

Supratensiuni de comutație în stațiile de transformare

1 Particularitățile coordonării izolației în stațiile de transformare

Ca și pentru liniile de transport, supratensiunile de comutație pot deveni importante pentru stațiile a căror tensiune nominală este egală sau mai mare de 345 kV. Diferențele între coordonarea izolației liniilor și a stațiilor de transformare sunt:

1. Trebuie coordonată izolația stației cu aceea a liniilor
2. Numărul de izolații în paralel este mai redus $n = 5 - 10$.
3. Factorul de profil longitudinal al supratensiunilor nu are sens datorită distanțelor mult mai mici între izolațiile în paralel.
4. Izolațiile din stație nu au toate aceeași ținere.
5. Valorile factorilor K_f , K_G sau K_E pot fi altele, deoarece numărul de izolații este mic și de aceea valoarea σ_0 nu poate fi semnificativ mai mare decât σ_{fn} .
6. Valoarea de proiect pentru NDSC în cazul stațiilor poate fi cu un ordin de mărime mai mică decât pentru linii.

1.1 Coordonarea izolațiilor stației și a liniei

Considerând izolația stației ca izolația sfârșitului liniei, dacă nu se folosesc descărcătoare pe partea dinspre linie a întrerupătorului, o primă regulă pentru a nu deteriora izolația liniei, este ca ținerea în stație, pentru impulsurile de comutație, să fie egală sau mai mare decât a liniei. Alfel spus, V_3 , nivelul de ținere la supratensiuni de comutație pentru stație trebuie să fie egal sau mai mare decât valoarea similară pentru linie. Acest criteriu necesită fie mărirea ținerii izolației stației la impulsuri de comutație, fie folosirea descărcătoarelor la sfârșitul liniilor.

Folosirea descărcătoarelor pe partea dinspre linie a întrerupătoarelor separă, în principiu, stația de linie. În acest caz, izolația stației poate fi aleasă pe baza caracteristicilor descărcătoarelor fără consecințe asupra izolației liniilor.

1.2 Numărul de izolații în paralel

În stație numărul izolatoarelor în paralel este, de regulă, între 5 și 10, ceea ce este mult mai puțin decât pentru linii, unde de obicei $n = 100 - 1000$. De exemplu, considerând schema cu un întrerupător și jumătate din fig. 1, izolația stației, supusă supratensiunii de comutație la conectarea liniei din stânga în gol, constă dintr-un izolator suport, două separatoare, două întrerupătoare deschise și una sau mai multe distanțe de aer, deci $n = 5 - 10$.

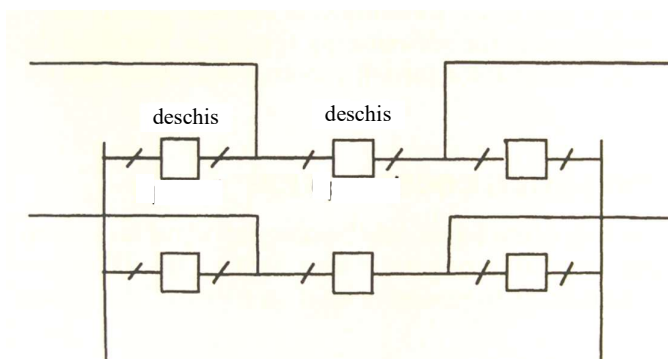


Fig.1 Schema cu $1 \frac{1}{2}$ întrerupătoare pe circuit având două întrerupătoare deschise

1.3 Țineri diferite ale izolațiilor

Nivelul de izolație al echipamentelor din stație poate fi diferit. De aceea, ecuația NDSC se modifică astfel:

$$NDSC = \frac{1}{2} \int_{E_1}^{E_m} f(V) \left[1 - \prod_{i=1}^n q_i \right] dV \quad (1)$$

în care, ca mai înainte, $f(V)$ este funcția densității de probabilitate a supratensiunilor de comutație, q_i este probabilitatea de lipsă a descărcărilor pentru fiecare aparat, iar n este numărul de izolații în paralel. E_1 este supratensiunea minimă, de obicei 1 u.r. (în raport cu tensiunea maximă fază-pământ), iar E_m este supratensiunea maximă.

