosite pe liniile electrice aeriene. În acest caz, capacitățile menționate în figura 1 corespund unor segmente egale din tija izolatorului.

Modelul matematic al repartiției tensiunii de-a lungul lanțului de izolatoare rezultă din rezolvarea ecuațiilor diferențiale care descriu schema electrică cu parametri uniform distribuți din figura 2.

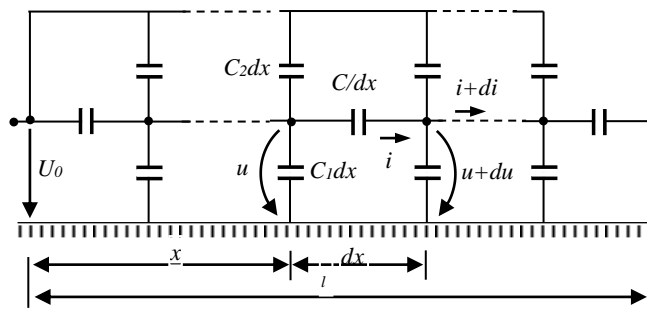


Fig. 2 – Schema cu parametri uniform distribuți utilizată pentru modelarea izolatorului de suspensie

În această schemă C , C_1 și C_2 reprezintă capacități pe unitatea de lungime a lanțului de izolatoare.

Rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale conduce la soluția generală, care exprimă, în unități relative, tensiunea în punctul de pe lanț aflat la distanța x față de capătul legat la pământ:

$$\frac{U(x)}{U_0} = \frac{1}{C_1 + C_2} \cdot \left[C_2 + C_1 \frac{\text{sh}\alpha(l-x)}{\text{sh}\alpha \cdot l} - C_2 \frac{\text{sh}\alpha \cdot x}{\text{sh}\alpha \cdot l} \right] \quad (1)$$

obținută pentru condițiile la limită $x = 0$, $U_x = U_0$ și respectiv $x = l$; $U_x = 0$ și în care:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C}} \quad (2)$$

Pentru lanțurile de izolatoare capă-tijă, este mai comod a folosi numărul de izolatoare corespunzător distanțelor x și l din relația (1). Aceasta devine:

$$U_k\% = \frac{100}{C_1 + C_2} \cdot \left[C_2 + C_1 \cdot \frac{sh\alpha \cdot k}{sh\alpha \cdot n} - C_2 \cdot \frac{sh\alpha \cdot (n-k)}{sh\alpha \cdot n} \right] \quad (3)$$

în care n este numărul de izolatoare din lanț, k este numărul de ordine al izolatorului în raport cu capătul legat la pământ, α are expresia (2), iar tensiunea în dreptul izolatorului k este exprimată procentual.

Tensiunea aplicată unui izolator din lanț, reprezentând solicitarea electrică a acestuia, se poate calcula cu relația

$$\Delta U_k\% = \frac{100}{(C_1 + C_2) \cdot sh\alpha \cdot n} \{ C_1 [sh\alpha \cdot k - sh\alpha \cdot (k-1)] - C_2 [sh\alpha \cdot (n-k) - sh\alpha \cdot (n-k+1)] \} \quad (4)$$

Dacă se ia în considerare și variația capacităților C_1 și C_2 în lungul lanțului, se complică mult tratarea analitică a problemei, fără a crește în mod esențial precizia modelului matematic.

Influența capacităților parazite asupra repartii tensiunii de-a lungul lanțului de izolatoare valorilor este exprimată grafic în figura 3, folosind relațiile (3) și (4).

