

Aplicație numerică

1. Probleme rezolvate

a) Linie simplu circuit de medie tensiune

Să se determine numărul specific de deconectări al unei linii electrice aeriene de 20 kV ce face parte dintr-o rețea de distribuție având neutrul tratat cu bobină de stingere și are următoarele caracteristici constructive:

- *conductoare*: secțiunea $S = 95 \text{ mm}^2$; raza $r = 0,67 \text{ cm}$; se neglijează săgeata conductoarelor;
- *izolatoare*: linia este echipată cu izolatoare suport de tip IsNs 20, având înălțimea $l_{iz} = 0,27 \text{ m}$ și tensiunea de conturare la impuls $U_{50\%izLEA} = 140 \text{ kV}$;
- *stâlpi*: linia este realizată pe stâlpi din beton armat centrifugat, având o rezistență a prizelor de pământ $R_p = 10 \Omega$ și următoarele dimensiuni geometrice (fig. 5);

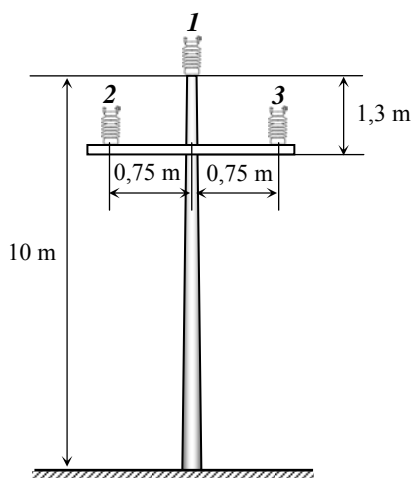


Fig. 5. Dimensiunile geometrice ale unui stâlp de medie tensiune

- *keraunicitatea zonei*: indicele keraunic al zonei este $N_z = 36 \text{ zile/an}$.

Rezolvare

Pentru rezolvarea problemei se utilizează algoritmul descris în § 1.2, particularizat pentru linii de medie tensiune, caz în care se neglijează inductanța stâlpului.

Fiind cunoscut indicele keraunic al zonei, se poate calcula densitatea de trăsnete:

$$D_t = \frac{1,1 \cdot N_z}{1 + 1,4 \cdot \sqrt{N_z}} = \frac{1,1 \cdot 36}{1 + 1,4 \cdot \sqrt{36}} = 4,17 \text{ trasnete/km}^2 \cdot \text{an} \quad (49)$$

Curentul de protecție la lovirea conductoarelor active se determină numai pentru conductorul cel mai expus – notat cu I în fig. 5. În consecință trebuie calculată doar

impedanța caracteristică a acestuia, dar și coeficientul de cuplaj capacitiv dintre acest conductor și oricare dintre celelalte conductoare de fază, construcția fiind simetrică:

$$Z_1 = 60 \cdot \ln \frac{2h_1}{r_1} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot (10 + 0,27)}{0,67 \cdot 10^{-2}} = 482 \, \Omega, \quad (50)$$

$$k_{12} = \frac{\ln \frac{b_{12}}{a_{12}}}{\ln \frac{2h_1}{r_1}} = \frac{\ln \frac{\sqrt{(10,27 + 8,97)^2 + 0,75^2}}{\sqrt{1,3^2 + 0,75^2}}}{\ln \frac{2 \cdot (10 + 0,27)}{0,67 \cdot 10^{-2}}} = 0,318. \quad (51)$$

Atât impedanța caracteristică, cât și coeficientul de cuplaj se modifică în prezența descărcării corona de impuls, conform relațiilor (37) și (39), rezultând:

$$Z_{1cor} = \frac{Z_1}{\lambda_1} = \frac{182}{1,13} = 426 \, \Omega; \quad k_{12cor} = \lambda_2 \cdot k_{12} = 1,4 \cdot 0,318 = 0,445. \quad (52)$$

Din relația (17), rezultă curentul de protecție la lovirea conductorului activ

$$I_{prca} = \frac{U_{50\%izLEA}}{(1 - k_{12cor}) \cdot R_p} = \frac{140}{(1 - 0,445) \cdot R_p} = 25,22 \, \text{kA}, \quad (53)$$

iar din relația (18) curentul de protecție la lovirea stâlpului

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%izLEA}}{R_p} = \frac{140}{R_p} = 14 \, \text{kA}. \quad (54)$$

Utilizând relația probabilității de conturnare la impuls (5) și datele din tabelul 1, pentru trăsnet negativ descendent se obține:

- probabilitatea de conturnare a izolației la lovirea conductorului activ

$$P_{cca} = A \cdot e^{-\frac{I_{prca}}{B}} = 1,51 \cdot e^{-\frac{25,22}{26}} = 0,568 = 56,8 \, \%; \quad (55)$$

- probabilitatea de conturnare a izolației la lovirea stâlpului

$$P_{cst} = A \cdot e^{-\frac{I_{prst}}{B}} = 1,51 \cdot e^{-\frac{14}{26}} = 0,875 = 87,5 \, \%. \quad (56)$$

Probabilitatea de amorsare a arcului electric de frecvență industrială se calculează cu relația (8), particularizată pentru cazul liniilor componente ale rețelelor având neutrul tratat cu bobină de stingere și pentru o tensiune de serviciu egală cu tensiunea cea mai ridicată a rețelei, $U_s = 24 \, \text{kV}$:

$$P_a = 1,6 \cdot \frac{U_s}{100 \cdot I_{iz}} - 0,06 = 1,6 \cdot \frac{24}{100 \cdot 2 \cdot 0,27} - 0,06 = 0,65 = 65 \, \%. \quad (57)$$

