

Breviar de calcul

Liniile electrice aeriene sunt elementele cele mai expuse loviturilor directe de trăsnet din componența rețelelor de transport a energiei electrice, fiind cele mai înalte structuri din zonele pe care le traversează. De asemenea, extinderea însemnată a acestora face ca și zona de captare a loviturilor de trăsnet să fie mare. Chiar dacă izolația liniilor electrice aeriene este autoregeneratoare, loviturile de trăsnet pot iniția producerea de scurtcircuite. Transformarea canalului conturnării de impuls în arc electric de frecvență industrială determină deconectarea liniilor.

Modele analitice care abordează comportarea liniilor electrice aeriene la supratensiuni de trăsnet, atât ca efect al lovirii directe a elementelor constructive ale acestora, cât și datorate supratensiunilor induse, efect al loviturilor de trăsnet ce cad în vecinătatea liniilor, pot fi clasificate în două categorii:

- ✓ modele analitice destinate determinării evoluției în timp a tensiunilor de impuls ce solicită izolația liniei, luând în considerare reflexiile repetate ale undelor, precum și o serie de parametri care influențează această solicitare; acestor modele le pot fi asociate modele matematice ale caracteristicilor tensiune-timp ale lanțurilor de izolatoare, atât pentru impulsul de tensiune normalizat, cât și pentru alte forme de impuls;
- ✓ modele analitice destinate evaluării cantitative a comportării liniilor electrice aeriene la supratensiuni de trăsnet, indicatorul utilizat fiind numărul specific de deconectări; aceste modele, frecvent utilizate în calculele aproximative, operează cu valori de vârf ale tensiunilor și curenților, fără a interesa evoluția acestora în timp.

Principala etapă a algoritmului celei de a doua categorii de modele este aceea a determinării curenților de protecție. Prin definiție, curențul protecție reprezintă valoarea minimă a amplitudinii curențului de trăsnet capabil să, producă pe linia electrică aeriană, o supratensiune suficient de mare încât să determine conturnarea izolației acesteia. Odată cunoscute valorile curenților de protecție, se pot calcula probabilitățile de conturnare la impuls ale izolației liniei.

Valorile curenților de protecție pot fi calculate sau adoptate din normative. De exemplu, *Normativul privind alegerea izolației, coordonarea izolației și protecția instalațiilor electroenergetice împotriva supratensiunilor – NTE 001/03/00* prevede că, în cazul liniilor electrice aeriene protejate cu conductoare de protecție (integral sau pe porțiuni), se admit următoarele valori ale curenților de protecție în cazul lovirii de trăsnet în stâlp:

- 150 kA - pentru linii electrice aeriene de 400 kV și 750 kV;
- 100 kA - pentru linii electrice aeriene de 220 kV;
- 50 kA - pentru linii electrice aeriene de 110 kV;
- 25 kA - pentru linii electrice aeriene de 20 kV.

1. Relația de calcul a numărului specific de deconectări

Numărul specific de deconectări al unei linii electrice aeriene poate avea două componente, una determinată de loviturile directe de trăsnet în elementele constructive ale acestora și una determinată de supratensiunile de trăsnet induse în conductoare.

Pentru a calcula componenta determinată de loviturile directe de trăsnet, se pornește de la relația prin care se evaluează numărul de descărcări de trăsnet care lovesc linia electrică:

$$N_t = D_t \cdot A_c \quad [\text{trăsnete/an}] \quad (1)$$

în care D_t reprezintă densitatea de trăsnete, în trăsnete/km²·an, iar A_c reprezintă aria de captare a loviturilor directe de trăsnet, în km².

Densitatea de trăsnete se calculează funcție de intensitatea manifestărilor atmosferice din zona traversată de linie, cea mai utilizată relație de calcul fiind de forma

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

în care N_z reprezintă indicele keraunic al zonei geografice, dat în număr de zile de furtună cu descărcări electrice pe an.

Aria de captare a loviturilor directe de trăsnet se calculează cu relație

$$A_c = 6 \cdot h \cdot l \text{ [km}^2\text{]}, \quad (3)$$

în care l reprezintă lungimea liniei (km), iar h înălțimea medie a conductoarelor celor mai expuse la lovituri de trăsnet.

