

## 7

## SUPRATENSIUNI DE TRĂSNET

## 7.1. Trăsnetul

**Parametrii descărcării de trăsnet:**

- Valoarea de vârf a curentului primei descărcări și următoarele
- Forma undei de curent
- Numărul de descărcări dintr-un trăsnet

Distribuția statistică a tuturor parametrilor trăsnetului poate fi aproximată cu o lege lognormală, a cărei densitate de probabilitate este de forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x/M)}{\beta}\right]^2} \quad (7.1)$$

$M$  este valoarea mediană, iar  $\beta$  este deviația standard logaritmică. Valoarea mediană este 50/50 statistică. Asta înseamnă că 50% din observații sunt peste această valoare, iar 50% dedesubt.

**Densitatea trăsnetelor la sol**

Obiectivul principal urmărit cu privire la frecvența trăsnetelor este de a stabili numărul de trăsnete care lovesc liniile de transport sau stațiile de transformare. Acest număr poate fi obținut folosind modelul geometric al stadiului final al descărcării de trăsnet sau prin ecuații de regresie. Mărimea de plecare pentru astfel de calcule este densitatea trăsnetelor la sol, notată  $N_g$ , exprimată în trăsnete/km<sup>2</sup>.an. Dacă nu există date certe din observații, se procedează la aproximare plecând de la indicele keraunic – numărul de zile cu furtună într-un an.

Forma generală a unor astfel de ecuații este:

$$N_g = kT_d^a, \quad (7.2)$$

unde  $T_d$  este numărul de zile din an în care apar descărcări atmosferice (indicele keraunic).

Ecuația, adoptată de IEEE și de CIGRE este

$$N_g = 0,04T_d^{1,25} \quad (7.3)$$

Această ecuație furnizează valoarea medie a  $N_g$ . Deviația standard este de cca. 32% din medie.

Relația dintre numărul de ore de furtună dintr-un an,  $T_h$  și densitatea trăsnetelor la sol, propusă de CIGRE, este

$$N_g = 0,05T_h \quad (7.4)$$

## 7.2 Modelul geometric a ultimului stadiu al loviturii de trăsnet

Liderul trăsnetului descendent avansează către sol până la atingerea unui punct de la care începe orientarea către obiectul lovit. Presupunând un gradient critic de străpungere a aerului la polaritatea negativă, de 605 kV/m și un potențial al loviturii de 50000 kV, acest punct este atins atunci când distanța dintre vârful liderului descendent și vârful stâlpului este de  $50000/605 =$

83,3 m. Admițând că ipoteza unui gradient de 605 kV/m este corectă, este necesară o ecuație sau o metodă pentru estimarea potențialului liderului descendent.

Relația între intensitatea curentului loviturii de trăsnet și viteza descărcării inverse:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{500}{I}}} \quad (7.5)$$

unde  $v$  este viteza descărcării inverse în u.r. față de viteza luminii, iar  $I$  este amplitudinea curentului în kA. Astfel, dacă se cunoaște amplitudinea curentului de trăsnet, se poate afla viteza descărcării inverse, iar din aceasta poate fi estimat potențialul liderului descendent:

$$V = 120 \frac{v}{1 - 2,2v^2} \quad (7.6)$$

unde  $v$  este viteza descărcării inverse în u.r. față de viteza luminii, iar potențialul  $V$  rezultă în MV. Din potențialul liderului se găsește distanța de lovire  $r = V/G$  unde  $G = 605$  kV/m este gradientul de străpungere.

De exemplu:  $I = 10$  kA/100 kA,  $v = 0,14/0,408$  u.r.,  $V = 17,55/77,35$  MV,  $r = 29/128$  m.

Totuși, distanța de lovire către stâlp sau conductoare diferă față de distanța de lovire către pământ. Aceasta pare a fi evident, deoarece gradientul de străpungere pentru un interval vârf-placă (intervalul vârf lider-sol) diferă de acela al intervalului vârf-vârf (lider-stâlp). De aceea, în general sunt definite două distanțe de lovire,  $r_c$  pentru conductoarele active sau de protecție și  $r_g$  pentru sol.