NDSC pentru izolația stației este impus de aparatul sau distanța izolantă care au ținerea minimă. De exemplu, pentru $n = 5$, scăderea ținerii cu 10% pentru toate izolațiile mărește NDSC cu cca. 500%, iar reducerea ținerii numai pentru o izolație cu 10%, mărește NDSC cu cca. 250%. De aceea, calculul acoperitor al NDSC în stații, va presupune că toate izolațiile au același nivel de ținere. Astfel rel.1 se poate simplifica:

$$NDSC = \frac{1}{2} \int_{E_1}^{E_m} f(V) [1 - q^n] dV \quad (2)$$

1.4 Evaluarea NDSC pentru distanțele de izolație în aer

Pentru liniile aeriene a fost dezvoltată o metodă pentru a determina distanța izolantă folosind factorii K_f și K_G . Metoda a fost obținută considerând că numărul de izolații este mare, de ordinul 100 – 1000, astfel încât caracteristica izolației devine atât de abruptă că poate fi aproximată printr-o singură valoare, U_{50n} . Deoarece în stații numărul de izolații în paralel este mic, această ipoteză nu mai este total valabilă. Adică, valoarea σ_m poate să nu mai fie nesemnificativă în comparație cu σ_0 . Pentru a folosi tot metoda simplificată, se face o mică corecție a valorilor K_f și K_G . Valorile corectate sunt date în tabelele 1 și 2.

Anticipând influența descărcătoarelor, valorile K_G sunt date pentru valori reduse ale σ_0/E_2 . Iar anticipând metodele fază-fază, în Tabelul 2 este dată o valoare pentru parametrul Z_e al distribuției Gauss.

Tabelul 6.1 Valori modificate ale K_f pentru stații

n	K_f pentru $\sigma_f/U_{50} = 7\%$
5	0,890
10	0,910

Tabelul 2 Valori modificate ale K_G

Distribuție Gauss: K_G pentru $\sigma_0/E_2 =$						
NDSC	Z_e	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15
1/10	0,8415	0,99	0,97	0,93	0,86	0,80
1/100	2,0542	1,07	1,05	1,02	1,00	0,99
0,5/100	2,3268	1,09	1,07	1,04	1,03	1,03
1/1000	2,8785	1,13	1,12	1,09	1,09	1,12

1.5 Ținerea izolației stației

Relații de calcul a ținerii

Ținerea izolației poate fi specificată prin U_{50} , prin U_{10} sau prin V_3 . Între acestea există relațiile:

$$V_3 = U_{50} \left(1 - \frac{3\sigma_f}{U_{50}} \right) \quad (3)$$

$$U_{10} = U_{50} \left(1 - 1,28 \frac{\sigma_f}{U_{50}} \right) \quad (4)$$

Se recomandă $\sigma_f / U_{50} = 0,07$.

Distanțele izolante

Factorii de interval pentru cazurile tipice sunt dați în Tabelul 3. Deoarece valorile mari ale σ_f / U_{50} conduc la distanțe izolante mai mari, se recomandă o valoare acoperitoare de 7% din U_{50} , ca în tab. 3. Ploaia sau umiditatea nu reduc semnificativ ținerea intervalelor de aer. Intervalul conductor-structură laterală reprezintă cazul conductorului care trece printr-un stâlp portal. Intervalul conductor-tijă inferioară reprezintă vârful unui separator deschis pe bara inferioară către conductorul de pe bara superioară. Factorii de interval tijă-plan nu apar de obicei niciodată. Intervalele tijă - tijă vertical sau orizontal pot fi utilizate pentru intervale mari între inele ecran de diametre mici. Intervalele conductor-plan apar între faze și pământ. Totuși acest interval este rareori important deoarece chiar dacă factorul de interval este mic, distanța la pământ este mare comparativ cu alte distanțe. Practic, cel mai mic factor de interval în stații este 1,3 ceea ce de obicei este acoperitor.

Tabelul 3 Valori tipice ale factorilor de interval k_g pentru izolația fază-pământ

Intervalul	Domeniul de valori k_g	Valori tipice ale k_g	σ_f / U_{50}
Tijă-plan	1,00	1,00	0,07
Tijă-tijă (vertical)	1,25-1,35	1,30	0,07
Tijă-tijă (orizontal)	1,25-1,45	1,35	0,07
Conductor-structură laterală	1,25-1,40	1,30	0,07
Conductor-tijă inferioară	1,40-1,60	1,50	0,07
Conductor-plan	1,15	1,15	0,07
Izolator suport	1,18	1,18	0,07
Stâlp, faza centrală	-	0,96 (1,20)	0,05
Stâlp, faza laterală	-	0,96 (1,30)	0,05
Lanț de izolatoare	-	0,96 (1,30)	0,05

U_{50} este dat de relația:

$$U_{50} = k_g \frac{3400}{1 + 8/S} \quad (5)$$

în care S este distanța izolantă, m, iar U_{50} este valabilă pentru condiții atmosferice standard.