Nu toate loviturile de trăsnet provoacă conturnarea izolației la impuls, astfel încât numărul total de conturnări se calculează cu relația

$$N_c = 6h \cdot l \cdot D_t \cdot P_c \text{ [conturnări/an]}, \quad (4)$$

în care P_c este probabilitatea de conturnare la impuls de tensiune a izolației liniei și care poate fi considerată ca fiind egală cu probabilitatea de apariție a unui curent de trăsnet cu amplitudinea mai mare decât curentul de protecție corespunzător. Cum în calculele aproximative, probabilitatea de apariție a unui curent de trăsnet de amplitudine I_t se determină după o lege exponențială, probabilitatea de conturnare poate fi calculată cu o relație de forma

$$P_c = P(I_t \geq I_{pr}) = A \cdot e^{-\frac{I_{pr}}{B}}, \quad (5)$$

parametrii A și B depinzând de tipul descărcării.

Nu toate conturnările la impuls provoacă deconectarea liniilor, ci numai acelea care se transformă în arc electric de frecvență industrială. Numărul total de deconectări al liniei considerate se poate calcula cu relația

$$N_d = 6 \cdot h \cdot l \cdot D_t \cdot P_c \cdot P_a \text{ [deconectări/an]}, \quad (6)$$

iar numărul specific de deconectări, raportat la 100 km de linie de acest tip, se calculează cu relația:

$$n_d = 0,6 \cdot h \cdot D_t \cdot P_c \cdot P_a \text{ [deconectări/100 km} \cdot \text{an]}, \quad (7)$$

P_a reprezentând probabilitatea de transformare a conturnării la impuls în arc electric întreținut de tensiunea de serviciu. Această probabilitate se calculează cu relația

$$P_a = 1,6 \cdot \frac{U_s}{100 \cdot l_{iz}} - 0,06, \quad (8)$$

în care semnificația notațiilor este:

U_s - valoarea efectivă, în kV, a tensiunii de frecvență industrială pe care o suportă izolația a cărei conturnare determină deconectare;

l_{iz} - lungimea izolației a cărei conturnare determină scurtcircuit și, deci, deconectare.

În cazul liniilor făcând parte din rețele având neutrul efectiv legat la pământ, U_s reprezintă tensiunea de fază și l_{iz} este egală cu lungimea unui lanț de izolatoare, iar în cazul liniilor ce fac parte din rețele având neutrul tratat cu bobină de stingere sau izolat, U_s reprezintă tensiunea de linie și l_{iz} se ia egală cu de două ori lungimea unui lanț de izolatoare, deoarece în acest ultim caz deconectarea unei linii se poate produce atunci când defectul este cel puțin bifazat.

2. Comportarea liniilor fără conductor de protecție la lovituri directe de trăsnet

În acest caz, numărul specific de deconectări se calculează cu relația

$$n_d = n_{dca} + n_{dst} , \quad (9)$$

în care cei doi termeni se referă la lovitură de trăsnet în conductoarele active respectiv în stâlpi. Statistic, repartiția loviturilor de trăsnet pe astfel de linii este de 47 % pe conductoarele active, restul de 53 % lovind stâlpii. În acest fel, relația (6) devine de forma

$$n_d = 0,47 \cdot 0,6 \cdot h_{ca} \cdot D_t \cdot P_{cca} \cdot P_a + 0,53 \cdot 0,6 \cdot h_{st} \cdot D_t \cdot P_{cst} \cdot P_a , \quad (10)$$

în care, semnificația noilor notații este:

h_{ca} - înălțimea medie de suspendare a conductoarelor active mai expuse;

h_{st} - înălțimea stâlpilor;

P_{cca} - probabilitatea de conturare la impuls a izolației la lovirea conductoarelor active;

P_{cst} - probabilitatea de conturare la impuls a izolației la lovirea stâlpilor.

Deoarece din categoria liniilor fără conductoare de protecție fac parte mai ales liniile de medie tensiune, al căror neutru poate fi tratat fie cu bobină de stingere, fie cu rezistor, prezintă importanță următoarele două cazuri:

a) Linie componentă a unei rețele cu neutrul legat la pământ

În rețele având acest mod de tratare a neutrului, pentru a se produce deconectarea este suficient să conturneze izolația unei singure faze. În aceste condiții, relația de calcul a curentului de protecție la lovirea conductoarelor active este

$$I_{prca} = \frac{U_{50\%iz.LEA}}{Z_{kc}} \text{ [kA]}, \quad Z_{kc} = \frac{Z_k \cdot \frac{Z_{ca}}{2}}{Z_k + \frac{Z_{ca}}{2}} \text{ [\Omega]}, \quad (11)$$

semnificația notațiilor fiind:

$U_{50\% iz.LEA}$ – tensiunea de conturare la impuls a izolației liniei (kV);

Z_k - impedanța caracteristică a canalului liderului descendent al descărcării de trăsnet;

Z_{ca} - impedanța caracteristică a conductorului activ ce urmează a fi lovit (Ω).