Relația de calcul a distanței de lovire are forma generală

$$r = AI^b. \quad (7.7)$$

Au fost propuse mai multe relații de calcul pentru aceste distanțe. CIGRE a adoptat ecuațiile propuse de Brown și Whitehead:

	$r_g$ către pământ		$r_c$ către conductoarele de fază sau de protecție	
	$A$	$b$	$A$	$b$
Brown & Whitehead	6,4	0,75	7,1	0,75

Modelul geometric propus pentru stadiul final al loviturii de trăsnet către un conductor de protecție, este dat în fig. 7.1. Construcția se realizează astfel:

1. Se calculează distanțele de lovire  $r_c$  și  $r_g$  pentru curentul dat  $I$ .
2. Se trasează o linie paralelă cu solul la distanța  $r_g$  de pământ.
3. Se trasează un arc de cerc de rază  $r_c$  cu centrul în vârful stâlpului până ce intersectează dreapta trasată la pct. 2.

Orice trăsnet care ajunge între punctele A și B va lovi conductorul de protecție, iar acelea care ajung la stânga lui A sau la dreapta lui B vor lovi solul. Astfel, fiind dată valoarea amplitudinii curentului, numărul de trăsnete care vor lovi conductorul de protecție este

$$N(G) = 2N_g LD'_g \quad (7.8)$$

unde  $L$  este lungimea liniei.

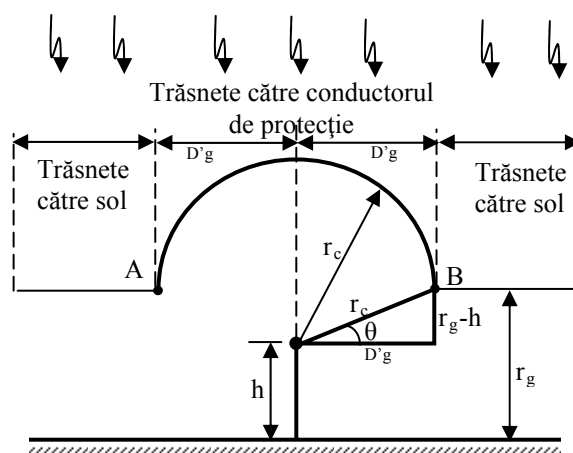


Fig. 7.1 Modelul geometric pentru un conductor de protecție

Aceasta înseamnă că suprafața de colectare a trăsnetelor este dublul produsului dintre lungimea liniei și lățimea zonei  $D'_g$ . Înmulțind cu densitatea trăsnetelor la sol, se obține numărul de lovituri. Probabilitatea de apariție a curentului  $I$  este  $f(I)$  astfel că numărul de lovituri cu intensitatea  $I$  este

$$dN(G) = 2N_g L D'_g f(I) dI \quad (7.9)$$

iar numărul total de trăsnete care lovesc conductorul de protecție este

$$N(G) = 2N_g L \int_3^{\infty} D'_g f(I) dI \quad (7.10)$$

Integrarea este făcută pentru toate valorile curentului de trăsnet. Totuși, trebuie stabilită o limită inferioară pentru curentul de trăsnet, deoarece nu poate exista un trăsnet cu  $I = 0$ . Conform distribuției CIGRE, cel mai mic curent de trăsnet măsurat are 3 kA.

Valoarea  $D'_g$  este valabilă numai dacă  $r_g > h$ . Dacă  $r_g < h$  atunci  $D'_g = r_c$ , în ipoteza trăsnetului vertical.

În cazul a două conductoare de protecție, între care există o distanță  $S_g$ , (fig.7.2) construcția este similară. Numărul de trăsnete care ajung pe conductoarele de protecție este

$$N(G) = N_g L \int_3^{\infty} (2D'_g + S_g) f(I) dI \quad (7.11)$$

### 7.3 Protecția liniilor electrice aeriene împotriva trăsnetului

#### 7.3.1 Numărul specific de conturnări prin defect de ecran, NCDE (SFFOR)

Amplasarea conductoarelor de protecție are ca scop evitarea loviturilor de trăsnet asupra conductoarelor active, dar totuși ecranarea nu poate fi totală. Astfel, se urmărește obținerea unui număr specific de conturnări impus pentru lovirea directă a conductoarelor active, deși există conductoare de protecție. De exemplu NCDE (Numărul specific de Conturnări prin Defect de Ecran = SFFOR Shielding Failure FlashOver Rate) ar putea fi impus la 0,05 defecte/100 km.an.