Rezultatele calculelor anterioare se introduc în relația (10), obținându-se, astfel, numărul specific de deconectări la lovituri directe de trăsnet:

$$\begin{aligned} n_d &= 0,6 \cdot D_t \cdot P_a \cdot (0,47 \cdot h_{ca} \cdot P_{cca} + 0,53 \cdot h_{st} \cdot P_{cst}) = \\ &= 0,6 \cdot 4,17 \cdot 0,65 \cdot (0,47 \cdot 10,27 \cdot 0,568 + 0,53 \cdot 10 \cdot 0,875) = 12 \text{ decon./100 km} \cdot \text{an} \end{aligned} \quad (58)$$

Numărul de deconectări datorat supratensiunilor induse de trăsnet se calculează conform § 1.4, rezultând

$$\begin{aligned} n_{si} &= P_a \cdot \frac{6 \cdot A \cdot B \cdot D_t \cdot h_{ca}}{U_{50\%iz.LEA}} \cdot e^{-\frac{U_{50\%iz.LEA}}{10 \cdot B}} = 0,65 \cdot \frac{6 \cdot 1,51 \cdot 26 \cdot 4,17 \cdot 10,27}{140} \cdot e^{-\frac{140}{10 \cdot 26}} = \\ &= 27,4 \text{ deconectări/100 km} \cdot \text{an} \end{aligned} \quad (59)$$

Numărul specific total de deconectări rezultă

$$n_t = n_d + n_{si} = 12 + 27,4 = 39,4 \text{ deconectări/100 km} \cdot \text{an}, \quad (60)$$

ponderea cea mai mare având-o deconectările datorate supratensiunilor de trăsnet induse, situație specifică liniilor electrice aeriene de medie tensiune.

b) Linie electrică aeriană dublu circuit de 110 kV

Să se determine numărul specific de deconectări al unei linii electrice aeriene cu dublu circuit și tensiunea nominală de 110 kV, având următoarele caracteristici:

- *conductoare active*: secțiunea $S_{ca} = 300 \text{ mm}^2$; raza $r_{ca} = 1,21 \text{ cm}$; săgeata $f_{ca} = 8 \text{ m}$;
- *conductor de protecție*: secțiunea $S_{cp} = 70 \text{ mm}^2$; raza $r_{cp} = 0,53 \text{ cm}$; săgeata $f_{cp} = 6,8 \text{ m}$;
- *izolatoare*: linia este echipată cu lanțuri de izolatoare de susținere pentru zone geografice cu nivelul II de poluare, având lungimea $l_{iz} = 1,3 \text{ m}$ și tensiunea de conturare la impuls $U_{50\%iz.LEA} = 698 \text{ kV}$;
- *stâlpi*: linia este realizată pe stâlpi având inductivitatea specifică $L_{st} = 0,65 \text{ } \mu\text{H/m}$, armătura metalică conectată la o priză de pământ cu rezistența $R_p = 10 \text{ } \Omega$ și următoarele dimensiuni geometrice (fig. 6);
Lungimea deschiderii dintre doi stâlpi adiacenți este $l_d = 200 \text{ m}$;
- *keraunicitatea zonei*: indicele keraunic al zonei este $N_z = 36 \text{ zile/an}$.

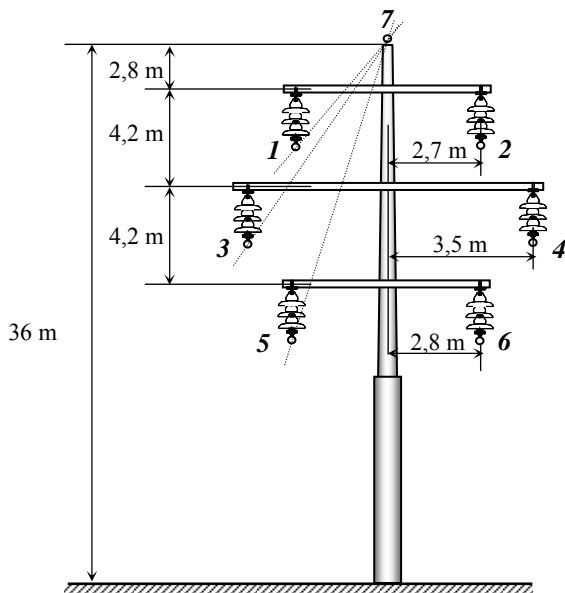


Fig. 6. Dimensiunile geometrice ale unui stâlp dublu circuit de 110 kV

Rezolvare

Densitatea de trăsnete specifică zonei traversate de linie este dată de relația (2)

$$D_t = \frac{1,1 \cdot N_z}{1 + 1,4 \cdot \sqrt{N_z}} = \frac{1,1 \cdot 36}{1 + 1,4 \cdot \sqrt{36}} = 4,17 \text{ trăsnete/km}^2 \cdot \text{an} \quad (61)$$

În calculele de determinare a curentului de protecție la lovirea conductoarelor active, trebuie identificat conductorul cel mai expus, adică acel conductor care are unghiul de protecție cel mai mare. Pornind de la observația că geometria stâlpului este simetrică, se calculează unghiurile de protecție ale conductoarelor unui circuit, astfel:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{2,7}{2,8 + 1,3}\right) = 33,4^\circ, \quad (62)$$

$$\alpha_3 = \arctg\left(\frac{3,5}{2,8 + 4,2 + 1,3}\right) = 22,86^\circ, \quad (63)$$

$$\alpha_5 = \arctg\left(\frac{2,8}{2,8 + 4,2 + 4,2 + 1,3}\right) = 12,62^\circ. \quad (64)$$

Rezultă ce cele mai expuse conductoare active sunt conductoarele de pe traversa superioară a stâlpului, cele notate cu **1** și respectiv **2**. Această concluzie, rezultat al calculului unghiurilor de protecție în planul stâlpului, se consideră satisfăcătoare, cu toate că unghiul de protecție se modifica de-a lungul deschiderii dintre stâlpi, datorită săgeților diferite ale conductoarelor active și de protecție.