Relația de calcul a curentului de protecție la lovirea stâlpilor este de forma:

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%iz.LEA}}{\kappa \cdot R_p + \kappa^2 \cdot \frac{L_{st}}{t_f}} \text{ (kA)}, \quad \kappa = \frac{Z_k}{Z_k + R_p} \text{ (\Omega)}, \quad (12)$$

noile notații având semnificația:

R_p - rezistența de impuls a prizei de pământ a stâlpului lovit [Ω];

L_{st} – inductivitatea medie a stâlpului [H];

t_f - durata de front a undei de impuls de tensiune de trăsnet [s].

Numai în cazul liniilor de medie tensiune, impedanța stâlpilor poate fi neglijată în raport cu rezistențele prizelor de pământ ale acestora, relația (12) devenind de forma

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%iz.LEA}}{R_p} \text{ [kA]}. \quad (13)$$

b) Linie componentă a unei rețele cu neutrul izolat sau tratat cu bobină de stingere

Deconectarea acestor linii se produce numai atunci când defectul este cel puțin bifazat, deci conturnarea trebuie să afecteze măcar izolația a două faze.

Atunci când lovitura de trăsnet ce atinge un conductor activ determină conturnarea izolației fazei respective, căderea de tensiune pe stâlp devine egală cu tensiunea de pe conductorul lovit, putându-se face aproximația:

$$U_{st} = R_p \cdot I_t = U_{ca1} \quad (14)$$

Prin inducție electrostatică, pe un alt conductor activ tensiunea devine:

$$U_{ca2} = k_{ca} \cdot U_{ca1}, \quad (15)$$

k_{ca} reprezentând coeficientul de cuplaj capacitiv între cele două conductoare. În acest fel, tensiunea de pe izolația acestei faze poate fi calculată cu relația

$$U_{iz} = U_{st} - U_{ca2} = (1 - k_{ca}) \cdot R_p \cdot I_t, \quad (16)$$

relația de calcul a curentului de protecție la lovirea conductoarelor active devenind

$$I_{prca} = \frac{U_{50\%iz.LEA}}{(1 - k_{ca}) \cdot R_p} \quad [\text{kA}]. \quad (17)$$

Atunci când este lovit un stâlp al liniei, se poate considera că tensiunea de pe izolația tuturor fazelor este aceeași, deci ar putea fi îndeplinite condițiile producerii unui defect polifazat. În aceste condiții, relația de calcul a curentului de protecție la lovirea stâlpilor este de forma

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%iz.LEA}}{R_p} \quad [\text{kA}], \quad (18)$$

iar dacă nu poate fi neglijată inductanța stâlpilor, în relațiile (17) și (18) R_p se înlocuiește cu expresia de la numitorul relației (12).

Valorile tuturor termenilor din relațiile de calcul ale curenților de protecție fiind cunoscute, se pot calcula acești curenți și probabilitățile de conturnare corespunzătoare, P_{cca} și P_{cst} , conform relației (5).

3. Comportarea liniilor cu conductor de protecție la lovituri directe de trăsnet

În acest caz, în relația de calcul a numărului specific de deconectări intervin trei componente, corespunzătoare lovirii directe a fiecăreia dintre componentele constructive ale liniei: conductoare active, stâlpi și respectiv conductoare de protecție

$$n_d = n_{dca} + n_{dst} + n_{dep}. \quad (19)$$

Prezența conductoarelor de protecție face ca numai o mică parte dintre loviturile de trăsnet să atingă conductoarele active. Probabilitatea de pătrundere a descărcării de trăsnet prin ecranul realizat de conductoarele de protecție se calculează cu relația:

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{cp}}}{90} - 4, \quad (20)$$

în care:

α - unghiul de protecție al liniei electrice, în mod uzual fiind de $20 \div 30^\circ$;

h_{cp} - înălțimea medie de suspendare a conductoarelor de protecție.

Repartiția loviturilor de trăsnet între stâlpii și conductoarele de protecție ale unei linii electrice aeriene este dată de o relație de forma

$$\gamma = 4 \cdot \frac{h_{st}}{l_d}, \quad (21)$$

în care l_d reprezintă lungimea deschiderii dintre doi stâlpi adiacenți, iar h_{st} înălțimea maximă a stâlpilor liniei (ambele mărimi fiind măsurate în metri).