Se consideră modelul general din fig.7.2, pentru cazul a două conductoare de protecție. Pentru o valoare precizată a curentului de trăsnet, se trasează câte un arc de rază  $r_c$  de la conductorul de fază și de la conductoarele de protecție. Se mai trasează o orizontală la distanța  $r_g$  de suprafața pământului. Intersecțiile acestor arce și intersecția arcelor cu linia orizontală sunt

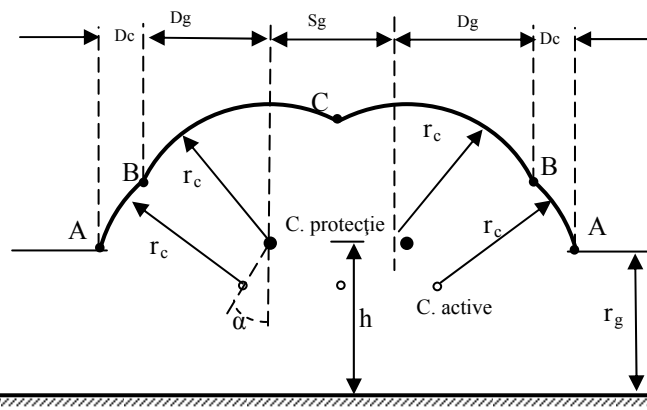


Fig.7.2 – Modelul geometric, definierea distanțelor și unghiurilor

notate A, B și C. Liderii descendenți care ating arcele între A și B vor ajunge pe conductorul de fază. Aceia care ajung pe arce între B și C vor ajunge pe conductorul de protecție, iar cei care ajung dincolo de A vor lovi pământul.

Considerând numai trăsnete verticale, în fig.7.2 se definesc distanțele de expunere  $D_c$  și  $D_g$  pentru conductorul activ și respectiv, de protecție. Numărul de trăsnete care ating conductorul de fază, NDE (Numărul de Defecte de Ecran), este dat de suprafața având laturile  $D_c$  și lungimea liniei,  $L$ , înmulțită cu densitatea de trăsnete la sol și cu 2:

$$NDE = 2N_g L D_c \quad (7.12)$$

Probabilitatea de incidență a curentului este  $f(I)dI$ , astfel că incrementul defectului de ecran,  $d(NDE)$  este

$$d(NDE) = 2N_g L D_c f(I)dI \quad (7.13)$$

iar NDE pentru toate valorile curentului este

$$NDE = 2N_g L \int_0^{I_m} D_c f(I)dI \quad (7.14)$$

$I_m$  este curentul maxim peste care trăsnetele nu mai ajung pe conductorul activ.

În fig. 7.2 se observă că, crescând amplitudinea curentului de trăsnet, raza de lovire a conductoarelor crește, astfel că punctul B se mută spre punctul A. Atunci când cele două puncte se suprapun, trăsnetul nu mai poate lovi conductorul activ. Curentul de trăsnet corespunzător este notat cu  $I_m$ . Orice trăsnet având amplitudinea curentului mai mare decât  $I_m$  poate lovi conductoarele de protecție sau solul.

În fig.7.2 este notat cu  $\alpha$  unghiul de protecție al conductorului activ. Dacă conductorul activ este astfel poziționat încât trăsnetul nu poate atinge conductorul activ, oricare ar fi intensitatea curentului de trăsnet, protecția este totală, iar  $\alpha$  este **unghiul de protecție perfectă**.

NDE este numărul de trăsnete care ajung pe conductorul de fază. Nu toate aceste lovituri produc conturnări. Totuși, dacă tensiunea produsă de trăsnet pe conductor depășește  $U_{50}$ , apare o conturnare. Astfel NDE include și trăsnetele care produc defecte și pe acelea care nu produc defecte. Pentru a determina numărul de conturnări, se ține seama că tensiunea pe conductor și pe izolația liniei este

$$E = I \frac{Z_c}{2} \quad (7.15)$$

unde  $Z_c$  este impedanța caracteristică a conductorului de fază. Dacă tensiunea  $E$  este egală cu  $U_{50}$ , polaritate negativă, atunci curentul critic la care și peste care apare conturnarea este

$$I_c = \frac{2(U_{50})}{Z_c} \quad (7.16)$$

Revizuiind ecuația pentru NDE, se obține NCDE

$$NCDE = 2N_g L \int_{I_c}^{I_m} D_c f(I) dI \quad (7.17)$$

### 7.3.2 Metoda simplificată pentru calculul NCDE

Ecuațiile prezentate trebuie rezolvate prin integrare numerică. O aproximare foarte bună pentru calculul NCDE a fost propusă de J.G. Anderson. Observând că valoarea  $D_c$  este zero dacă  $I = I_m$ , Anderson a propus ca valoarea medie a distanței  $D_c$  în intervalul  $I_c .. I_m$  este jumătate din valoarea  $D_c$  pentru  $I = I_c$ . Mai concret, dacă  $D_{cc}$  este valoarea lui  $D_c$  pentru  $I_c$ , atunci, deoarece  $D_{cc}$  este considerat constant, el poate fi scos de sub integrală, adică:

$$\begin{aligned} NCDE &= 2N_g L \frac{D_{cc}}{2} \int_{I_c}^{I_m} f(I) dI = 2N_g L \frac{D_{cc}}{2} P(I_m \geq I \geq I_c) \\ &= 2N_g L \frac{D_{cc}}{2} [F(I_m) - F(I_c)] = 2N_g L \frac{D_{cc}}{2} [Q(I_c) - Q(I_m)] \end{aligned} \quad (7.18)$$

unde

$$Q(I) = 1 - F(I) \quad (7.19)$$

Dacă nu se dispune de un tabel pentru distribuția normală, o aproximare a distribuției cumulative CIGRE este:

Domeniul de curent, kA	Ecuația aproximativă
3 .. 20	$Q = 1 - 0,31e^{-\frac{Z^2}{1,6}}$
20 .. 60	$Q = 0,5 + 0,35Z$
60 .. 200	$Q = 0,278e^{-\frac{Z^2}{1,7}}$

$Z$  este

$$Z = \frac{\ln I - \ln M_1}{\beta_1} = \frac{\ln I/M_1}{\beta_1} \quad (7.20)$$

Valoarea mediană și abaterea standard ale distribuției CIGRE sunt:

Domeniul de curent, kA	Media $M_1$	$\beta_1$
3 .. 20	61,1	1,33
> 20	33,3	0,605

#### 7.4 Numărul specific de conturnări inverse, NCI

Conductoarele de protecție sunt amplasate astfel ca să minimizeze numărul de lovituri de trăsnet care ajung pe conductoarele active. Majoritatea loviturilor revine conductoarelor de protecție. Curentul unui trăsnet, care lovește stâlpul sau conductorul de protecție, va circula prin stâlp către pământ dar și pe conductoarele de protecție. Izolația unei faze a liniei este supusă diferenței de potențial între stâlpul parcurs de curentul de trăsnet și conductorul fazei, pe care apare o tensiune prin cuplaj capacitiv cu conductorul de protecție. Dacă această tensiune depășește  $U_{50}$ , apare o descărcare, eveniment numit **conturnare inversă**.

Considerând lovitura de trăsnet în stâlp, analiza procesului de propagare pe stâlpul lovit ca și considerarea undelor reflectate de la stâlpii vecini, conduc la relații de calcul pentru tensiunea maximă pe vârful stâlpului,  $V_{TT}$  și într-un punct oarecare de pe stâlp,  $V_{TA}$  ca și pentru tensiunea pe stâlp după trecerea frontului unde de curent,  $V_F$ :

$$V_{TT} = K_{sp} K_{TT} I; \quad V_{TA} = K_{sp} K_{TA} I; \quad V_F = R_e I \quad (7.21)$$

iar curentul prin rezistența prizei de pământ este

$$I_R = \frac{R_e}{R_i} I, \quad (7.22)$$

în care:

$$\begin{aligned} K_{TT} &= R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f}; & K_{TA} &= R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{t_f}; \\ K_{SP} &= 1 - \alpha_R (1 - \alpha_T) \left( 1 - 2 \frac{T_s}{t_f} \right) + \alpha_R \alpha_T \left( 1 - 4 \frac{T_s}{t_f} \right) + \alpha_R^2 \alpha_T^2 \left( 1 - 6 \frac{T_s}{t_f} \right) + \dots \end{aligned} \quad (7.23)$$

În aceste relații:

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \approx \frac{Z_g - 2R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_R = \frac{Z_g}{Z_g + 2R_i}. \quad (7.24)$$

$R_e$  este rezistența echivalentă în vârful stâlpului cu neglijarea impedanței stâlpului.