Aparatele

În standarde, tensiunile de ținere la impulsuri de comutație sunt date pentru prezența umidității. Cu excepția transformatoarelor, ținerea se specifică numai pentru tensiuni nominale de 345 kV și mai mult. Pentru

întrerupătoare, ținerea este mai mare în poziția deschis decât în poziția închis. Pentru separatoare și izolatoarele suport ținerea nu este indicată. Pentru izolatoare suport este propusă relația:

$$U_{10} = 1,07 \frac{3400}{1 + 8/S} \quad (6)$$

sau, folosind rel. 4

$$U_{50} = 1,187 \frac{3400}{1 + 8/S} \quad (7)$$

unde U_{10} și U_{50} se referă la condiții standard în prezența umidității. Factorul de interval egal cu 1,18 este dat și în Tab 3. Pentru impulsuri de trăsnet, în condiții atmosferice standard se folosește relația:

$$U_{10TS} = 450S \quad (8)$$

unde S este înălțimea izolatorului sau distanța izolantă, în metri.

1.6 Valoarea de proiect a NDSC

Valoarea uzuală de proiect pentru NDSC în cazul liniilor este 1 pentru 100 manevre cu întrerupătoare. Considerând că urmările unei avarii sau descărcări în stație sunt mai mari decât pentru linii, NDSC pentru stații ar trebui să fie cu un ordin de mărime mai mic decât pentru linii. Astfel, uneori de utilizează o valoare de 1/1000, deși se pare că valoarea de 1/100 este utilizată mult mai frecvent.

1.7 Recapitularea relațiilor de calcul

$$\delta = e^{-A/8.6} \quad (9)$$

$$U_{50A} = \delta^m U_{50S} \quad U_{10CA} = \delta^m U_{10CS} \quad (10)$$

$$U_{50S} = k_g \frac{3400}{1 + 8/S} \quad (11)$$

$$m = 1.25G_0(G_0 - 0.2) \quad G_0 = \frac{U_{50S}}{500S} \quad (12)$$

$$S = \frac{8}{\frac{3400k_g \delta^m}{U_{50A}} - 1} = \frac{8}{\frac{3400k_g}{U_{50S}} - 1} \quad (13)$$

Deoarece valoarea lui K_f a fost modificată pentru stații, atunci când se calculează NDSC este mai bine să se folosească ecuațiile pentru distribuția Gauss a supratensiunilor.

$$NDSC = \frac{1}{2} [1 - F(Z_e)]$$

$$Z_e = 2,054 - \frac{1 - \frac{V_3}{E_2} \frac{1}{K_f}}{\frac{\sigma_0}{E_2}} \quad (14)$$

1.8 Exemplul 1: Calculul NDSC

Într-o stație cu tensiunea nominală de 500 kV se consideră pentru toate aparatele, $U_{10} = 850$ kV. Distribuția supratensiunilor este de tip Gauss având $E_2 = 808$ kV (1,8 u.r.) și $\sigma_0/E_2 = 0,10$. Se consideră 10 izolatoare în paralel, deci $n = 10$, iar $\sigma_f/U_{50} = 0,07$.

Din rel.4, rezultă:

$$U_{10} = U_{50} \left(1 - 1,28 \frac{\sigma_f}{U_{50}} \right) = U_{50} (1 - 1,28 * 0,07) = 0,91 U_{50}, \text{ respectiv } U_{50} = \frac{U_{10}}{0,91} = \frac{850}{0,91} = 934 \text{ kV} .$$

Apoi

$$V_{3S} = U_{50} \left(1 - 3 \frac{\sigma_f}{U_{50S}} \right) = 934 (1 - 3 * 0,07) = 738 \text{ kV} , \text{ iar raportul } \frac{V_{3S}}{E_2} = \frac{738}{808} = 0,9134$$

Din tabelul 1, $K_f = 0,91$. Apoi, folosind relația 14,

$$Z_e = 2,054 - \frac{1 - \frac{V_3}{E_2} \frac{1}{K_f}}{\frac{\sigma_0}{E_2}} = 2,054 - \frac{1 - 0,9134 * \frac{1}{0,91}}{0,10} = 2,091.$$

Acestei valori îi corespunde, în tabelul 3.2, probabilitatea 0,98174.