Cu aceste observații, din relațiile (7) și (19) rezultă

$$n_d = P_\alpha 0,6 h_{ca} D_t P_{cca} P_a + (1 - P_\alpha) \cdot [\gamma 0,6 h_{st} D_t P_{cst} P_a + (1 - \gamma) 0,6 h_{cp} D_t P_{ccp} P_a]. \quad (22)$$

Atunci când este lovit unul dintre conductoarele active ale liniei electrice, amplitudinea unde de tensiune ce se propagă pe aceste poate fi calculată cu relația

$$U_{ca} = Z_{kc} \cdot I_t, \quad (23)$$

impedanța Z_{kc} putând fi calculată cu relația (11). Această undă de tensiune determină apariția unei unde de tensiune pe conductoarele de protecție, prin inducție electrostatică. Cum conductoarele de protecție sunt sau pot deveni în legătură galvanică cu stâlpii, rezultă că tensiunea pe stâlpii adiacenți este dată de relația

$$U_{cp} = k_{cp} \cdot U_{ca} = U_{st}, \quad (24)$$

k_{cp} reprezentând coeficientul de cuplaj capacitiv între conductorul activ lovit și conductorul (conductoarele) de protecție.

Tensiunea aplicată izolatoarelor fazei, la stâlpii adiacenți locului lovirii, este

$$U_{iz} = U_{ca} - U_{st} = (1 - k_{cp}) \cdot Z_{kc} \cdot I_t. \quad (25)$$

Rezultă relația de calcul a curentului de protecție la lovirea conductoarelor active

$$I_{prca} = \frac{U_{50\%izLEA}}{(1 - k_{cp}) \cdot Z_{kc}} \quad [\text{kA}], \quad (26)$$

Z_{kc} putându-se calcula cu a doua relație din sistemul (11).

În cazul lovirilor de trăsnet în stâlpii liniilor electrice aeriene, pe aceștia apare o cădere de tensiune, în raport cu pământul de referință, dată de relația

$$U_{st} = \left(\kappa_1 \cdot R_p + \kappa_1^2 \cdot \frac{L_{st}}{t_f} \right) \cdot I_t = U_{cp}. \quad (27)$$

De această dată, prin cuplajul capacitiv dintre conductoarele de protecție și cele active, pe acestea din urmă se induce o tensiune egală cu

$$U_{ca} = k_{cpa} \cdot U_{cp}, \quad (28)$$

k_{cpa} reprezentând coeficientul de cuplaj capacitiv între conductorul de protecție și cel mai îndepărtat conductor activ.

Tensiunea pe izolație rezultă ca diferență între tensiunea de pe stâlp și aceea de pe conductorul activ mai îndepărtat, iar dacă aceasta este egală cu tensiunea de conturare la impuls, atunci curentul de protecție se calculează cu relația

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%izLEA}}{(1 - k_{cpa}) \cdot \left(\kappa_1 \cdot R_p + \kappa_1^2 \cdot \frac{L_{st}}{t_f} \right)} \quad [\text{kA}], \quad (29)$$

termenul κ_1 fiind dat de relația

$$\kappa_1 = \frac{\frac{Z_k \cdot Z_{cp} / 2}{Z_k + Z_{cp} / 2}}{\frac{Z_k \cdot Z_{cp} / 2}{Z_k + Z_{cp} / 2} + R_p}, \quad (30)$$

în care cu Z_{cp} s-a notat impedanța caracteristică a conductorului de protecție, în Ω .

În cazul liniilor electrice aeriene de foarte înaltă tensiune, nu poate fi neglijată solicitarea izolației de către tensiunea de serviciu și nici tensiunile induse prin cuplajul electromagnetic și electrostatic dintre canalul descărcării de trăsnet și conductoarele liniei, active și de protecție. Dacă se iau în considerare și aceste elemente, relația de calcul a curentului de protecție la lovirea stâlpilor devine de forma

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%izLEA} - 0,5 \cdot U_f}{(1 - k_{cpa}) \cdot \left(\kappa_1 \cdot R_p + \kappa_1^2 \cdot \frac{L_{st}}{t_f} + 0,5 \cdot \frac{h_{cp}}{t_f} \right) + \left(1 - k_{cpa} \frac{h_{cp}}{h_{ca}} \right) \cdot \frac{h_{ca}}{t_f}}, \quad (31)$$

în care U_f este valoarea efectivă a tensiunii de fază corespunzătoare tensiunii celei mai ridicate a rețelei, dată în kV, iar t_f durata de front a impulsului, dată în μs .