Având în vedere faptul ca distanța față de sol a conductoarelor active și de protecție se modifică de-a lungul deschiderii, calculele se efectuează în ipoteza conductorului orizontal, dispus față de sol la o înălțime egală cu înălțimea medie:

$$h_1 = h_{\max 1} - \frac{2}{3} \cdot f_{ca} = (36 - 2,8 - 1,3) - \frac{2}{3} \cdot 8 = 26,6 \text{ m}; \quad (65)$$

$$h_7 = h_{\max 7} - \frac{2}{3} \cdot f_{cp} = 36 - 2,8 - 6,8 = 31,47 \text{ m}. \quad (66)$$

Impedanțele caracteristice ale conductoarelor ce pot fi lovite de descărcarea de trăsnet, calculate conform relației (36), sunt:

$$Z_1 = 60 \cdot \ln \frac{2h_1}{r_1} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 26,6}{1,21 \cdot 10^{-2}} = 503,2 \ \Omega, \quad (67)$$

$$Z_7 = 60 \cdot \ln \frac{2h_7}{r_7} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 31,47}{0,525 \cdot 10^{-2}} = 563,5 \ \Omega, \quad (68)$$

valori care devin mai mici în prezența descărcării corona de impuls, obținându-se:

$$Z_{1cor} = \frac{Z_1}{\lambda_1} = \frac{503,2}{1,13} = 446 \ \Omega \text{ și respectiv } Z_{7cor} = \frac{Z_7}{\lambda_1} = \frac{563,5}{1,13} = 499 \ \Omega. \quad (69)$$

În cazul lovirii conductorului activ, trebuie calculat coeficientul de cuplaj capacitiv dintre acesta și conductorul de protecție, așa cum rezultă din § 1.3, iar în cazul lovirii conductorului de protecție sau a stâlpului, se calculează coeficientul de cuplaj capacitiv dintre conductorul de protecție și cel mai îndepărtat conductor activ față de acesta, conform observațiilor din § 1.6. Astfel, trebuie calculați coeficienții de cuplaj dintre conductorul **1** și conductorul **7** și respectiv dintre conductoarele **7** și **5**. În calcule intervin înălțimile medii ale conductoarelor, trebuind, deci, calculată și înălțimea medie de suspendare a conductorului **5**:

$$h_5 = h_{\max 5} - \frac{2}{3} \cdot f_{ca} = h_1 - 8,4 = 18,2 \text{ m}. \quad (70)$$

Utilizând relația (38) și construcțiile geometrice din figurile 2 și 6 se obține:

$$k_{17} = \frac{\ln \frac{b_{17}}{a_{17}}}{\ln \frac{2h_1}{r_1}} = \frac{\ln \frac{\sqrt{(31,47 + 26,6)^2 + 2,6^2}}{\sqrt{2,7^2 + (31,47 + 26,6)^2}}}{\ln \frac{2 \cdot 26,6}{1,21 \cdot 10^{-2}}} = 0,282; \quad (71)$$

$$k_{75} = \frac{\ln \frac{b_{75}}{a_{75}}}{\ln \frac{2h_7}{r_7}} = \frac{\ln \sqrt{(31,47 + 18,2)^2 + 2,8^2}}{\sqrt{2,8^2 + (31,47 + 18,2)^2}} = 0,139. \quad (72)$$

În prezența descărcării corona de impuls cuplajul capacitiv devine mai bun, coeficienții de cuplaj luând următoarele valori:

$$k_{17cor} = \lambda_2 \cdot k_{17} = 1,4 \cdot 0,282 = 0,394 \text{ și } k_{75cor} = \lambda_2 \cdot k_{75} = 1,4 \cdot 0,139 = 0,195. \quad (73)$$

Calculul curenților de protecție se efectuează conform algoritmului prezentat în § 1.3, cu observațiile din § 1.6, cu privire la modul de calcul a impedanței canalului descărcării de trăsnet. Astfel, pentru determinarea curentului de protecție la lovirea conductorului activ trebuie să se calculeze impedanța echivalentă dată de relația (11). Dacă valoarea inițială a impedanței caracteristice se adoptă $Z_k = 800 \Omega$, se obține:

$$Z_{kc} = \frac{Z_k \cdot \frac{Z_{1cor}}{2}}{Z_k + \frac{Z_{1cor}}{2}} = \frac{800 \cdot \frac{446}{2}}{800 + \frac{446}{2}} = 174,4 \Omega, \quad (74)$$

iar valoarea curentului de protecție corespunzător:

$$I_{prca} = \frac{U_{50\%izLEA}}{(1 - k_{17cor}) \cdot Z_{kc}} = \frac{698}{(1 - 0,394) \cdot 174,4} = 6,6 \text{ kA}. \quad (75)$$

Valoarea inițială a impedanței canalului descărcării corespunde unui curent de trăsnet de 18,4 kA (valoare obținută prin interpolare lineară, conform § 1.6). Noua valoare a curentului de trăsnet este însă de numai 6,6 kA, impedanța Z_k corespunzătoare fiind de 880 Ω . Cu această nouă valoare, rezultă $Z_{kc} = 177,9 \Omega$.

Cu această nouă valoare a impedanței echivalente Z_{kc} se obține

$$I_{prca} = \frac{698}{(1 - 0,394) \cdot 177,9} = 6,5 \text{ kA}, \quad (76)$$

cu numai 1,5 % mai mic decât valoarea inițială, nemaifiind necesară o nouă iterație.

