

## 2

## Rigiditatea izolației auto-regeneratoare

Rigiditatea izolației este descrisă prin ținerea la impulsuri de trăsnet, de comutație, la supratensiuni temporare și la tensiune de frecvență industrială.

### 2.1 Evaluare rigidității izolației la impuls de comutație

#### 2.1.1 Influența duratei frontului impulsului

Influența duratei frontului undei sau a timpului până la vârf, este dată în fig. 2.1 pentru o distanță disruptivă de 5 m, în condiții uscate sau umede pentru polaritate negativă sau pozitivă. Forma în U a curbelor arată că există o durată a frontului undei pentru care ținerea izolației este minimă. Acesta este numit *front de undă critic*. În prezența umidității,  $U_{50}$  scade mai mult pentru polaritatea negativă decât pentru cea pozitivă. Totuși, condițiile polaritate pozitivă + umiditate rămân cele mai severe, astfel că numai acestea trebuie considerate la proiectare.

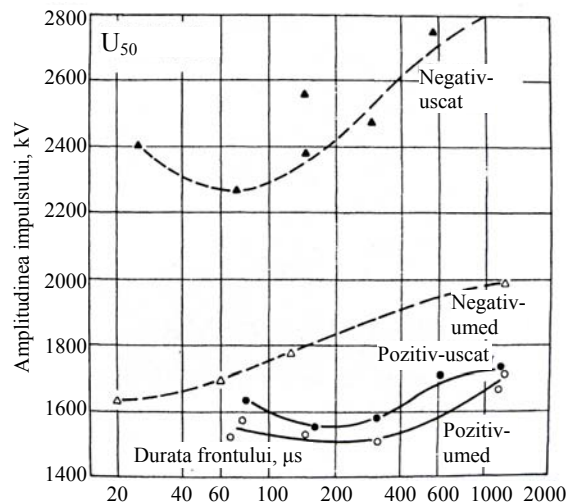


Fig. 2.1 Efectul duratei frontului undei asupra  $U_{50}$ .  
Distanța disruptivă 5m.

Curbe în U pentru alte distanțe disruptive sunt date în fig. 2.2, unde se vede că durata critică a frontului crește cu creșterea distanței disruptive. Folosind aceste date, în fig. 2.3 este dat graficul mărimii duratei critice a frontului undei, DCF, pentru polaritatea pozitivă, în funcție de distanța disruptivă.

Aproximativ, pentru polaritatea pozitivă,

$$DCF^+ = 50(S - 1) \approx 50S \quad (2.1)$$

dacă  $S$  este distanța disruptivă în metri,  $DCF^+$  este în  $\mu s$ . Pentru polaritatea negativă

$$DCF^- = 10S \quad (2.2)$$

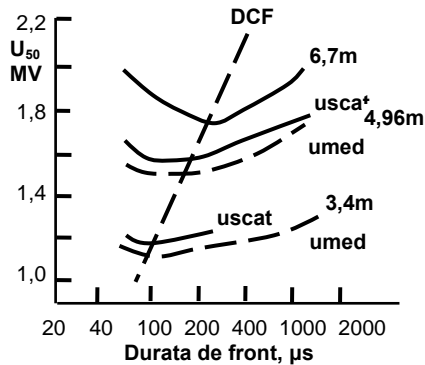


Fig. 2.2 Durata critică a frontului (DCF) în funcție de distanța disruptivă

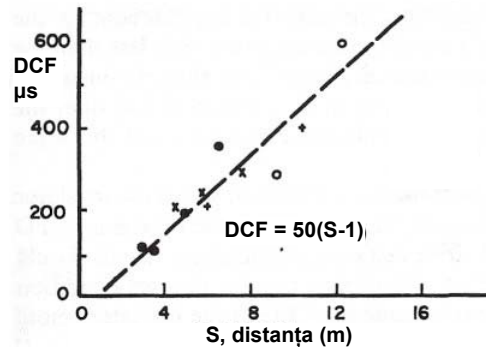


Fig. 2.3 Durata critică a frontului la polaritatea pozitivă

### 2.1.2 Tensiunea $U_{50}$ pentru impulsuri de comutație

S-a observat, experimental, că toate curbele  $U_{50}$  în funcție de distanța  $S$  au, în fond, aceeași formă și că intervalul vârf-plan prezintă cea mai redusă valoare  $U_{50}$ .

Considerând durata critică a frontului unei de impuls de comutație, s-a propus relația

$$U_{50}^+ = k_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}}, \quad (2.3)$$

valabilă pentru polaritatea pozitivă și în lipsa umidității. În relația precedentă  $k_g$  este factorul de interval care este egal cu raportul dintre tensiunile  $U_{50}$  pentru un sistem de electrozi precizat și pentru sistemul de electrozi vârf-placă. Exemple de factori de interval sunt date în tabelul 2.1.