Apoi:

$$NDSC = \frac{1}{2} [1 - F(Z_e)] = \frac{1}{2} (1 - 0,98174) = 0,00913 \text{ sau } NDSC = 0,91/100 \text{ comutații.}$$

1.9 Exemplul 2: Determinarea distanței de izolație și U_{10}

Se consideră aceeași stație ca mai sus, cu excepția izolației care trebuie aleasă plecând de la NDSC = 1/100. Se consideră inițial, amplasarea la nivelul mării.

Din Tab 1 și 2, rezultă $K_f = 0,91$ și $K_G = 1,0$, astfel că $V_3/E_2 = 0,91$. Urmează $V_3 = 735$ kV, $U_{50} = 931$ kV, $U_{10} = 847$ kV. Cu ajutorul rel. 13, în care $k_g = 1,3$, distanța izolantă rezultă de 2,13 m.

S-a afirmat mai sus că V_3 pentru stație trebuie să fie egal sau mai mare decât pentru linie. Pentru linie se va considera $n = 500$ și $E_S/E_R = 0,9$. Rezultă $n_e = 100$, iar pentru NDSC = 1/100, raportul V_3/E_2 trebuie să fie de 0,9693, iar $V_3 = 783$ kV pentru linie. Deoarece această valoare este mai mare decât 735 kV găsită pentru stație, izolația stației trebuie proiectată la $V_3 = 783$ kV. Aceasta este situația întotdeauna deoarece pentru aceeași valoare NDSC, factorii K_G pentru stație și pentru linie sunt aproximativ egali, dar K_f pentru linie este mai mare deoarece numărul de izolații în paralel este mai mare decât în stație. Adoptarea valorii $V_3 = 783$ kV pentru stație conduce la NDSC = 2,12/100. Din Tab 1 și 2, pentru NDSC = 1/100 rezultă $V_3/E_2 = 0,9919$, ceea ce înseamnă $V_3 = 801$ kV, mai mare decât cei 783 kV pentru linie.

Valoarea necesară $V_3 = 783$ kV conduce la $U_{50} = 991$ kV și un U_{10} necesar de 902 kV. Pentru a determina distanțele necesare, se folosește rel. 13 cu factorul de interval de 1,3 și densitatea relativă a aerului egală cu 1,00. Rezultă $S = 2,31$ m.

Se va considera că stația se află la 1500 m altitudine. Valorile necesare pentru U_{50} , U_{10} și V_3 sunt aceleași ca înainte, dar ele sunt cerute la 1500 m. Astfel ele sunt $U_{50A} = 991$ kV, $U_{10CA} = 902$ kV, $V_{3A} = 783$

kV. O primă estimare a U_{10s} se poate face considerând că $m = 0,5$ ($\delta = 0,840$), rezultând $U_{10s} = 902/\delta^m = 984$ kV. Iterațiile sunt date în tab. 4. Se folosește rel.6 pentru a calcula S , apoi U_{50s} este $U_{10s}/0,91$. Acum se pot calcula G_0 , m și δ^m . Apoi, deoarece $U_{10A} = 902$ kV, se poate afla U_{10s} din ec. 10. Este necesară o singură iterație, rezultând $U_{10s} = 981$ kV.

Tabelul 4 Iterații pentru calculul U_{10} la 1500 m

U_{10s}	S , m	U_{50s}	G_0	m	U_{10s}
980	2,95	1077	0,730	0,484	981

U_{10} necesar pentru întrerupător se obține folosind ecuațiile pentru izolatorul suport. Ca justificare, ecuațiile pentru izolatoarele suport se folosesc numai pentru a obține valoarea exponentului m și deoarece m nu este o valoare foarte sensibilă, estimarea apare justificată. Reamintim că $m = 0,5$ este o evaluare brută și care utilizată mai sus a condus la $U_{10s} = 984$ kV.