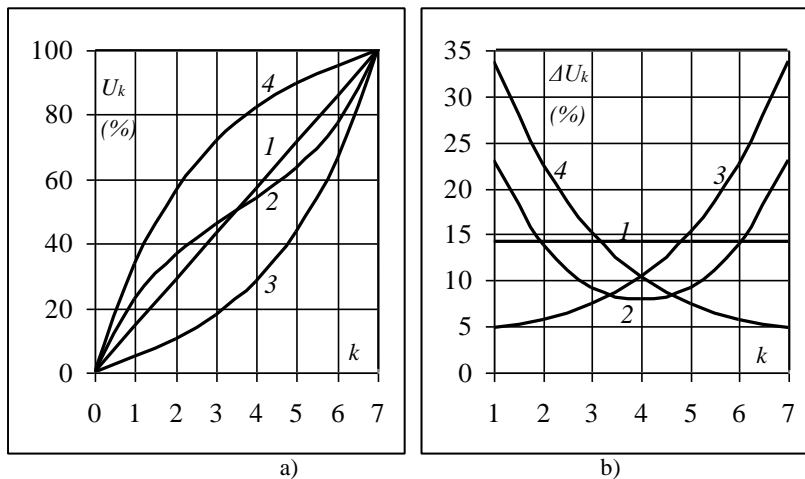


Fig. 3 – Influența capacităților parazite asupra: a) repartii tensiunii de-a lungul lanțului de izolatoare; b) tensiunii aplicate izolatoarelor componente.

1- $C_1=C_2=0$; 2 - $C_1 = C_2 \neq 0$; 3 - $C_1 \neq 0, C_2 = 0$; 4 - $C_1=0, C_2 \neq 0$.

Din analiza graficelor precedente se pot constata următoarele:

1. pentru $\alpha = 0$, adică $C_1=C_2=0$, repartii tensiunii în lungul lanțului este uniformă, respectiv izolatoarele suportă părți egale din tensiunea aplicată lanțului;

2. pentru $\alpha \neq 0$, dar $C_1=C_2$, solicitările maxime apar pe izolatoarele de la extremitățile lanțului și au valori egale, iar solicitarea minimă este la mijlocul lanțului;
3. pentru $\alpha \neq 0$, dar $C_1 \neq 0$ și $C_2=0$, solicitarea maximă apare pe izolatorul de lângă conductor, iar cea minimă pe izolatorul de lângă consolă;
4. pentru $\alpha \neq 0$, dar $C_1=0$ și $C_2 \neq 0$, solicitarea maximă apare pe izolatorul de lângă consolă, iar cea minimă pe izolatorul de lângă conductor.

Situațiile prezentate în figura 3 sunt pur teoretice; în cazurile practice, capacitățile parazite există inevitabil, iar $C_1 > C_2$, astfel că solicitarea maximă revine izolatorului de lângă conductor, iar solicitarea minimă apare către capătul dinspre consola a lanțului, dar nu chiar pe ultimul izolator. Odată cu creșterea lungimii lanțului, corespunzător creșterii tensiunii nominale a liniei, gradul de neuniformitate al repartiției se accentuează.

În cazul liniilor cu tensiunea nominală de 220 kV și mai mare, solicitarea mărită a unora dintre izolatoarele lanțului creează condiții pentru apariția unor descărcări locale de tip corona în zonele cu rază mare de curbură ale armăturilor metalice de prindere, ceea ce generează zgomot, perturbații radioelectrice și accelerează procesele de coroziune.

Obținerea unei repartiții liniare a tensiunii în lungul lanțului, este posibilă teoretic numai dacă ar lipsi capacitățile parazite. În practică fiind imposibil a se ajunge la o asemenea situație, se poate acționa numai pentru o reducere limitată a gradului de ne-uniformitate a solicitării izolatoarelor din lanț.

Unica metodă practică, folosită pentru izolatoarele de suspensie, este atașarea unor electrozi la extremitățile lanțului, care modifică mărimea capacităților parazite, mai ales a capacităților C_2 în raport cu conductorul. Prin aceasta se obține o reducere a solicitării izolatoarelor de lângă conductor, ceea ce micșorează semnificativ efectele negative menționate mai sus.

Armăturile de uniformizare a repartiției tensiunii îndeplinesc simultan și rolul de protejare a izolatoarelor față de efectul termic al arcului electric, motiv pentru care adesea se montează la ambele extremități ale lanțului. Forma acestor armături este inelară, dar la liniile de foarte înaltă tensiune se folosesc mai ales armături ovale, uneori chiar curbate către lanțul de izolatoare pentru a obține efectul de reducere a solicitării izolatoare, fără a fi necesară creșterea distanței dintre fazele liniei.

