

SUPRATENSIUNI DE TRĂSNET Partea II – Conturnarea inversă

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 :

$$V_{TT} = K_{sp} K_{TT} I; \quad V_{TA} = K_{sp} K_{TA} I; \quad V_F = R_e I \quad (21)$$

iar curentul prin rezistența prizei de pământ este

$$I_R = \frac{R_e}{R_i} I, \quad (22)$$

în care:

$$\begin{aligned} K_{TT} &= R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f}; & K_{TA} &= R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{t_f}; \\ K_{SP} &= 1 - \alpha_R (1 - \alpha_T) \left(1 - 2 \frac{T_s}{t_f} \right) + \alpha_R \alpha_T \left(1 - 4 \frac{T_s}{t_f} \right) + \alpha_R^2 \alpha_T^2 \left(1 - 6 \frac{T_s}{t_f} \right) + \dots \end{aligned} \quad (23)$$

În aceste relații:

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \approx \frac{Z_g - 2R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_R = \frac{Z_g}{Z_g + 2R_i}. \quad (24)$$

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

Spatele impulsului de tensiune se poate aproxima acoperitor printr-o constantă de timp τ :

$$\tau = \frac{Z_g}{R_i} T_s, \quad (25)$$

ecuația spatelui impulsului fiind

$$e_{TT} = V_F e^{-(t-t_f)/\tau} \quad (26)$$

Notațiile folosite în relațiile precedente reprezintă:

t_f = durata până la vârful curentului de trăsnet, μs

Z_T = impedanța caracteristică a stâlpului, Ω

Z_g = impedanța caracteristică a conductorului de protecție, Ω

T_T = durata propagării pe stâlp, μs

T_A = durata propagării de la vârf până la punctul A de pe stâlp, μs

T_s = durata de parcurgere a intervalului dintre stâlpi, μs

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, Ω

τ = constanta de timp a spatelui impulsului de tensiune, μs

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:

$$V_I = I(K_{TA} - CK_{TT})K_{SP} \quad (27)$$

Tensiunea maximă pe izolație datorată rezistenței prizei de pământ este:

$$V_{IF} = (1 - C)R_e I \quad (28)$$

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. (27) cu U_{50NS} , se obține curentul critic I_c peste care apare conturnarea:

$$I_c = \frac{U_{50NS}}{(K_{TA} - CK_{TT})K_{SP}} \quad (29)$$

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

$$I_c = \frac{U_{50NS}}{(1 - C)K_{TT}K_{SP}} \quad (30)$$

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

$$P(I \geq I_c) = P(I_c) = \int_{I_c}^{\infty} f(I) dI \quad (31)$$

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:

$$NCI = N_L P(I_c) \quad (32)$$

$$N_L = N_g \frac{28h^{0.6} + S_g}{10} \quad (33)$$

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

Relația 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 μs , 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:

$$NCI = 0,6 N_L P(I_C) \quad (34)$$

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

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho E_0}{R_0^2} \quad (35)$$

R_0 este rezistența măsurată la curent mic, iar ρ este rezistivitatea solului (Ωm). E_0 este de cca. 400 kV/m.

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

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I_R}{I_g}}} \quad (36)$$

b) Prize radiale orizontale (Fig. 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 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.

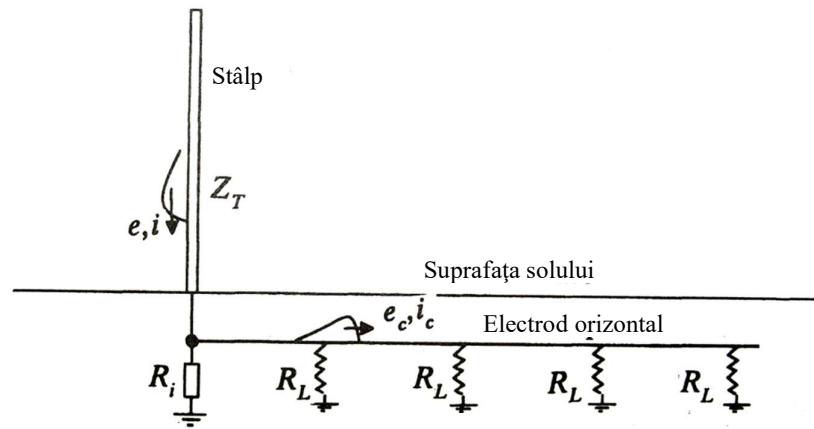


Fig3 Undele de curent și tensiune se propagă pe electrozii orizontali și reduc rezistența prizei de pământ în raport cu timpul

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:

$$\begin{aligned} V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I \\ V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I \\ V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I \end{aligned} \quad (37)$$

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

$$\begin{aligned} V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin \omega t \\ V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t - 120) \\ V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t + 120) \end{aligned} \quad (38)$$

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:

$$\begin{aligned} I_{CA} &= \frac{U_{50NS} - V_{LN} \sin \omega t}{(K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP}} \\ I_{CB} &= \frac{U_{50NS} - V_{LN} \sin(\omega t - 120)}{(K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP}} \\ I_{CC} &= \frac{U_{50NS} - V_{LN} \sin(\omega t + 120)}{(K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP}} \end{aligned} \quad (39)$$