Rămâne de determinat distanța izolantă. Aceasta se realizează în același mod ca în cap.3 cu excepția factorului de interval care va fi aici 1,3. Mai sus a rezultat că este necesar $U_{50A} = 991$ kV. Admițând, inițial că $m = 0,5$ rezultă $S = 2,6$ m. Valoarea finală, după iterațiile din tabelul 5.5 este de 2,69 m.

Tabelul 5 Iterații pentru calculul distanței de izolație

S , m	U_{50s}	G_0	m	S , m
2,6	1084	0,834	0,661	2,69
2,69	1112	0,827	0,648	2,68

2. Coordonarea izolației fază-fază

2.1. Ținerea izolației

Metoda Alfa

O tensiune pozitivă αV_p se aplică pe una dintre faze și o tensiune negativă $(1 - \alpha)V_p$ se aplică pe cealaltă fază, V_p fiind tensiunea fază-fază. Menținând α constant, se modifică V_p pentru a determina U_{50} fază-fază, notat U_{50p} . În această metodă, α este definit:

$$\alpha = \frac{V^-}{V^+ + V^-} = \frac{V^-}{V_p} = 1 - \frac{V^+}{V_p} \quad (15)$$

Ecuția pentru U_{50} este

$$U_{50p} = k_{gp} \frac{3400}{1 + 8/S} \quad (16)$$

unde S este distanța dintre faze, iar k_{gp} este factorul de interval pentru această metodă. Metoda este folosită de IEC, considerând $\alpha = 0,5$, adică $V^+ = V^-$, pentru determinarea distanțelor de izolație în aer. În standardul IEC-71, U_{10p} este definit pentru $\alpha = 0,5$, astfel că:

$$U_{10p} = U_{50p} \left(1 - 1,28 \frac{\sigma_{fp}}{U_{50p}} \right) \text{ cu } \alpha = 0,5 \quad (17)$$

Metoda $V^+ - V^-$

Aplicând o tensiune constantă V^- pe o fază, pe cealaltă se aplică tensiunea variabilă V^+ pentru a obține U_{50}^+ . Aceasta poate fi echivalată unei tensiuni negative, prin relația:

$$U_{50p}^+ = U_{50,0} - K_L V^- \quad (18)$$

unde K_L este o constantă care depinde de configurația intervalului, iar $U_{50,0}$ este U_{50} atunci când componenta negativă este nulă (unul dintre electrozi este legat la pământ), și este dat de ecuația:

$$U_{50,0} = K_{GP} \frac{3400}{1 + 8/S} \quad (19)$$

Deoarece metoda Alfa a fost folosită prima, multe, dacă nu toate rezultatele testelor au folosit-o. Aceste rezultate pot fi modificate astfel încât să fie aplicabile celorlalte metode. Adică:

$$K_{GP} = k_{gp} [1 - \alpha(1 - K_L)] \quad (20)$$

Folosind această ecuație, factorii de interval pentru cele două metode sunt dați în tab. 6.6.

Din definiția $U_{50,0}$ rezultă că acesta este egal cu U_{50}^+ , respectiv U_{50} pentru polaritatea pozitivă cu celălalt electrod legat la pământ. De aceea σ_f/U_{50} sau σ_f/U_{50}^+ trebuie să fie identic cu $\sigma_{fg}/U_{50,0}$, iar K_{GP} este identic cu k_g . Este adevărat că $U_{50,0}$ se folosește ca diferit de U_{50}^+ , dar factorii de interval sunt măsurati sau determinați în același mod sau prin același tip de încercări adică cu unul dintre electrozi legat la pământ. Din aceste motive, în tab. 6, în cazul metodei $V^+ - V^-$ factorul de interval a fost notat cu k_g iar deviația standard cu $\sigma_f/U_{50,0}$. Deoarece σ_{fg}/U_{50p} este, de asemenea, egal cu $\sigma_f/U_{50,0}$, această notație a fost schimbată în σ_f/U_{50p} . Astfel, folosirea acestor variabile va fi mai simplă și expunerea mai clară.

Cu referire la fig. 1, lungimea barelor pe care se aplică impulsul de comutație este relativ mică, mai mică decât lungimea deschiderilor liniei. Astfel, intervalul conductor-conductor cu lungime mare nu a mai fost inclus în tab. 6. Se va utiliza intervalul cu lungimea de 10 m pentru a obține distanța dintre faze. Configurația inel-inel sau electrozi netezi mari este aplicabilă pentru electrozii de uniformizare cu diametru mare, așa cum sunt la izolatoarele de trecere pentru EHV. La tensiuni mai mici, unde asemenea electrozi sunt mult mai mici, este mai potrivită configurația tijă-tijă.