În cazul în care descărcarea de trăsnet lovește conductoarele de protecție, se poate considera că participă la scurgerea curentului de trăsnet la pământ, în mod egal, ambii stâlpi ai deschiderii respective. În această ipoteză,

$$I_{prcp} \cong 2I_{prst}. \quad (32)$$

Ca și în § 1.2, putând fi calculate valorile tuturor curenților de protecție, rezultă probabilitățile de conturare corespunzătoare, P_{cca} , P_{cst} și P_{ccp} , conform relației (5).

4. Numărul specific total de deconectări

Numărul specific de deconectări datorat loviturilor directe de trăsnet poate fi sumat cu numărul specific de deconectări datorate supratensiunilor de trăsnet induse în conductoarele active ale liniei electrice aeriene:

$$n_t = n_d + n_{si}. \quad (33)$$

Numărul specific de conturnări datorat supratensiunilor induse poate fi calculat cu o relație de forma

$$n_{c,si} = \frac{6 \cdot A \cdot B \cdot D_t \cdot h}{U_{50\%iz.LEA}} \cdot e^{-\frac{U_{50\%iz.LEA}}{10 \cdot B}}, \quad (34)$$

în care notațiile au aceeași semnificație ca și în § 1.1, cu specificația că h reprezintă înălțimea medie de suspendare a conductorului situat la cea mai mare altitudine.

Fiind cunoscut numărul specific de conturnări, numărul specific de deconectări rezultă de forma

$$n_{si} = n_{c,si} \cdot P_a, \quad (35)$$

probabilitatea de amorsare a arcului electric de frecvență industrială, P_a , fiind dată de relația (8), cu toate observațiile referitoare la aceasta, date în § 1.1.

Dacă în relația (33) se înlocuiește una dintre relațiile (9) sau (22), funcție de existența conductoarelor de protecție, și relația (35) pentru numărul specific de deconectări datorate supratensiunilor induse, se obține numărul specific total de deconectări.

5. Calculul impedanței caracteristice și a coeficienților de cuplaj capacitiv

a) Impedanța caracteristică a unui conductor paralel cu solul

Se consideră un conductor orizontal, de rază r , situat la înălțimea h în raport cu solul (fig.1).

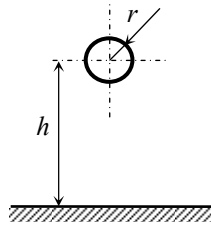


Fig. 1. Dimensiunile geometrice ale unui sistem conductor orizontal - sol

Dacă nu s-a aprins descărcarea corona pe suprafața conductorului, parametrii electrici ai acestuia sunt dați numai de constantele de material și de configurația geometrică a sistemului. Astfel, impedanța caracteristică se calculează cu relația

$$Z = 60 \cdot \ln \frac{2h}{r} \quad [\Omega]. \quad (36)$$

În prezența descărcării corona de impuls se modifică parametrii transversali ai conductorului, aceștia căpătând un caracter dinamic, dependent de evoluția în timp a unde de tensiune. În același timp, forma și amplitudinea unde de tensiune sunt afectate, în procesul său de propagare, de modificarea parametrilor electrici transversali ai conductorului și, implicit, de modificarea parametrilor de propagare. În aceste condiții, este dificil de introdus o corecție foarte precisă asupra parametrilor de propagare. Cu toate acestea se poate considera că impedanța caracteristică a conductorului coronat scade cu o valoare constantă, independentă de valoarea tensiunii. Astfel, relația de calcul a impedanței caracteristice a unui conductor coronat poate fi scrisă sub forma

$$Z_{cor} = \frac{1}{\lambda_1} \cdot 60 \cdot \ln \frac{2h}{r} \quad [\Omega], \quad (37)$$

coeficientul λ_1 fiind egal cu 1,13.

b) Coeficientul de cuplaj capacitiv dintre două conductoare orizontale

Se consideră două conductoare orizontale, având razele r_i și r_j , situate față de sol la înălțimile medii h_i și respectiv h_j , conform construcției grafice din fig. 2.

Dacă distanța dintre centrele conductoarelor se notează cu a_{ij} , iar distanța dintre centrul unui conductor și imaginea în raport cu solul a celui alt conductor cu b_{ij} , atunci coeficientul de cuplaj capacitiv dintre cele două conductoare este dat de relația (38), valabilă pentru cazul în care nu s-a aprins descărcarea corona pe suprafața acestora.