2. Determinări analitice și experimentale

Prezenta lucrare de laborator are ca obiectiv analiza modului în care capacitățile parazite dintre izolator și stâlp (pământ), respectiv dintre izolator și conductorul activ, influențează repartiția tensiunii pe un lanț de izolatoare de 110 kV. Pentru început va fi prezentat modelul fizic al lanțului de izolatoare, disponibil în cadrul laboratorului, modul de lucru fiind prezentat ulterior.

2.1. Modelul fizic al lanțului de izolatoare

În cadrul laboratorului de înaltă tensiune este disponibil un model fizic ce corespunde lanțului de izolatoare al unei linii de 110 kV, acesta fiind format dintr-o rețea de condensatoare, conform schemei echivalente din figura 1.b. Modelului de lanț de izolatoare îi este atașat un circuit de măsură care utilizează principiul compensării (montaj în punte), rezultând schema din figura 4.

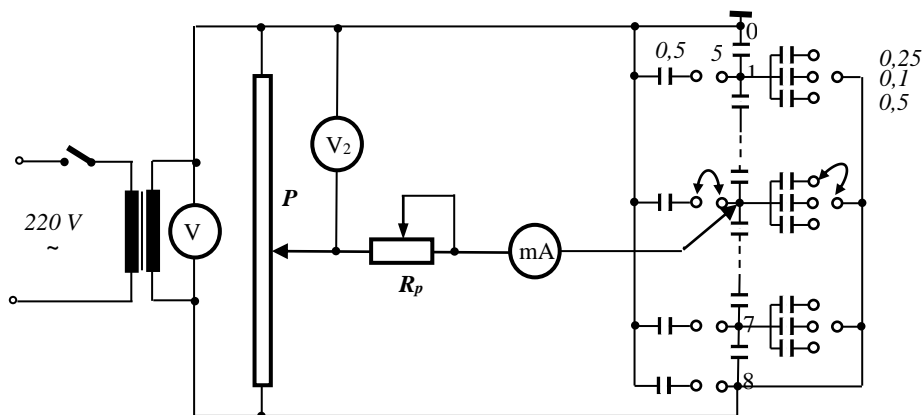


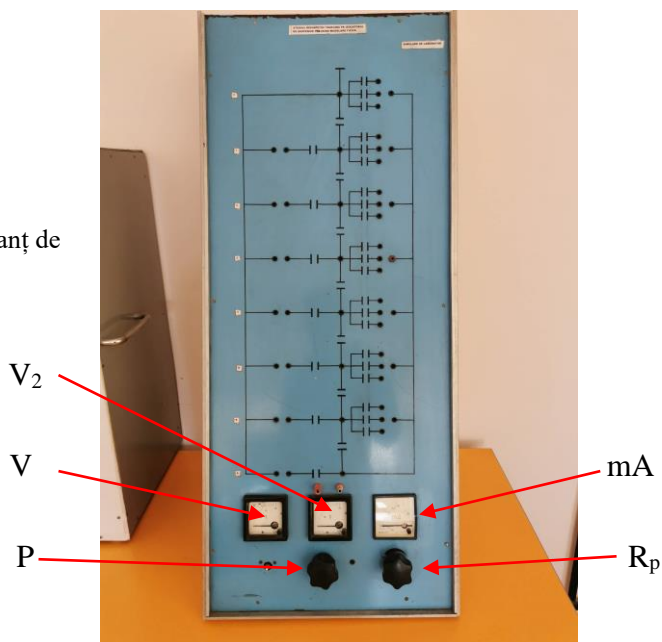
Fig. 4 – Schema de principiu a modelului fizic de lanț de izolatoare

Toate valorile capacităților din figura 4 sunt date în μF . Transformatorul de alimentare a modelului are tensiunile nominale 230/100 V, astfel încât tensiunile măsurate pe model sunt numeric egale cu cota procentuală din tensiunea aplicată modelului.

Circuitul de măsură este o punte ale cărei brațe sunt formate din zonele potențiometrului P cuprinse între cursor și extremități, respectiv din zonele modelului capacitiv a lanțului de izolatoare, cuprinse între punctul de conectare a mA-metrului și cele două extremități. Diagonala de măsură cuprinde indicatorul de nul (mA-metrul) și rezistența de protecție R_p . Diagonala de alimentare cuprinde secundarul transformatorului împreună cu voltmetrul V_1 care indică valoarea fixă de 100 V și servește pentru controlul prezenței tensiunii.