Spatelul impulsului de tensiune se poate aproxima acoperitor printr-o constantă de timp  $\tau$ :

$$\tau = \frac{Z_g}{R_i} T_s, \quad (7.25)$$

ecuația spatelului impulsului fiind

$$e_{TT} = V_F e^{-(t-t_f)/\tau}. \quad (7.26)$$

Notațiile folosite în relațiile precedente reprezintă:

$t_f$  = durata până la vârful curentului de trăsnet,  $\mu s$

$Z_T$  = impedanța caracteristică a stâlpului,  $\Omega$

$Z_g$  = impedanța caracteristică a conductorului de protecție,  $\Omega$

$T_T$  = durata propagării pe stâlp,  $\mu s$

$T_A$  = durata propagării de la vârf până la punctul A de pe stâlp,  $\mu s$

$T_S$  = durata de parcurgere a intervalului dintre stâlpi,  $\mu s$

$I$  = curentul loviturii de trăsnet, kA

$I_R$  = curentul prin rezistența prizei de pământ a stâlpului lovit, kA

$R_i$  = rezistența prizei de pământ parcursă de curentul de impuls intens,  $\Omega$

$\tau$  = constanta de timp a spatelui impulsului de tensiune,  $\mu s$

Tensiunea de impuls de pe conductorul de protecție produce pe conductorul de fază o tensiune egală cu factorul de cuplaj  $C$  înmulțit cu tensiunea conductorului de protecție,  $CV_{TT}$ . Tensiunea  $V_{TA}$  apare pe stâlp în dreptul conductorului de fază. Astfel, tensiunea maximă pe izolație este:

$$V_I = I(K_{TA} - CK_{TT})K_{SP} \quad (7.27)$$

Tensiunea maximă pe izolație datorată rezistenței prizei de pământ este:

$$V_{IF} = (1 - C)R_e I \quad (7.28)$$

Aceasta este și tensiunea în cazul neglijării căderii de tensiune pe stâlp. Pentru a apărea o conturnare, tensiunea  $V_I$  pe izolator trebuie să egaleze sau să depășească nivelul  $U_{50}$  al izolației.  $U_{50}$  diferă de valoarea pentru impulsul 1,2/50 dacă forma de undă diferă semnificativ. Se va nota cu  $U_{50NS}$  sau  $U_{50}$  în condiții ne-standard. Înlocuind  $V_I$  din rel. (7.27) cu  $U_{50NS}$ , se obține curentul critic  $I_c$  peste care apare conturnarea:

$$I_c = \frac{U_{50NS}}{(K_{TA} - CK_{TT})K_{SP}} \quad (7.29)$$

Deoarece  $K_{TT}$  este de multe ori aproape egal cu  $K_{TA}$  atunci, aproximativ:

$$I_c = \frac{U_{50NS}}{(1 - C)K_{TT}K_{SP}} \quad (7.30)$$

Probabilitatea conturnării izolatorului este probabilitatea ca mărimea curentului de trăsnet să depășească valoarea critică  $I_c$ :

$$P(I \geq I_c) = P(I_c) = \int_{I_c}^{\infty} f(I) dI \quad (7.31)$$

Numărul de conturnări inverse NCI (în engleză, BFR = BackFlash Rate) este această probabilitate multiplicată cu numărul de lovituri  $N_L$  care ajung pe conductorul de protecție:

$$NCI = N_L P(I_c) \quad (7.32)$$

$$N_L = N_g \frac{28h^{0.6} + S_g}{10} \quad (7.33)$$

în care  $h$  este înălțimea stâlpului, m,  $S_g$  este distanța dintre conductoarele de protecție, iar  $N_g$  este densitatea trăsnetelor la sol (tr/km<sup>2</sup>.an), astfel că  $N_L$  rezultă în trăsnete/100 km.an. Astfel și numărul de conturnări inverse, NCI, se referă la 100 km.an.

Relația 7.32 permite calculul NCI. Există, totuși unele efecte neconsiderate până acum:

1. *Trăsnetele în deschidere.* Relațiile obținute pentru tensiunea pe izolație se bazează pe loviturile în stâlpi. Dacă trăsnetele cad între stâlpi, trebuie luat în considerare și efectul acestora.
2. *Rezistența prizei de pământ.* Rezistența care trebuie considerată în relațiile de mai sus, pentru lovituri în stâlpi, este rezistența de impuls,  $R_i$  și nu aceea măsurată,  $R_0$ . Dacă prin sol trece un curent intens, apar descărcări între particulele din sol prin care se măresc esențial dimensiunile electrozilor, scăzând astfel rezistența de dispersie. Sunt necesare metode pentru evaluarea rezistenței de impuls.
3. *Numărul de faze și tensiunea de frecvență industrială.* Până acum a fost luat în considerare un singur conductor. Trebuie analizată situația liniei cu mai multe conductoare. Acest efect este legat de influența tensiunii de frecvență industrială, deoarece atunci când apare impulsul de trăsnet tensiunea de serviciu există. Tensiunea de frecvență industrială are valori instantanee diferite pe fazele liniei, încât conturnarea poate apărea pe faze diferite, ceea ce va mări NCI.
4.  $U_{50NS}$ , forma de undă a tensiunii pe izolație diferă semnificativ de forma standard 1,2/50  $\mu$ s, pe care se bazează  $U_{50}$  standard. Este necesară o metodă de calcul a valorii ne-standard a  $U_{50}$ .
5.  $t_f$ . Valoarea de vârf a tensiunii este funcție de durata frontului curentului. Durata frontului este o mărime probabilistică și care depinde de amplitudinea curentului de trăsnet, deci durata frontului este condiționată de amplitudinea curentului de trăsnet.
7. *Corona.* Efectul descărcării corona este de reducere a impedanței caracteristice a conductorului de protecție și de mărire a factorului de cuplaj ceea ce, potrivit relațiilor de mai sus, produce scăderea NCI. Efectul coronei se exercită numai pe frontul impulsului.

