

ANALIZA COMPORTĂRII LINIILOR ELECTRICE AERIENE LA SUPRATENSIUNI DE TRĂSNET

1. Introducere

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, curentul de protecție reprezintă valoarea minimă a amplitudinii curentului 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.
-

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

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. Astfel, numărul specific de deconectări datorat loviturilor directe de trăsnet poate fi determinat ca sumă a celor două componente, conform expresiei:

$$n_t = n_d + n_{si}. \quad (1)$$

În cazul liniilor electrice aeriene de medie, fără conductor de protecție, numărul specific de deconectări datorat loviturilor directe de trăsnet se calculează cu relația:

$$n_d = n_{dca} + n_{dst}, \quad (2)$$

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.

Având în vedere și faptul că nu toate conturnările la impuls provoacă deconectarea liniilor, ci numai acelea care se transformă în arc electric de frecvență industrială, relația (2) devine de forma:

$$n_d = 0,47 \cdot 0,6 \cdot h_{ca} \cdot D_t \cdot P_{cca} \cdot P_a + 0,53 \cdot 0,6 \cdot h_{st} \cdot D_t \cdot P_{cst} \cdot P_a, \quad (3)$$

în care, semnificația noilor notații este:

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

h_{st} - înălțimea stâlpilor;

D_t - reprezintă densitatea de trăsnete, în trăsnete/km²·an

P_a - probabilitatea de transformare a conturnării la impuls în arc electric întreținut de tensiunea de serviciu;

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

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

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

$$n_{c,si} = P_a \cdot \frac{6 \cdot A \cdot B \cdot D_t \cdot h}{U_{50\%iz.LEA}} \cdot e^{-\frac{U_{50\%iz.LEA}}{10 \cdot B}}, \quad (4)$$

Modul de calcul a parametrilor care apar în relațiile (3) și (4) este prezentat în continuare.

a) Densitatea de trăsnete - D_t

Se calculează funcție de intensitatea manifestărilor atmosferice din zona traversată de linie, cea mai utilizată relație de calcul fiind de forma:

$$D_t = \frac{1,1 \cdot N_z}{1 + 1,4 \sqrt{N_z}} [\text{trăsnete/km}^2 \cdot \text{an}], \quad (5)$$

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

În baza măsurărilor efectuate, pentru țara noastră au fost stabilite patru zone distincte (A, B, C, D), fiecare caracterizate prin valori diferite ale indicelui keraunic. Aceste zone sunt reprezentate în figura 1, de mai jos:



Fig.1. Valorile indicelui keraunic din țara noastră

b) Probabilitatea de transformare a conturnării la impuls în arc electric întreținut de tensiunea de serviciu - P_a

Această probabilitate se calculează cu relația:

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

în care semnificația notațiilor este:

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

l_{iz} - lungimea izolației a cărei conturare 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.

c) **Probabilitatea de conturnare a izolației la lovirea conductorului activ, respectiv a stâlpului – P_{cca} , P_{cst}**

Probabilitatea de conturnare la impuls de tensiune a izolației liniei 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, la lovirea conductorului activ, respectiv a stâlpului, poate fi calculată cu expresiile:

$$P_{cca} = P(I_t \geq I_{prca}) = A \cdot e^{-\frac{I_{prca}}{B}} \quad (7)$$

$$P_{cst} = P(I_t \geq I_{prst}) = A \cdot e^{-\frac{I_{prst}}{B}} \quad (8)$$

în care parametrii A și B depind de tipul descărcării, sunt dați în tabelul 1.

Tabelul 1. Parametrii de calcul al probabilității de conturnare 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 |

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.