În cazul lovirii stâlpului, se particularizează relația de calcul a termenului κ_1 , dat de relația (30), pentru $Z_k = 600 \Omega$, astfel:

$$\kappa_1 = \frac{\frac{Z_k \cdot Z_{7cor} / 2}{Z_k + Z_{7cor} / 2}}{\frac{Z_k \cdot Z_{7cor} / 2}{Z_k + Z_{7cor} / 2} + R_p} = \frac{\frac{600 \cdot 499 / 2}{600 + 499 / 2}}{\frac{600 \cdot 499 / 2}{600 + 499 / 2} + 10} = 0,946. \quad (77)$$

Utilizând rezultatele anterioare și unele date generale din § 1.6, se obține

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%izLEA}}{(1 - k_{75cor}) \left(\kappa_1 \cdot R_p + \kappa_1^2 \cdot \frac{L_{st}}{t_f} \right)} = \frac{698}{(1 - 0,195) \left(0,946 \cdot 10 + 0,946^2 \cdot \frac{0,65 \cdot 36 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} \right)} = 43,5 \text{ kA.} \quad (78)$$

Impedanța $Z_k = 600 \Omega$ corespunde unui curent de trăsnet de 30 kA, curentului de trăsnet de 43,5 kA corespunzându-i impedanța canalului descărcării $Z_k = 576 \Omega$, valoare obținută prin interpolare lineară, așa cum s-a arătat în § 1.6.

Cu noua valoare a impedanței Z_k se recalculează curentul de protecție la lovirea stâlpului, acesta devenind egal cu $I_{prst} = 43,7$ kA. Nu este necesară o nouă iterație.

În cazul lovirii conductorului de protecție, conform relației (32) rezultă un curent de protecție de două ori mai mare decât în cazul lovirii stâlpilor, deci

$$I_{prep} \cong 2I_{prst} = 2 \cdot 43,7 = 87,4 \text{ kA.} \quad (79)$$

Probabilitățile de conturnare la impuls a izolației, calculate cu relația (5) și cu datele din tabelul 1, rezultă:

$$P_{cca} = A \cdot e^{-\frac{I_{prca}}{B}} = 1,51 \cdot e^{-\frac{6,5}{26}} = 1,176 = 100 \text{ \%}; \quad (80)$$

$$P_{cst} = A \cdot e^{-\frac{I_{prst}}{B}} = 1,51 \cdot e^{-\frac{43,7}{26}} = 0,281 = 28,1 \text{ \%}; \quad (81)$$

$$P_{ccp} = A \cdot e^{-\frac{I_{prep}}{B}} = 1,51 \cdot e^{-\frac{87,4}{26}} = 0,052 = 5,2 \text{ \%}. \quad (82)$$

Probabilitatea de transformare a canalului conturnării de impuls în arc electric de frecvență industrială se obține particularizând relația (8) pentru rețele având neutrul legat la pământ, așa cum sunt rețelele de înaltă tensiune:

$$P_a = 1,6 \cdot \frac{U_s}{100 \cdot l_{iz}} - 0,06 = 1,6 \cdot \frac{123/\sqrt{3}}{100 \cdot 1,3} - 0,06 = 0,814. \quad (83)$$

Alți termeni necesari în relația (22) de calcul a numărului specific de deconectări la lovituri directe de trăsnet sunt:

- probabilitatea de pătrundere prin ecranul realizat de conductorul de protecție

$$\lg P_{\alpha 1} = \frac{\alpha_1 \sqrt{h_7}}{90} - 4 = \frac{33,1 \cdot \sqrt{31,47}}{90} - 4 = -1,937 \Rightarrow P_{\alpha 1} = 0,0115; \quad (84)$$

- numărul de lovituri de trăsnet care cad pe stâlpi, din totalul descărcărilor ce ating stâlpii și conductoarele de protecție

$$\gamma = 4 \cdot \frac{h_{st}}{l_d} = 4 \cdot \frac{36}{200} = 0,72. \quad (85)$$

Toți termenii din relația (22) sunt cunoscuți, astfel încât rezultă numărul specific de deconectări la lovituri directe de trăsnet egal cu

$$n_d = n_{dca} + n_{dst} + n_{dcp} = 0,623 + 14,663 + 0,922 = 16,208 \text{ decon./100 km}\cdot\text{an},$$

observându-se că ponderea majoră o deține numărul de deconectări datorate lovirii stâlpilor liniei.

Numărul de deconectări datorat supratensiunilor induse de trăsnet se calculează conform § 1.4, rezultând

$$n_{si} = P_a \cdot \frac{6 \cdot A \cdot B \cdot D_t \cdot h_{ca}}{U_{50\%iz.LEA}} \cdot e^{-\frac{U_{50\%iz.LEA}}{10 \cdot B}} = 0,814 \cdot \frac{6 \cdot 1,51 \cdot 26 \cdot 4,17 \cdot 26,6}{698} \cdot e^{-\frac{698}{10 \cdot 26}} =$$

$$= 2,08 \text{ deconectări/100 km}\cdot\text{an} \quad (86)$$

Numărul specific total de deconectări rezultă

$$n_t = n_d + n_{si} = 16,208 + 2,08 = 18,288 \text{ deconectări/100 km}\cdot\text{an}, \quad (87)$$

ponderea cea mai mare având-o deconectările datorate lovirilor directe de trăsnet.

c) Linie electrica aeriana simplu circuit de 400 kV

Să se determine numărul specific de deconectări al unei linii electrice aeriene cu tensiunea nominală de 400 kV, având următoarele caracteristici:

- *conductoare active*: două conductoare pe fază cu secțiunea $S_{ca} = 450 \text{ mm}^2$; raza $r_{ca} = 15,6 \text{ mm}$; săgeata $f_{ca} = 10 \text{ m}$; raza de fasciculare $r_f = 200 \text{ mm}$;
- *conductoare de protecție*: secțiunea $S_{cp} = 160 \text{ mm}^2$; raza $r_{cp} = 7,5 \text{ mm}$; săgeata $f_{cp} = 8 \text{ m}$;
- *izolatoare*: linia este echipată cu lanțuri de izolatoare de susținere pentru zone geografice cu nivelul III de poluare, având lungimea $l_{iz} = 3570 \text{ mm}$ și tensiunea de conturnare la impuls $U_{50\%izLEA} = 1967 \text{ kV}$;
- *stâlpi*: linia este realizată pe stâlpi de tip PAS 400 103 5Sc, având inductivitatea specifică $L_{st} = 0,75 \text{ }\mu\text{H/m}$, armătura metalică conectată la o priză de pământ cu rezistența $R_p = 10 \text{ }\Omega$ și următoarele caracteristici geometrice (fig. 7):

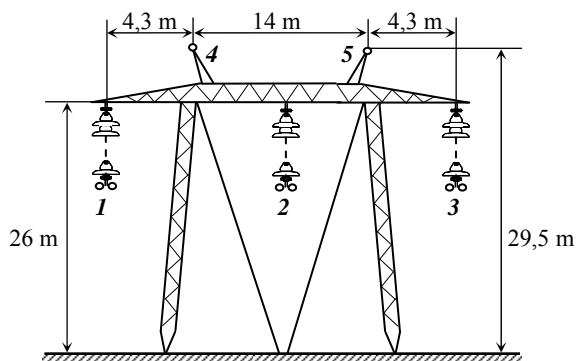


Fig. 7. Dimensiunile geometrice ale unui stâlp de tip PAS 400 103 5Sc

Lungimea deschiderii dintre doi stâlpi adiacenți este $l_d = 375$ m;
 - *keraunicitatea zonei*: indicele keraunic al zonei este $N_z = 36$ zile/an.

Rezolvare

Densitatea de trăsnete specifică zonei traversate de linie este dată de relația (2),

$$D_t = \frac{1,1 \cdot N_z}{1 + 1,4 \cdot \sqrt{N_z}} = \frac{1,1 \cdot 36}{1 + 1,4 \cdot \sqrt{36}} = 4,17 \text{ trăsnete/km}^2 \cdot \text{an} \quad (89)$$

În calculele de determinare a curentului de protecție la lovirea conductoarelor trebuie identificat conductorul activ cel mai expus. Faza aflată între montanții portalului este foarte bine protejată de către ambele conductoare de protecție, existând o distanță mare între partea inferioară a zonei de protecție și fasciculul acestei faze. În consecință, pentru astfel de stâlpi fazele extreme sunt cele mai expuse. Chiar dacă acest lucru rezultă din modul de construire a zonelor de protecție ale paratrăsnetelor orizontale, este totuși necesar să se calculeze unghiul de protecție al fazelor extreme, valoare necesară în calculul probabilității de lovire a conductorului activ prin ecranul realizat de conductoarele de protecție. Astfel, pentru dimensiunile date în fig. 7, se obține:

$$\alpha_1 = \alpha_3 = \arctg\left(\frac{4,3}{29,5 - 26 + 3,57}\right) = 31,3^\circ \quad (90)$$

Calculul se efectuează în ipoteza conductorului orizontal, dispus față de sol la o înălțime egală cu înălțimea medie, ce se calculează cu relația (48). Particularizând pentru conductoarele active și de protecție ale liniei analizate, se obține:

$$h_{ca} = h_1 = h_{\max 1} - \frac{2}{3} \cdot f_{ca} = 22,43 - \frac{2}{3} \cdot 10 = 15,76 \text{ m}; \quad (91)$$

$$h_{cp} = h_4 = h_{\max 4} - \frac{2}{3} \cdot f_{cp} = 29,5 - \frac{2}{3} \cdot 8 = 24,17 \text{ m}. \quad (92)$$

Conductoarele de fază fiind fasciculare, în calculele impedanțelor caracteristice ale acestora și ale coeficienților de cuplaj în raport cu conductoarele de protecție se utilizează raza echivalentă a fasciculului, dată de relația (40), obținându-se:

$$r_{ech} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_f^{n-1}} = \sqrt{2 \cdot 15,6 \cdot 200} = 78,99 \cong 79 \text{ mm}. \quad (93)$$

Impedanțele caracteristice ale conductoarelor expuse loviturilor de trăsnet, calculate conform relației (36), sunt egale cu:

$$Z_1 = 60 \cdot \ln \frac{2h_{ca}}{r_{ech}} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 15,76}{79 \cdot 10^{-3}} = 359,3 \ \Omega, \quad (94)$$

$$Z_4 = 60 \cdot \ln \frac{2h_{cp}}{r_4} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 24,17}{7,5 \cdot 10^{-3}} = 526,3 \ \Omega, \quad (95)$$

iar, în prezența descărcării corona de impuls, acestea devin:

$$Z_{1cor} = \frac{Z_1}{\lambda_1} = \frac{359,3}{1,13} = 317,9 \text{ } \Omega \text{ și respectiv } Z_{4cor} = \frac{Z_4}{\lambda_1} = \frac{526,3}{1,13} = 465,7 \text{ } \Omega. \quad (96)$$