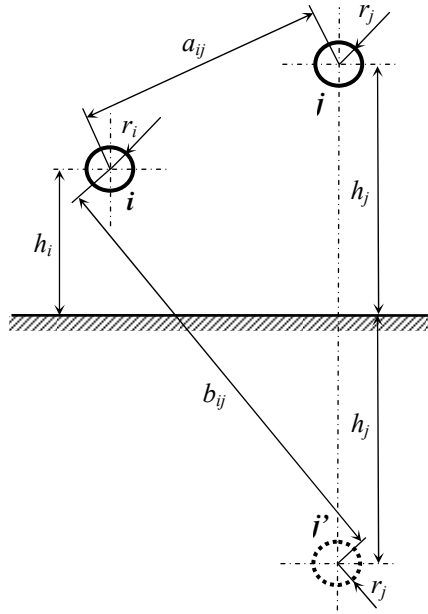


Fig. 2. Dimensiunile geometrice ale unui sistem de două conductoare horizontale

$$k_{ij} = \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} = \frac{\ln \frac{b_{ij}}{a_{ij}}}{\ln \frac{2 \cdot h_i}{r_i}} \quad (38)$$

În prezența descărcării corona crește capacitatea conductoarelor și deci și coeficientul de cuplaj capacitiv dintre acestea. Ca și în cazul modificării impedanței caracteristice, se poate considera că influența descărcării corona este constantă asupra coeficientului de cuplaj, acesta devenind

$$k_{ij,cor} = \lambda_2 \cdot k_{ij}, \quad \lambda_2 = 1,4 \quad (39)$$

Dacă linia este realizată cu conductoare fasciculare, în relațiile de calcul a impedanței caracteristice a conductoarelor și a coeficienților de cuplaj capacitiv, în locul razelor proprii ale conductoarelor se introduc razele echivalente ale acestora, raze ce pot fi calculate cu o relație de forma

$$r_{ech} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_f^{n-1}}, \quad (40)$$

în care n reprezintă numărul de conductoare din fascicul, r raza fiecărui conductor, iar r_f raza de fasciculare, dată de relația

$$r_f = \frac{a}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}}, \quad (41)$$

a reprezentând distanța dintre două conductoare adiacente.

c) calculul coeficienților de cuplaj pentru liniile cu două conductoare de protecție

În cazul în care linia este prevăzută cu două conductoare de protecție, coeficientul de cuplaj se calculează în raport cu un conductor de protecție echivalent, considerat ca fiind unic. Astfel, ecuațiile lui Maxwell scrise pentru sistemul de conductoare din fig. 3, la lovirea de către trăsnet a unuia dintre conductoarele de protecție, este de forma (42).

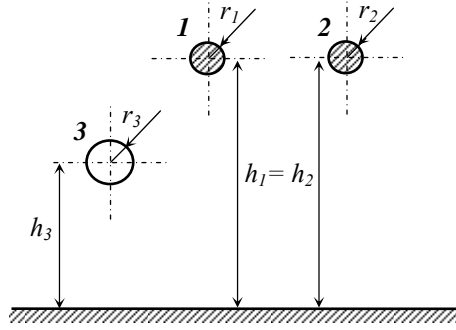


Fig. 3. Reprezentarea schematică a unui sistem cu două conductoare de protecție

$$\begin{cases} U_1 = U_0 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + Z_{13}I_3 \\ U_2 = U_0 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + Z_{23}I_3 \\ U_3 = k_{cpa} \cdot U_0 = Z_{31}I_1 + Z_{32}I_2 + Z_{33}I_3 \\ I_3 = 0 \end{cases} \quad (42)$$

în care matricea impedanțelor Z_{ij} este o matrice simetrică. Ecuațiilor lui Maxwell li s-a adăugat o ecuație de curent. Tensiunea de pe cele două conductoare de protecție este aceeași deoarece ele sunt, la un moment dat, legate galvanic, iar curentul de pe conductorul activ este nul deoarece acesta este izolat față de pământ.

Dacă se fac notațiile:

$$k_{13} = \frac{Z_{13}}{Z_{11}}; \quad k_{12} = \frac{Z_{12}}{Z_{11}}; \quad k_{23} = \frac{Z_{23}}{Z_{22}}, \quad (43)$$

rezolvând sistemul de ecuații (42) în sensul eliminării curenților I_1 și I_2 se obține

$$k_{cpa} = \frac{k_{13} + k_{23}}{1 + k_{12}}, \quad (44)$$

fiecare dintre cei trei coeficienți de cuplaj capacitiv calculându-se, separat, cu o relație de forma (38).