Un detaliu grafic al modelului propriu-zis aflat în dotarea laboratorului este prezentat în figura 5.

Fig. 5 – Modelul fizic al unui lanț de izolatoare de 110 kV



Capacitățile parazite se conectează cu ajutorul unor conductoare mobile, permițând astfel realizarea unor configurații teoretice, conform cazurilor ilustrate în figura 3. Sunt prevăzute astfel trei valori diferite ale capacităților parazite față de conductor, ceea ce corespunde unor armături de dimensiuni diferite pentru uniformizarea repartiției tensiunii pe lanț.

La alegerea scării de modelare a capacităților s-a avut în vedere evitarea influenței capacităților parazite ale conductoarelor de legătură. Ca urmare:

$$\frac{C_{MODEL}}{C_{REAL}} = 10^5 \quad (5)$$

2.2. Modul de lucru

Analiza repartiției tensiunii pe modelului lanțului de izolatoare de 110 kV din laborator se va efectua în următoarele scenarii în ceea ce privește valorile capacităților parazite, C_1 și C_2 :

- $C_1 = 0$, iar $C_2 = 0$, respectiv $C_2 = 0,25 \mu\text{F}$;
- $C_1 = 0,5 \mu\text{F}$, iar $C_2 = 0$, $C_2 = 0,1 \mu\text{F}$, $C_2 = 0,25 \mu\text{F}$, respectiv $C_2 = 0,5 \mu\text{F}$;

Pentru măsurarea tensiunii pe elementele lanțului de izolatoare se va proceda după cum urmează:

- folosind o serie de conectori mobili se vor conecta capacitățile parazite conform valorile indicate anterior;
- la bornele roșii ale voltmetrului V_2 se vor conecta două conductoare cu ajutorul cărora se va măsura tensiunea în fiecare nod al lanțului de izolatoare, precum și pe fiecare element al lanțului în parte; în acest scop se va regla potențiometrul P până la anularea curentului prin mA-metru. Pe măsura apropierii de zero, se reduce progresiv valoarea rezistenței de protecție R_P , pentru a crește sensibilitatea instrumentului de nul. La sfârșitul echilibrării, tensiunea indicată de voltmetrul V_2 este egală cu tensiunea pe schema capacitivă între punctul de măsură și borna de masă;
- valorile tensiunii măsurate în fiecare nod al lanțului de izolatoare se vor trece într-un tabel realizat conform modelului indicat în tabelul 1, în ce căderile de tensiune pe elementele componente ale lanțului de izolatoare se vor nota într-un tabel centralizator întocmit conform modelului indicat în tabelul 2.

Tabelul 1. Tensiunile în nodurile schemei capacitive

Nodul	U_k (%) in cazurile:					
	$C_1 = 0$		$C_1 = 0,5 \mu\text{F}$			
	$C_2=0$	$C_2=0,25 \mu\text{F}$	$C_2=0$	$C_2=0,5 \mu\text{F}$	$C_2=0,1 \mu\text{F}$	$C_2= 0,25 \mu\text{F}$
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Tabelul 2. Căderile de tensiune pe elementele componente ale lanțului de izolatoare

Izolatorul	ΔU_k (%) in cazul:					
	$C_1 = 0$		$C_1 = 0,5 \mu\text{F}$			
	$C_2=0$	$C_2=0,25 \mu\text{F}$	$C_2=0$	$C_2=0,5 \mu\text{F}$	$C_2=0,1 \mu\text{F}$	$C_2= 0,25 \mu\text{F}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Utilizând valorile tensiunilor măsurate se va trasa grafic variația tensiunii de-a lungul izolatoarelor, $U_k(k)$, respectiv pe fiecare element izolator al lanțului în parte, $\Delta U_k(k)$, pentru cazurile:

- $C_1=C_2=0$;
- $C_1= C_2 \neq 0$;
- $C_1 \neq 0, C_2 = 0$;
- $C_1=0, C_2 \neq 0$.

Se vor compara graficele obținute cu cele din figura 3 și se vor face aprecieri asupra zonelor celor mai intens solicitate de-a lungul lanțului de izolatoare.