În ceea ce privește coeficienții de cuplaj capacitiv, atât la lovirea conductorului activ, cât și la lovirea stâlpilor și a conductoarelor de protecție, se va calcula un singur coeficient de cuplaj, datorită simetriei construcției și datorită existenței a două conductoare de protecție. Acest coeficient se calculează între conductorul fascicular al fazei extreme și conductorul de protecție echivalent, unic, conform algoritmului dat în §1.5. Astfel, pentru a calcula coeficientul $k_{cp} = k_{cpa}$ din relațiile (26) și (29), este necesar să se calculeze coeficienții k_{14} , k_{15} și k_{45} . Particularizând relația (38) se obține:

$$k_{14} = \frac{\ln \frac{b_{14}}{a_{14}}}{\ln \frac{2h_{ca}}{r_{ech}}} = \frac{\ln \frac{\sqrt{(29,5 + 24,43)^2 + 4,3^2}}{\sqrt{4,3^2 + (3,5 + 3,57)^2}}}{\ln \frac{2 \cdot 22,43}{79 \cdot 10^{-3}}} = 0,290; \quad (97)$$

$$k_{15} = \frac{\ln \frac{b_{15}}{a_{15}}}{\ln \frac{2h_{ca}}{r_{ech}}} = \frac{\ln \frac{\sqrt{(29,5 + 24,43)^2 + (14 + 4,3)^2}}{\sqrt{(14 + 4,3)^2 + (3,5 + 3,57)^2}}}{\ln \frac{2 \cdot 22,43}{79 \cdot 10^{-3}}} = 0,163; \quad (98)$$

$$k_{45} = \frac{\ln \frac{b_{45}}{a_{45}}}{\ln \frac{2h_{cp}}{r_{cp}}} = \frac{\ln \frac{\sqrt{(2 \cdot 29,5)^2 + 14^2}}{14}}{\ln \frac{2 \cdot 29,5}{7,5 \cdot 10^{-3}}} = 0,483. \quad (99)$$

În prezența descărcării corona de impuls cuplajul coeficienții de cuplaj devin:

$$k_{14cor} = \lambda_2 \cdot k_{14} = 1,4 \cdot 0,290 = 0,406; \quad k_{15cor} = 0,228 \text{ și } k_{45cor} = 0,676. \quad (100)$$

Coeficienții dați de relațiile (100) sunt introduși în relația (44), obținându-se:

$$k_{cpa,cor} = \frac{k_{14cor} + k_{15cor}}{1 + k_{45cor}} = \frac{0,406 + 0,228}{1 + 0,676} = 0,378. \quad (101)$$

Cu rezultatele anterior obținute, pot fi calculați cei trei curenți de protecție. Se aplică algoritmul prezentat în § 1.3, cu observațiile din § 1.6, relativ la modul de calcul a impedanței canalului descărcării de trăsnet.

Pentru determinarea curentului de protecție la lovirea conductorului activ trebuie să se calculeze impedanța echivalentă dată de relația (11). Pentru o valoare inițială a impedanței caracteristice $Z_k = 900 \text{ } \Omega$, corespunzătoare unui curent de trăsnet de $I_t = 5 \text{ kA}$, se obține:

$$Z_{kc} = \frac{Z_k \cdot \frac{Z_{1cor}}{2}}{Z_k + \frac{Z_{1cor}}{2}} = \frac{900 \cdot \frac{317,9}{2}}{900 + \frac{317,9}{2}} = 135,1 \, \Omega, \quad (102)$$

iar valoarea curentului de protecție este

$$I_{prca} = \frac{U_{50\%izLEA}}{(1 - k_{cpa,cor}) \cdot Z_{kc}} = \frac{1967}{(1 - 0,378) \cdot 135,1} = 23,4 \, \text{kA}. \quad (103)$$

Acestei valori a curentului de trăsnet îi corespunde o valoare a impedanței canalului descărcării $Z_k = 679,2 \, \Omega$, valoare obținută prin interpolare lineară, conform § 1.6. Cu această nouă valoare a impedanței canalului descărcării, rezultă impedanța echivalentă $Z_{kc} = 128,8 \, \Omega$, iar noua valoare a curentului de protecție $I_{prca} = 24,55 \, \text{kA}$. Această ultimă valoare este suficient de apropiată de aceea dată de relația (103), încât să nu mai fie necesară efectuarea unei noi iterații.

În cazul lovirii stâlpului, se particularizează relația de calcul a termenului κ_I , dat de relația (30), pentru $Z_k = 564 \, \Omega$, corespunzătoare unui curent de trăsnet $I_t = 50 \, \text{kA}$:

$$\kappa_I = \frac{\frac{Z_k \cdot Z_{4cor} / 2}{Z_k + Z_{4cor} / 2}}{\frac{Z_k \cdot Z_{4cor} / 2}{Z_k + Z_{4cor} / 2} + R_p} = \frac{\frac{564 \cdot 465,7 / 2}{564 + 465,7 / 2}}{\frac{564 \cdot 465,7 / 2}{564 + 465,7 / 2} + 10} = 0,943. \quad (104)$$

Valoarea curentului de protecție la lovirea stâlpilor rezultă ca fiind egala cu

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%izLEA}}{(1 - k_{cpa,cor}) \left(\kappa_1 \cdot R_p + \kappa_1^2 \cdot \frac{L_{st}}{t_f} \right)} = \frac{1967}{(1 - 0,378) \left(0,943 \cdot 10 + 0,943^2 \cdot \frac{0,75 \cdot 29,5}{2} \right)} = 164,1 \, \text{kA}. \quad (105)$$

La această valoare a curentului de trăsnet, impedanța canalului descărcării de trăsnet este $Z_k = 364 \, \Omega$ (valoare obținută prin interpolare lineară, conform § 1.6). Cu această nouă valoare a impedanței Z_k rezultă $\kappa_I = 0,934$, curentul de protecție la lovirea stâlpului devenind $I_{prst} = 166,5 \, \text{kA}$. Între cele două valori ale curentului de protecție diferența este de numai 1,4 %, nemaifiind necesară o nouă iterație.