6. Date generale. Observații asupra unor date de intrare

În calculul numărului specific de deconectări, trebuie luate în considerare acele situații care sunt mai probabile, în ceea ce privește lovitura de trăsnet, și acele situații care, analitic, conduc la cea mai mare valoare a numărului specific de deconectări:

- ✓ În cazul lovirii conductoarelor active ale liniilor fără conductor de protecție, se ia în analiză doar conductorul situat la cea mai mare înălțime.
- ✓ În cazul lovirii conductoarelor active ale liniilor cu conductoare de protecție, se ia în considerare doar acel conductor care are unghiul de protecție cel mai mare, acesta fiind și cel mai expus loviturilor directe de trăsnet.
- ✓ În cazul lovirii unui conductor activ se calculează doar coeficientul de cuplaj dintre acesta și conductorul de protecție sau sistemul echivalent de conductoare de protecție (conform § 1.5).
- ✓ În cazul lovirii stâlpilor sau a conductoarelor de protecție, se calculează coeficientul de cuplaj dintre conductorul de protecție și cel mai îndepărtat conductor activ de acesta. În acest fel, coeficientul de cuplaj capacitiv este minim, obținându-se și cea mai mică valoare a curentului de protecție.
- ✓ Deoarece amplitudinea undelor de impuls de tensiune generate de descărcările de trăsnet este mare, cu certitudine se aprinde descărcarea corona de impuls și, în consecință, trebuie introduși coeficienții de corecție în calculul impedanței caracteristice a conductoarelor și în calculul coeficienților de cuplaj capacitiv dintre acestea.

Dintre datele generale de calcul, pot fi enumerate următoarele:

- ✓ Durata frontului undelor de impuls, t_f , se ia egală cu 2 μ s.
- ✓ Impedanța canalului descărcării de trăsnet poate fi considerată ca fiind egală cu

$$Z_k = \frac{Z_{ca}}{2} \cong 200 \ \Omega \quad (45)$$

sau
$$Z_k = 200 \div 400 \ \Omega, \quad (46)$$

însă de cele mai multe ori se utilizează valori ale impedanței canalului descărcării de trăsnet dependente de intensitatea curentului de trăsnet. O astfel de funcție este:

$$\begin{cases} \text{Pentru } I_t = 5 \div 30 \text{ kA} \Rightarrow Z_k = 900 \div 600 \ \Omega \\ \text{Pentru } I_t = 30 \div 200 \text{ kA} \Rightarrow Z_k = 600 \div 300 \ \Omega \end{cases} \quad (47)$$

pe fiecare dintre cele două intervale, variația impedanței canalului descărcării funcție de intensitatea curentului de trăsnet fiind lineară, conform reprezentării din fig. 4.

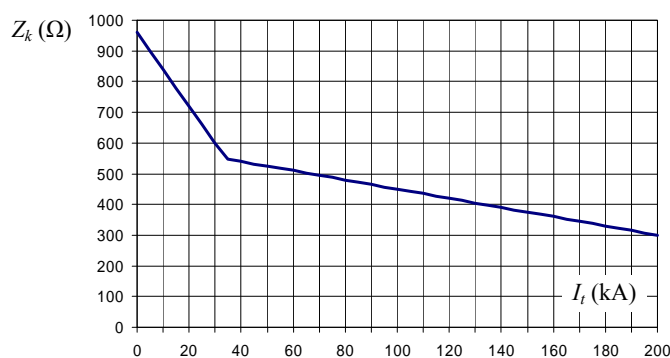


Fig. 4. Dependența impedanței canalului descărcării de trăsnet de intensitatea curentului de trăsnet

Având în vedere caracterul variabil al impedanței canalului descărcării de trăsnet de intensitatea curentului de trăsnet, calculele intensităților curenților de protecție la lovirea conductoarelor active și la lovirea stâlpilor de înaltă tensiune poate deveni iterativ. Calculul este însă rapid convergent dacă se pornește de la o impedanță a canalului descărcării de 900 Ω - pentru lovirea conductoarelor active și de 600 Ω - în cazul lovirii stâlpilor. Cu aceste valori se calculează curenții de protecție corespunzători. Valorile obținute pentru curenții de protecție sunt utilizate pentru determinarea noilor valori ale impedanței canalului descărcării, prin interpolare lineară. Noile valori ale impedanței se reintroduc în calculele de determinare a curenților de protecție corespunzători.