Conform ecuației de mai sus, atunci când  $S$  tinde la infinit  $U_{50}$  tinde la 3400 kV, ceea ce ar indica o valoare maximă a  $U_{50}$  pentru intervalul vârf-plan. Aceasta este fals și doar subliniază limitele ecuației. În general, ecuația este valabilă pentru intervale de până la 15 m. Dincolo de aceasta, s-a propus, pentru intervalul vârf-plan cu distanțe de 11 – 30 m,

$$U_{50}^+ = 1400 + 55S \quad (2.4)$$

Altă relație pentru  $U_{50}$  la polaritatea pozitivă, declarată valabilă pentru intervale vârf-plan de până la 25 m, apare în Publicația IEC 71:

$$U_{50}^+ = 1080k_g \ln(0.46S + 1) \quad (2.5)$$


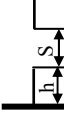

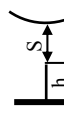
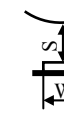

Deviația standard pentru supratensiuni de comutație, la polaritate pozitivă, este de 5-6% din valoarea  $U_{50}$ .

Pentru polaritatea negativă, Publicația IEC 71 dă o ecuație pentru distanțe de 2 .. 14 m cu o deviație standard de 8% din  $U_{50}$

$$U_{50}^- = 1180k_g S^{0.45} \quad (2.6)$$

CIGRE a publicat un ghid în care sunt prezentate relații generale pentru factorii de interval.

**Tabelul 2.1** Factorul de interval  $k_g$ 

Configurația	Schița	$k_g$
Vârf-plan		1
Vârf - vârf		$1 + 0,6 \frac{h}{S}$ sau $\frac{h}{h+S} e^{0,5}$
Conductor - plan		1,10
Conductor - vârf		$1 + 1,4 \left( \frac{h}{h+S} \right)^{1,62}$ sau $1,1 \frac{h}{h+S} e^{0,7}$
Conductor - structură		$1 + \frac{0,3}{1 + \frac{W}{S}}$
Conductor - clădire		1,30

Pentru alte configurații, des întâlnite pe liniile de transport și în stațiile de transformare, au fost stabilite formule empirice pentru calculul factorului de interval.

#### Intervalul fază mediană - fereastră , fig.2.4

$$k_g = 1,25 + 0,0005 \left( \frac{h}{S} - 6 \right) + 0,25 \left( e^{-\frac{8W}{S}} - 0,2 \right) \quad (2.7)$$

$W$  este lățimea coloanei stâlpului,  $h$  este înălțimea conductorului, iar  $S$  este distanța minimă în fereastra stâlpului, conform fig. 2.4. Această relație se poate folosi pentru valori ale lui  $S$  de la 2 la 10 m,  $W/S=0,1 \dots 1$  și  $h/S=2 \dots 10$ . De obicei, distanța minimă este la partea inferioară a ferestrei prin care trece conductorul. Dacă se folosește un amortizor al vibrațiilor, distanța minimă este către acest punct.

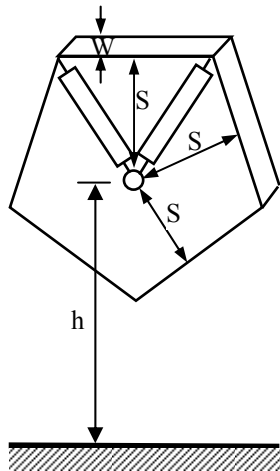


Fig. 2.4 Fereastra stâlpului

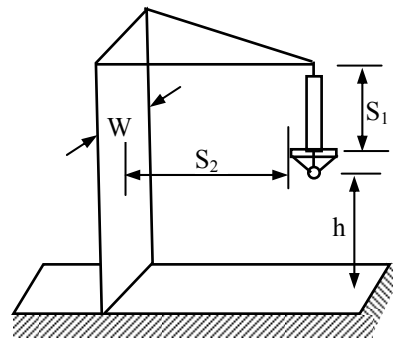


Fig. 2.5 Faza laterală-stâlp

Pentru stâlpii normali,  $h/S$  este între 4 și 5. Pentru stâlpii normali cu zăbrele,  $W/S$  este de 0,5 .. 0,6. Pentru un stâlp tubular de oțel  $W/S = 0,2$ . Astfel pentru stâlpul cu zăbrele  $k_g$  este cca. 1,2 iar pentru un stâlp tubular este cca. 1,25.

### Intervalul faza laterală – stâlp, fig.2.5

$$k_g = 1,45 + 0,015 \left( \frac{h}{S_1} - 6 \right) + 0,35 \left( e^{-\frac{8W}{S_1}} - 0,2 \right) + 0,135 \left( \frac{S_2}{S_1} - 1,5 \right). \quad (2.8)$$

*Observații:*

$S_2 \geq S_1$ . Acesta este cazul normal pentru lipsa oscilațiilor conductorului datorate vântului, iar descărcarea va apărea de-alungul izolatorului. Pentru  $h/S_1 = 4..5$ ,  $W/S_1 = 0,5$ ,

$$k_g = 1,35 + 0,135(2S_2 - 1,5).$$

Dacă  $S_1 = S_2$  rezultă  $k_g = 1,28$ . Folosind rezultatele testelor, factorul de interval propus pentru faza laterală a fost de 1,08 ori mai mare decât pentru faza mediană. Astfel  $1,08 * 1,2 = 1,3$ , apropiat de 1,28. Rămâne valabilă propunerea multiplicării factorului de interval pentru faza laterală cu 1,08 față de faza centrală.