Aceste influențe trebuie evaluate și, dacă este nevoie, trebuie modificate relațiile anterioare. Includerea acestor influențe complică calculul până la necesitatea folosirii unui program pentru calculator.

### ***Influența loviturilor de trăsnet între stâlpi***

Un trăsnet care lovește conductorul de protecție în deschidere produce o tensiune pe intervalul de aer dintre conductorul activ și cel de protecție ca și pe izolator la stâlp. Tensiunea pe izolația de aer o depășește pe aceea de pe izolator, dar ținerea aerului este mai mare decât a izolatorului. Astfel, în funcție de mărimile tensiunilor și nivelele de ținere, descărcarea poate apărea fie prin aer fie pe izolator.

Considerând unele exemple de calcul și fenomenul curentului de predescărcare între conductorul de protecție și conductorul activ, care se poate produce la curent de trăsnet intens, deși sunt posibile străpungeri ale aerului în deschidere, ponderea lor este nesemnificativă față de conturnarea izolatorului la stâlp.



Tensiunile produse la stâlp de trăsnetele care lovesc în deschidere sunt mai mici decât dacă trăsnetul lovește în stâlp. De aceea, dacă NCI se bazează numai pe loviturile în stâlpi, acesta va fi semnificativ mai mare decât dacă se consideră și loviturile în deschidere. O analiză detaliată arată că, dacă NCI se calculează pentru loviturile în stâlpi, acest rezultat trebuie multiplicat cu 0,6. Astfel, rel. 7.38 trebuie modificată astfel:

$$NCI = 0,6 N_L P(I_C) \quad (7.34)$$

### Rezistența la impuls a prizei de pământ

#### a) Prize concentrate – electrozi tijă

Prize concentrate sunt considerate electrozii tijă verticali.

Curenții mari de impuls de trăsnet care circulă prin priza de pământ reduc rezistența acesteia semnificativ sub valoarea măsurată la curent mic. Pentru curent intens, trăsnetul fiind cazul reprezentativ, dacă gradientul tensiunii în sol depășește o valoare critică  $E_0$ , apare străpungerea solului. Mărimea acestui curent se determină cu

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho E_0}{R_0^2} \quad (7.35)$$

$R_0$  este rezistența măsurată la curent mic, iar  $\rho$  este rezistivitatea solului ( $\Omega\text{m}$ ).  $E_0$  este de cca. 400 kV/m.

Pentru prizele concentrate, rezistența în regim de impuls se poate aproxima cu:

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I_R}{I_g}}} \quad (7.36)$$

#### b) Prize radiale orizontale (Fig. 7.3)

Electrozii sunt conductoare orizontale îngropate în sol la o adâncime de cca. 1 m și conectate la baza stâlpului.

Undele de tensiune și de curent, care se proagă prin stâlp, ajung la combinația de priză concentrată  $R_i$  și electrozi orizontali, urmând ca undele de tensiune  $e_c$  și de curent  $i_c$  să se