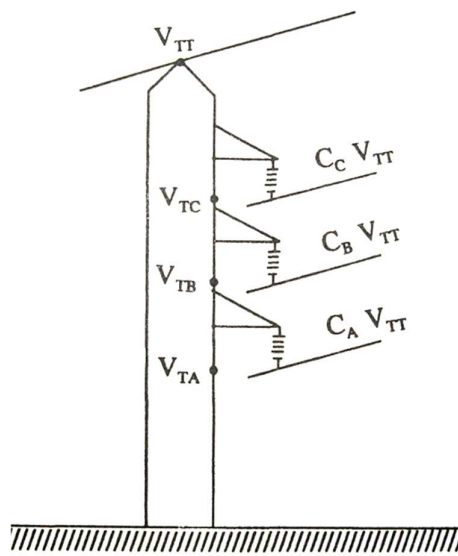


Fig.4 Linie trifazată : factorii de cuplaj și tensiunile pe stâlp

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:

$$I_C = \frac{U_{50NS} - K_{PF}V_{LN}}{K_{SP}(K_{TA} - C_A K_{TT})} = \frac{U_{50NS} - V_{PF}}{K_{SP}(K_{TA} - C_A K_{TT})}, \quad (40)$$

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.

Determinarea valorii 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**.

Se consideră mai întâi procesul de descărcare ilustrat în fig.5 pentru un interval de lungime d pe care se aplică impulsul de tensiune. După dezvoltarea strimerilor, începe să se formeze liderul dacă gradientul tensiunii depășește o valoare E_0 . În timp ce liderul avansează, tensiunea pe interval crește, iar distanța dintre lider și electrodul legat la pământ scade, astfel crescând gradientul de potențial pe spațiul rămas, notat cu x în fig.5. Datorită creșterii gradientului tensiunii, viteza v a liderului crește. Acest proces continuă până ce liderul atinge celălalt electrod, deci apare străpungerea.

Modelul LPM constă dintr-o ecuație pentru viteza de propagare a liderului. Ecuația aleasă de CIGRE, este:

$$v(t) = k_L e(t) \left[\frac{e(t)}{x} - E_0 \right] \quad (41)$$

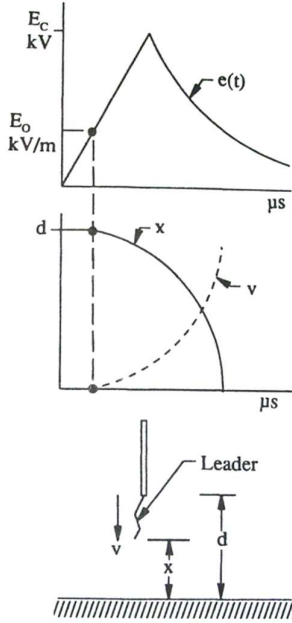


Fig.5 Procesul de străpungere

unde $v(t)$ este viteza liderului, $e(t)$ este tensiunea din fig.5, E_0 este gradientul critic de formare a liderului, x este distanța dintre vârful liderului și electrodul opus, iar k_L este o constantă. Valoarea E_0 depinde în primul rând de configurația intervalului sau, mai concret, de gradientul critic de descărcare pentru impuls standard de trăsnet, în timp ce valoarea lui k_L depinde, în primul rând de panta curbei tensiune-timp pentru impulsul de tensiune standard.

Procedeeul de calcul constă în determinarea vitezei la fiecare moment, calculând dezvoltarea liderului la fiecare moment (discret, pe durate Δt foarte mici în raport cu durata de front a impulsului de curent), apoi lungimea totală a liderului, care trebuie scăzută din lungimea intervalului pentru a afla noua valoare pentru x . Procesul continuă până la parcurgerea de către lider a întregului interval. Această metodă este numită modelul liderului progresiv sau LPM.

Deși LPM se poate folosi direct într-un program de calcul, o metodă bună este de a obține din acesta o relație de regresie pentru o formă a tensiunii ca în fig.7.5.

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

$$\frac{U_{50NS}}{U_{50}} = \left(0.977 + \frac{2.82}{\tau} \right) \left[1 - 0.2 \frac{V_{PF}}{U_{50}} \right] \quad (42)$$

Durata până la vârful 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, ΔV . 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:

$$NCI = 0.6N_L P(I_c) \quad (43)$$

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

$$NCI | t_f = 0.6N_L \int_{I_c}^{\infty} f(I | t_f) dI = 0.6N_L P(I_c | t_f) \quad (44)$$

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

$$NCI = \int_0^{\infty} (NCI | t_f) f(t_f) dt_f \quad (45)$$

sau, ca o integrală dublă

$$NCI = 0.6N_L \int_0^{\infty} \int_{I_c}^{\infty} f(I | t_f) dI dt_f \quad (46)$$

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.

$$t_f = 0,207 I_c^{0,53} \quad (47)$$

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.