- *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 contorneze izolația unei singure faze. În aceste condiții, relația de calcul a curentului de protecție la lovirea conductoarelor active este:

$$I_{prca} = \frac{U_{50\% iz.LEA}}{Z_{kc}} \text{ [kA]}, \quad Z_{kc} = \frac{Z_k \frac{Z_{ca}}{2}}{Z_k + \frac{Z_{ca}}{2}} \text{ [\Omega]}, \quad (9)$$

semnificația notațiilor fiind:

$U_{50\% iz.LEA}$ – tensiunea de conturnare 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:

$$I_{prst} = \frac{U_{50\% iz.LEA}}{\kappa \cdot R_p + \kappa^2 \frac{L_{st}}{t_f}} \text{ (kA)}, \quad \kappa = \frac{Z_k}{Z_k + R_p} \text{ (\Omega)}, \quad (10)$$

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 unei 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

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%iz.LEA}}{R_p} \text{ [kA]}. \quad (11)$$

- *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:

$$U_{st} = R_p \cdot I_t = U_{ca1}. \quad (12)$$

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

$$U_{ca2} = k_{ca} \cdot U_{ca1}, \quad (13)$$

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:

$$U_{iz} = U_{st} - U_{ca2} = (1 - k_{ca}) \cdot R_p \cdot I_t, \quad (14)$$

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

$$I_{prca} = \frac{U_{50\%iz.LEA}}{(1-k_{ca}) \cdot R_p} \text{ [kA]}. \quad (15)$$

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:

$$I_{prst} = \frac{U_{50\%iz.LEA}}{R_p} \text{ [kA]}, \quad (16)$$

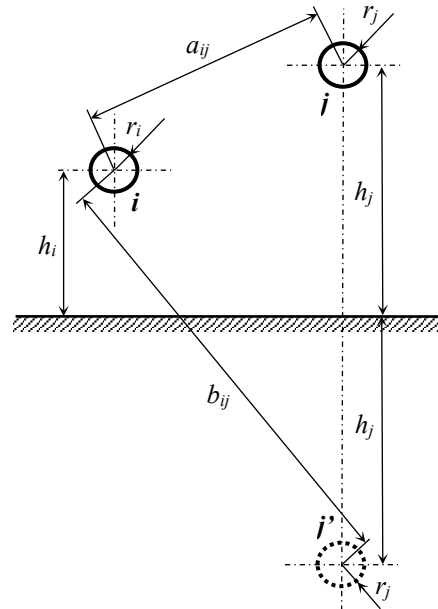
iar dacă nu poate fi neglijată inductanța stâlpilor, în relațiile (15) și (16) R_p se înlocuiește cu expresia de la numitorul relației (10).

Coeficientul de cuplaj capacitiv dintre două conductoare orizontale, k_{ca} , se calculează considerând două conductoare orizontale, cu 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 (17), valabilă pentru cazul în care nu s-a aprins descărcarea corona pe suprafața acestora.

$$k_{ij} = \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} = \frac{\ln \frac{b_{ij}}{a_{ij}}}{\ln \frac{2 \cdot h_i}{r_i}} \quad (17)$$

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



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:

$$k_{ij,cor} = \lambda_2 \cdot k_{ij}, \quad \lambda_2 = 1,4. \quad (18)$$

2. Aplicație numerică - Linie simplă 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. 3);

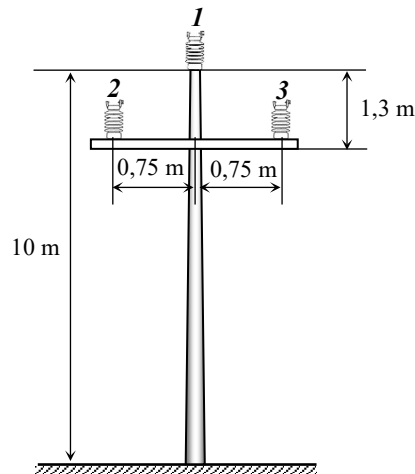


Fig. 3. Dimensiunile geometrice ale unui stâlp de medie tensiune

- *keraunicitatea zonei*: calculele se vor efectua în ipoteza în care linia electrică se află zonele A și C de keraunicitate, utilizând valorile medii specifice celor două zone.