Tabelul 6 Factori de interval pentru impulsuri de comutație fază-fază

Configurația intervalului	Metoda Alfa			Metoda $V^+ - V^-$		
	α	k_{gp}	σ_f/U_{50p}	K_L	k_g	$\sigma_f/U_{50,0}$
Inel-inel sau electrozi mari netezi	0,33	1,70	0,05	0,70	1,53	0,05
	0,50	1,80	0,05			
Conductoare încrucișate	0,33	1,53	0,05	0,62	1,34	0,05
	0,50	1,65	0,05			
Tijă – tijă	0,33	1,52	0,05	0,67	1,35	0,05
	0,50	1,62	0,05			
Conductor-conductor, lungime 10m	0,33	1,52	0,035	0,67	1,35	0,035
	0,50	1,62	0,035			
Geometrie asimetrică, de ex. conductor-tijă	0,33	1,36	0,05	0,67	1,21	0,05
	0,50	1,45	0,05			
Amortizor-inel ecran și conductor -conductor, lungime mică	0,33	1,57	0,05	0,66	1,39	0,04
	0,50	1,68	0,04			
Conductor-conductor, lungime 46 m	0,33	1,56	-	0,68	1,40	-
	0,50	1,66	-			

Pentru intervale scurte de aer, mai mici de 2-3 m, deci pentru tensiuni de până la 500 kV, K_L este 1,00. Atunci separarea în componente a sistemului fază-fază nu mai este necesară. De asemenea, $K_L = 1,00$ conduce la distanțe mai mari între electrozi.

Folosind rel. 20, cele două definiții ale U_{50} pot legate prin relația:

$$U_{50p} = \frac{U_{50,0}}{1 - \alpha(1 - K_L)} \quad (21)$$

Dacă $\alpha = 0,5$, ec.6.21 devine

$$U_{50p} = \frac{2U_{50,0}}{1 + K_L} \quad (22)$$

$$U_{10p} = \frac{2U_{10,0}}{1 + K_L}$$

3. Factorii de interval în stațiile de transformare

Drept ghid general, factorii de interval tipici pentru stații sunt dați în fig.5. Unii dintre acești factori trebuie folosiți pentru $U_{50,0}$ a izolației fază-fază, iar alții pentru U_{50} al izolației fază-pământ. Nu sunt indicate valorile pentru intervalul tijă-plan ($k_g = 1,00$) niciodată folosit și pentru intervalul conductor-tijă inferioară, care este utilizat pentru spațiul dintre un conductor al barelor și tija unui separator deschis aflat dedesubt ($k_g = 1,50$). Acestea sunt valori tipice, dar trebuie folosite numai ca un ghid.

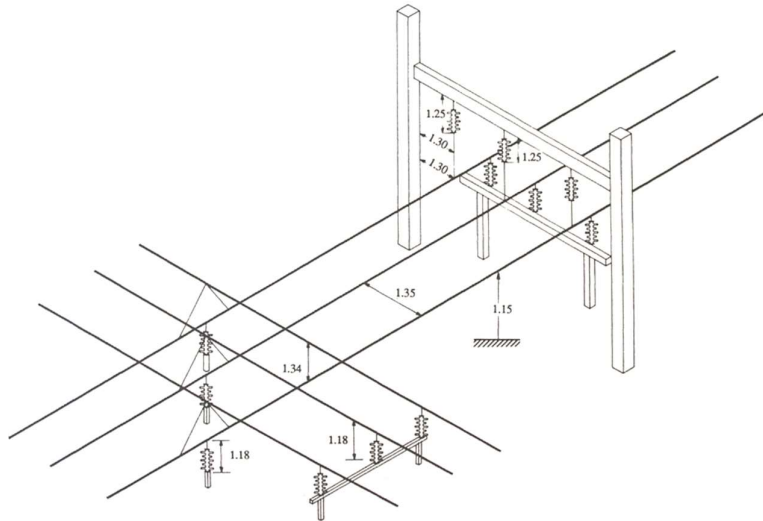


Fig.5 Factori de interval tipici într-o stație de transformare