Este de menționat faptul că valoarea curentului de protecție la lovirea stâlpilor liniei de 400 kV este apropiată de aceea de 150 kA, dată în normativul de coordonare a izolației, **NTE 001/03/00**. Practic, valoarea de 150 kA a curentului de protecție se obține pentru o rezistență a prizei de pământ de aproximativ 9 Ω . Pe de altă parte, însă, așa cum s-a arătat în § 1.3, în calculul curentului de protecție la lovirea stâlpilor liniilor de foarte înaltă tensiune trebuie să se introducă și alți parametri. Dacă se particularizează relația (31) pentru linia analizată, se obține

$$I_{prst} = \frac{1967 - 0,5 \cdot 420 / \sqrt{3}}{(1 - 0,378) \left(0,934 \cdot 10 + 0,934^2 \frac{0,75 \cdot 29,5}{2} + 0,5 \frac{24,17}{2} \right) + \left(1 - 0,378 \frac{24,17}{15,76} \right) \frac{15,76}{2}} = 97,75 \text{ kA.}$$

Se observă că introducerea acestor noi parametri conduce la micșorarea valorii curentului de protecție mult sub limita normată. Din acest motiv, este preferabilă utilizarea valorii apropiate de aceea normată, noua valoare conducând la o valoare mai mare a numărului de deconectări datorate lovirii stâlpilor.

În cazul lovirii conductorului de protecție, conform relației (32) rezultă un curent de protecție

$$I_{prcp} \cong 2I_{prst} = 2 \cdot 166,5 = 333 \text{ kA.} \quad (106)$$

Probabilitățile de conturnare la impuls a izolației, calculate cu relația (5) și cu datele din tabelul 1, rezultă:

$$P_{cca} = A \cdot e^{-\frac{I_{prca}}{B}} = 1,51 \cdot e^{-\frac{24,55}{26}} = 0,587 = 58,7 \%; \quad (107)$$

$$P_{cst} = A \cdot e^{-\frac{I_{prst}}{B}} = 1,51 \cdot e^{-\frac{166,5}{26}} = 2,5 \cdot 10^{-3} = 0,25 \%; \quad (108)$$

$$P_{ccp} = A \cdot e^{-\frac{I_{prcp}}{B}} = 1,51 \cdot e^{-\frac{333}{26}} = 4,1 \cdot 10^{-6}. \quad (109)$$

Probabilitatea de transformare a canalului conturnării de impuls în arc electric de frecvență industrială se obține particularizând relația (8) pentru rețele având neutrul legat la pământ:

$$P_a = 1,6 \cdot \frac{U_s}{100 \cdot I_{iz}} - 0,06 = 1,6 \cdot \frac{420 / \sqrt{3}}{100 \cdot 3,57} - 0,06 = 1,027 = 100 \%. \quad (110)$$

Alți termeni necesari pentru calcul a numărului specific de deconectări sunt:

- probabilitatea de pătrundere prin ecranul realizat de conductorul de protecție

$$\lg P_{\alpha 1} = \frac{\alpha_1 \sqrt{h_{cp}}}{90} - 4 = \frac{31,3 \cdot \sqrt{24,17}}{90} - 4 = -2,29 \Rightarrow P_{\alpha 1} = 5,12 \cdot 10^{-3}; \quad (111)$$

- numărul de lovituri de trăsnet care cad pe stâlpi, din totalul descărcărilor ce ating stâlpii și conductoarele de protecție

$$\gamma = 4 \cdot \frac{h_{st}}{l_d} = 4 \cdot \frac{29,5}{375} = 0,315. \quad (112)$$

Toți termenii din relația (22) sunt cunoscuți, astfel încât rezultă numărul specific de deconectări la lovituri directe de trăsnet egal cu

$$n_d = n_{dca} + n_{dst} + n_{dcp} = 0,118 + 0,058 + 1,71 \cdot 10^{-4} = 0,176 \text{ decon./100 km}\cdot\text{an},$$

observându-se că cea mai mare pondere o are numărul de deconectări datorate lovirii conductoarelor active ale liniei.

Numărul de deconectări datorat supratensiunilor induse de trăsnet se calculează conform § 1.4, rezultând

$$n_{si} = P_a \cdot \frac{6 \cdot A \cdot B \cdot D_t \cdot h_{ca}}{U_{50\%iz.LEA}} \cdot e^{-\frac{U_{50\%iz.LEA}}{10 \cdot B}} = 1 \cdot \frac{6 \cdot 1,51 \cdot 26 \cdot 4,21 \cdot 15,76}{1967} \cdot e^{-\frac{1967}{10 \cdot 26}} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ deconectări/100 km}\cdot\text{an} \quad (113)$$

Numărul specific total de deconectări rezultă

$$n_t = n_d + n_{si} = 0,176 + 4,1 \cdot 10^{-3} = 0,18 \text{ deconectări/100 km}\cdot\text{an}, \quad (114)$$

ponderea cea mai mare având-o deconectările datorate loviturilor directe de trăsnet, așa cum este de așteptat în cazul liniilor electrice aeriene de foarte înaltă tensiune.