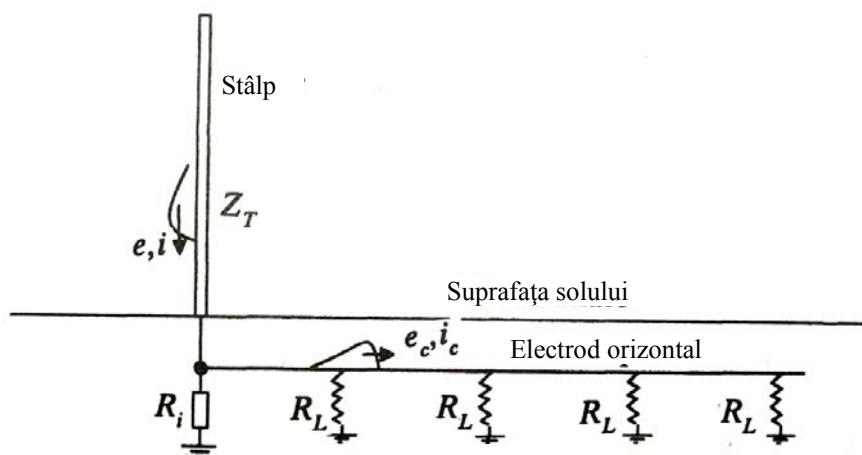


Fig.7.3 Undele de curent și tensiune se propagă pe electrozii orizontali și reduc rezistența prizei de pământ în raport cu timpul

propage prin acești electrozi.

Componentele principale ale impedanței electrozilor orizontali sunt:

1. Inițial, la momentul zero, electrozii orizontali intervin prin impedanța caracteristică  $Z_c$ .
2. La momentul egal cu dublul timpului  $T_C$  de propagare pe electrozi, impedanța este redusă la rezistența totală de dispersie a electrozilor,  $R_C$ .

Performanțe mai bune se obțin cu mai multe segmente mai scurte decât cu un electrod lung.

### Efectele tensiunii de frecvență industrială și a numărului de faze

Până aici, s-a luat în considerare o singură fază și factorul de cuplaj  $C$  între conductorul de protecție și acest conductor de fază. Se consideră acum o linie trifazată și factorii de cuplaj  $C_A$ ,  $C_B$  și  $C_C$  ca în fig.7.4. De asemenea, tensiunile la stâlp vor fi diferite pentru fiecare dintre faze,  $V_{TA}$ ,  $V_{TB}$  și  $V_{TC}$ . Tensiunile de impuls pe izolațiile celor trei faze,  $V_{IA}$ ,  $V_{IB}$  și  $V_{IC}$  sunt date de relațiile:

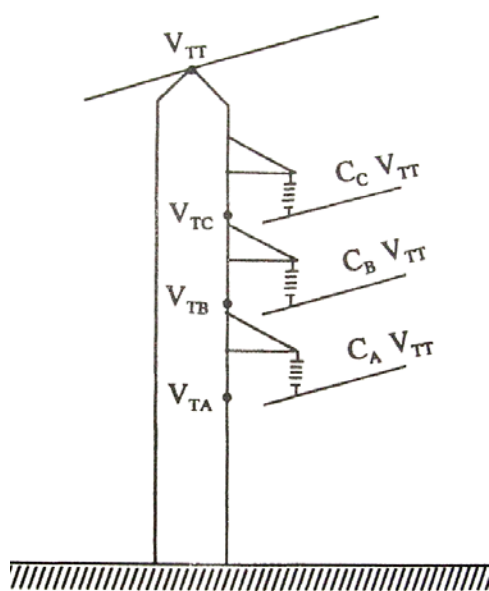


Fig.7.4 Linie trifazată : factorii de cuplaj și tensiunile pe stâlp

$$\begin{aligned} V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I \\ V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I \\ V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I \end{aligned} \quad (7.37)$$

Dacă valoarea de vârf a tensiunii de fază este  $V_{LN}$ , atunci considerând tensiunile de frecvență industrială, rezultă:

$$\begin{aligned} V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin \omega t \\ V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t - 120) \\ V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t + 120) \end{aligned} \quad (7.38)$$

Considerând că  $U_{50}$  pentru toate fazele sunt egale și aplicând aceste tensiuni pe izolație, dacă sunt egale cu  $U_{50NS}$ , curenții critici pentru fiecare fază vor fi:

$$\begin{aligned} I_{CA} &= \frac{U_{50NS} - V_{LN} \sin \omega t}{(K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP}} \\ I_{CB} &= \frac{U_{50NS} - V_{LN} \sin(\omega t - 120)}{(K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP}} \\ I_{CC} &= \frac{U_{50NS} - V_{LN} \sin(\omega t + 120)}{(K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP}} \end{aligned} \quad (7.39)$$

Astfel, calculul NCI devine mai complicat, deoarece sunt mai mulți curenți critici. Evident, cel mai mic dintre acești curenți este decisiv. Astfel, dacă o fază contornează, aceasta este considerată ca o conturnare a liniei.