- ✓ Parametrii care intră în legea exponențială de calcul a probabilității de conturare la impuls a izolatoarelor liniilor electrice aeriene sunt dați în tabelul 1.

Tabelul 1. Parametrii de calcul al probabilității de conturare la impuls a izolației

Tipul descărcării	A [u.r.]	B [kA ⁻¹]
Trăsnet negativ unic sau prima descărcare a trăsnetelor multiple	1,51	26
Următoarele componente ale unui trăsnet negativ multiplu	1,32	15
Trăsnet pozitiv	1,00	87
Orice tip de trăsnet	1,11	35

- ✓ În calculul impedanțelor caracteristice ale conductoarelor și al coeficienților de cuplaj capacitiv intervine înălțimea medie de suspendare a conductoarelor. Aceasta se calculează cu o relație de forma

$$h = h_m - 2/3 \cdot f_m, \quad (48)$$

în care h_m reprezintă înălțimea maximă de suspendare a conductorului, iar f_m săgeata acestuia la mijlocul deschiderii dintre doi stâlpi. În consecință, în cazul conductoarelor active nu este suficient să se cunoască doar geometria stâlpului, ci și lungimea lanțurilor de izolatoare cu care acesta este echipat.

- ✓ Pentru a calcula valorile curenților de protecție este necesar să se cunoască tensiunea de conturare la impuls a izolației liniei ($U_{50\%iz.LEA}$). Acest parametru depinde de lungimea liniei de fugă a izolatorului, lungime care se alege și în funcție de gradul de poluare al zonei traversate de linie.

În România sunt normate patru grade de poluare, funcție de acestea în tabelul 2 fiind date lungimile și tensiunile de conturare la impuls de tensiune de trăsnet a câtorva tipuri de izolatoare.

Tabelul 2. Tensiunile de 50 % conturnări ale unor izolatoare pentru linii electrice aeriene

U_n [kV]	Nivel de poluare	Tip izolator	Lungime [mm]	$U_{50\%iz.LEA}$ [kV]	
				Impuls pozitiv	Impuls negativ
20	I, II și III	Ceramică nestrăpungibil IsNs 20	246	125	140
		Ceramică nestrăpungibil IT fs 20	400	125	140
		Compozit ICS-24 K/L	335	160	205
		Compozit ICS 24 A și ICS 24 C	350	160,3	-
	IV	Compozit H24 100... EE 17	420	220	-
110	I	Sticlă CTS 60-1 × 7 elemente	920,5	466	533
	II	Sticlă CTS 60-1 × 9 elemente	1183,5	609	675
	III	Sticlă CTS 60-1 × 11 elemente	1446,5	785	803
	I	Sticlă CTS 120-2p × 7 elemente	1022	475	561
	II	Sticlă CTS 120-2p × 9 elemente	1314	625	698
	III	Sticlă CTS 120-2p × 11 elemente	1606	789	856
	IV	Sticlă CTS 120-2p × 13 elemente	1898	941	995
	I și II	Compozit H120.120.1295TT	1260	618,2	-
III și IV	Compozit EPS 110.120...NN16	1278	690	-	
220	I	Sticlă CTS 120-1 × 11 elemente	1606	810	871
	II	Sticlă CTS 120-1 × 13 elemente	1898	975	1046
	III	Sticlă CTS 120-1 × 15 elemente	2190	1182	1213
	III	Sticlă CTS 120-1 × 17 elemente	2482	1305	1341
	I	Sticlă CTS 120-2p × 11 elemente	1606	797	873
	II	Sticlă CTS 120-2p × 13 elemente	1898	947	1011
	III	Sticlă CTS 120-2p × 15 elemente	2190	1164	1185
	III	Sticlă CTS 160-1 × 14 elemente	2380	1318	1339
IV	Sticlă CTS 160-1 × 16 elemente	2720	1413	1508	

Tabelul 2. (continuare)

400	I și II	Sticlă CTS 160-1 × 19 elemente	3230	1726	1792
	III	Sticlă CTS 160-1 × 21 elemente	3570	1967	1885
	IV	Sticlă CTS 160-1 × 23 elemente	3910	2119	2107

Notă: Nivelul de poluare - I Slab; II Mediu; III Puternic; IV Foarte puternic.

- ✓ Lungimea deschiderii dintre stâlpii adiacenți ai liniilor electrice se alege funcție de tipul stâlpilor utilizați, în concordanță cu zona meteorologică traversată de linie.