2. Probleme propuse

1. Să se determine numărul specific de deconectări al unei linii electrice aeriene de 20 kV, ce face parte dintr-o rețea de distribuție având neutrul tratat cu bobină de stingere și are următoarele caracteristici constructive:

- *conductoare*: secțiunea $S = 85 \text{ mm}^2$; raza $r = 5,2 \text{ mm}$; se neglijează săgeata conductoarelor;
- *izolatoare*: linia este echipată cu izolatoare compozite de suspensie, tip ICS-24 K/L, având lungimea $l_{iz} = 0,335 \text{ m}$ și tensiunea de conturare la impuls $U_{50\%izLEA} = 160 \text{ kV}$;
- *stâlpi*: linia este realizată pe stâlpi din beton armat centrifugat, având o rezistență a prizelor de pământ $R_p = 15 \Omega$ și următoarele dimensiuni geometrice (fig. 8):

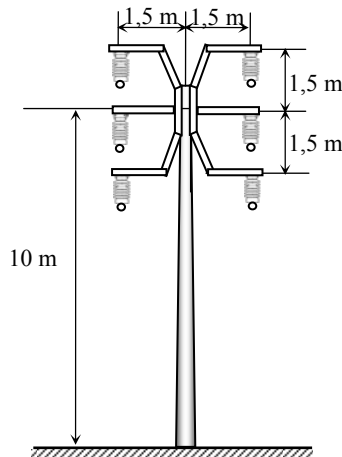


Fig. 8. Dimensiunile geometrice ale unui stâlp dublu circuit de medie tensiune

- *keraunicitatea zonei*: indicele keraunic la zonei geografice pe care o traversează linia este $N_z = 32$ zile/an.

2. Să de determine numărul specific de deconectări al unei linii electrice aeriene de 110 kV, având următoarele caracteristici constructive:

- *conductoare active*: secțiunea $S_{ca} = 185 \text{ mm}^2$; raza $r_{ca} = 9,1 \text{ mm}$; săgeata $f_{ca} = 7 \text{ m}$;
- *conductor de protecție*: secțiunea $S_{cp} = 95 \text{ mm}^2$; raza $r_{cp} = 5,5 \text{ mm}$; săgeata $f_{cp} = 6 \text{ m}$;
- *izolatoare*: linia este echipată cu izolatoare de suspensie de tip H120.120.1295TT , având lungimea $l_{iz} = 1,26 \text{ m}$ și tensiunea de conturare la impuls $U_{50\%izLEA} = 618 \text{ kV}$;
- *stâlpi*: linia este realizată pe stâlpi din beton armat centrifugat, având o rezistență a prizelor de pământ $R_p = 10 \Omega$ și următoarele dimensiuni geometrice (fig. 9):

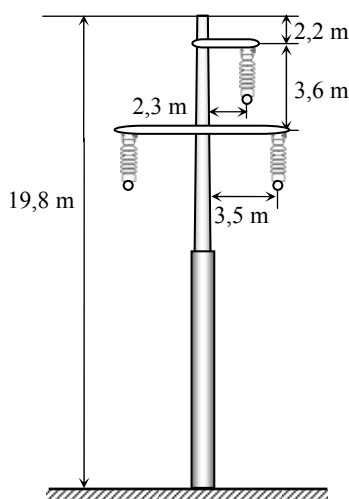


Fig. 9. Dimensiunile geometrice ale unui stâlp de susținere de tip SC 1185.

- *keraunicitatea zonei*: indicele keraunic mediu al zonei geografice pe care o traversează linia este $N_z = 30$ zile/an.

3. Să de determine numărul specific de deconectări al unei linii electrice aeriene de 220 kV, cu următoarele caracteristici constructive:

- *conductoare active*: secțiunea $S_{ca} = 450 \text{ mm}^2$; raza $r_{ca} = 13,7 \text{ mm}$; săgeata $f_{ca} = 8 \text{ m}$;
- *conductoare de protecție*: secțiunea $S_{cp} = 160 \text{ mm}^2$; raza $r_{cp} = 7,1 \text{ mm}$; săgeata maximă $f_{cp} = 6,8 \text{ m}$;
- *izolatoare*: linia este echipată cu lanțuri de izolatoare de suspensie, realizate din 13 elemente de tip CTS 120-1, având lungimea $l_{iz} = 1,89 \text{ m}$ și tensiunea de conturare la impuls $U_{50\%izLEA} = 1046 \text{ kV}$;
- *stâlpi*: linia este realizată pe stâlpi din oțel, de tip SnY 220.103s, conectați la prize de pământ având rezistență $R_p = 5 \Omega$ și următoarele dimensiuni geometrice (fig. 10):

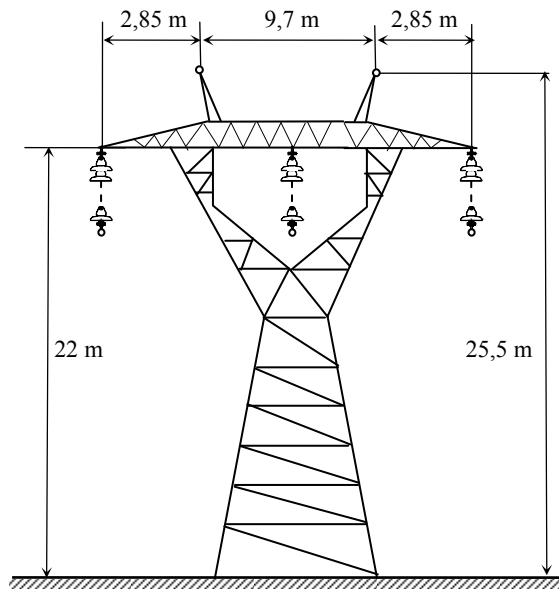


Fig. 10. Dimensiunile geometrice ale unui stâlp de susținere normal de tip SNy 220.103-3s

- *keraunicitatea zonei*: indicele keraunic al zonei geografice este $N_z = 35$ zile/an.