Un procedeu aproximativ, ușor de folosit și având o precizie rezonabilă, folosește următoarea relație pentru curentul critic:

$$I_C = \frac{U_{50NS} - K_{PF} V_{LN}}{K_{SP} (K_{TA} - C_A K_{TT})} = \frac{U_{50NS} - V_{PF}}{K_{SP} (K_{TA} - C_A K_{TT})}, \quad (7.40)$$

în care:

•  $K_{PF}$  este un factor pentru tensiunea de frecvență industrială care variază în funcție de configurația fazelor. Pentru coronament vertical, ca în cazul liniilor dublu circuit,  $K_{PF}$  variază între 0,25 și 0,55 în funcție de raportul dintre tensiunea nominală a liniei și  $U_{50}$ . Valoarea medie recomandată este  $K_{PF} = 0,40$ . Pentru așezare orizontală a fazelor,  $K_{PF}$  variază între 0,65 și 0,76 iar valoarea medie recomandată este 0,70. În cazuri în care mărimea  $K_{PF}$  nu este sigură se adoptă valoarea 0,70.

- $C_A$  este cel mai redus factor de cuplaj
- $K_{TA}$  este considerat pentru aceeași fază pentru care s-a selectat factorul de cuplaj minim.

### **Valoarea nestandard a $U_{50}$ , $U_{50NS}$**

Forma de undă a tensiunii pe izolația stâlpului, este departe de aceea a impulsului de trăsnet standard 1,2/50. Toate datele privind ținerea izolației la impuls de trăsnet consideră forma standard a impulsului, astfel că sunt necesare metode pentru determinarea  $U_{50NS}$  în cazul unor impulsuri nestandard exprimat în funcție de valoarea standard.

Se folosesc în prezent, mai multe metode de calcul a  $U_{50}$  în condiții nestandard. Se va lua în considerare metoda modelării directe a procesului de descărcare, numită **metoda liderului progresiv, LPM**. Deși modelul LPM se poate folosi direct într-un program de calcul, o metodă bună este de a obține din acesta o relație de regresie.

Dacă se neglijează componenta de tensiune pe stâlp, se obține relația:

$$\frac{U_{50NS}}{U_{50}} = \left( 0,977 + \frac{2,82}{\tau} \right) \left[ 1 - 0,2 \frac{V_{PF}}{U_{50}} \right] \quad (7.42)$$

### **Durata până la vârf a impulsului de curent**

Tensiunea pe izolație crește dacă scade durata până la vârful curentului de trăsnet. Aceasta se întâmplă datorită componentei de tensiune pe stâlp,  $\Delta V$ . Astfel curentul critic crește odată cu creșterea duratei până la vârf. Teoretic, trebuie considerate toate duratele de front. Pentru aceasta, mai întâi trebuie modificată relația pentru NCI de la:

$$NCI = 0,6N_L P(I_c) \quad (7.43)$$

într-o relație condițională, respectiv, NCI dat pentru un anumit timp de front:

$$NCI | t_f = 0,6N_L \int_{I_c}^{\infty} f(I | t_f) dI = 0,6N_L P(I_c | t_f) \quad (7.44)$$

Astfel, pentru a considera toate fronturile, ecuația trebuie integrată pentru toate duratele de front sau

$$NCI = \int_0^{\infty} (NCI | t_f) f(t_f) dt_f \quad (7.45)$$

sau, ca o integrală dublă

$$NCI = 0.6N_L \int_0^{\infty} \int_{I_c}^{\infty} f(I|t_f) dI dt_f \quad (7.46)$$

Se dorește simplificarea acestei proceduri folosind o singură valoare a frontului astfel ca aceasta să conducă la același NCI ca și în cazul procedurii complete. Concluzia este că NCI se poate calcula folosind o singură valoare pentru timpul până la vârf, dată de rel. 7.53.

$$t_f = 0,207I_c^{0,53} \quad (7.47)$$

### ***Influența descărcării corona***

Peste tensiunea inițială corona, pe frontul impulsului impedența conductorului de protecție scade și crește factorul de cuplaj. De exemplu, impedența conductorului de protecție scade cu 30-60%, iar factorul de cuplaj,  $C$ , crește cu același procente. Curentul critic crește cu cât  $(1 - C)$  scade. Scăderea  $(1 - C)$  este de cca. jumătate din creșterea lui  $C$ .

Nu este de așteptat ca descărcarea corona să aibă un efect important asupra NCI. Cu puțină precauție, corona se poate neglija.