Pentru câteva configurații specifice stațiilor de transformare, sunt date în Anexă, relații de calcul a factorului de interval.

### 2.1.3. Deviația standard a descărcărilor

Deviația standard a rigidității, în u.r. față de  $U_{50C}$  are, de obicei, o valoare medie de 5% atât pentru condiții umede cât și uscate. Mai exact, pentru condiții uscate, valoarea medie a  $\sigma_f/U_{50C}$  este de 4,3%, iar pentru condiții umede este 4,9%.

### 2.1.4 Condiții uscat/umed

Prezența umidității reduce valoarea  $U_{50C}$ . În cazul stâlpilor, pentru un raport lungime izolator/distanță disruptivă de 1,05 până la 1,10, ceea ce reprezintă condițiile de proiectare, prezența umidității reduce valoarea  $U_{50C}$  determinată în lipsa umidității cu numai 1%. Totuși, din alte teste, s-au măsurat valori mai mari. Pentru aplicații, este propusă o reducere de 4%, multiplicând ec. 2.3 cu 0,96.

### 2.1.5 Faza laterală

Este de așteptat ca  $U_{50C}$  pentru fazele laterale cu lanțuri de izolatoare în V, să aibă valori mai mari decât pentru faza centrală, deoarece coloana stâlpului se află numai de o parte a fazei. Din datele testelor rezultă,  $U_{50C}$  mai mare cu 8% decât pentru faza centrală, adică multiplicarea ec. 2.3 cu 1,08.

## 2.2 Rigiditatea la impuls de trăsnet

Ținerea la impuls de trăsnet a fost specificată de obicei numai prin  $U_{50T}$ . Totuși, beneficiind de rezultatele asupra ținerii la impuls de comutație, s-a înțeles repede că și caracteristica rigidității la impuls de trăsnet poate fi modelată printr-o distribuție cumulativă Gauss, având valoarea medie egală cu  $U_{50T}$  și o abatere standard  $\sigma_T$ . Totuși, în acest caz, deviația standard este mult mai redusă decât pentru impulsurile de comutație fiind, de obicei, între 1 și 3% din  $U_{50T}$ , deși în cazuri particulare s-au obținut valori de până la 3,6%. Caracteristica rigidității la impuls de trăsnet este rareori folosită. Mai degrabă se folosesc valori unice precum  $U_{50T}$  sau  $U_{10T}$ . Rigiditatea la impuls de trăsnet poate fi, de asemenea, dată prin curbe tensiune-timp.

În general, dependența  $U_{50T}$  în funcție de distanța disruptivă este liniară, de aceea  $U_{50T}$  se poate indica prin gradientul tensiunii critice de descărcare, în kV/m.

Considerând forma tensiunii aplicate, pentru impulsuri de comutație,  $U_{50T}$  este mai întâi funcție de durata frontului în timp ce spatele fiind suficient de lung nu îi afectează valoarea. Pentru impulsuri de trăsnet,  $U_{50T}$  este în primul rând funcție de durata spatelui unde, iar frontul este important numai când se consideră impulsuri cu spate foarte scurt.

### 2.2.1 $U_{50T}$ pentru izolatoare și intervale de aer.

Conform broșurii tehnice 72/1992 a CIGRE,  $U_{50}$  pentru impulsuri de trăsnet în cazul intervalului vârf-plan, la ambele polarități arată ca în fig.2.6.  $U_{50S}$  pentru condiții umede și uscate sunt aceleași. În timp ce curba pentru polaritatea pozitivă este liniară, la polaritatea negativă aceasta devine liniară de la distanțe de cca. 2 m.

$U_{50}$  pentru impuls de trăsnet în situații practice, pentru faza laterală a unei linii, respectiv cazul cu traversă este dat în fig. 2.7 în lipsa umidității. În timp ce  $U_{50T}$  pentru acest interval, fără izolatoare, este independent de polaritate, în prezența izolatorului influența polarității se simte. Toate descărcările pentru această configurație au fost conturnări ale izolatorului.

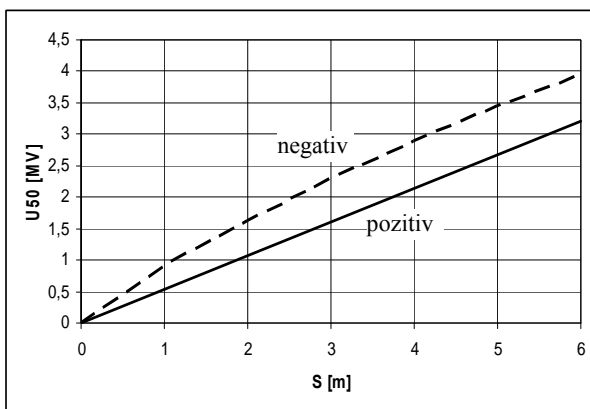


Fig. 2.6  $U_{50}$  pentru intervale vârf-plan pentru impuls de trăsnet

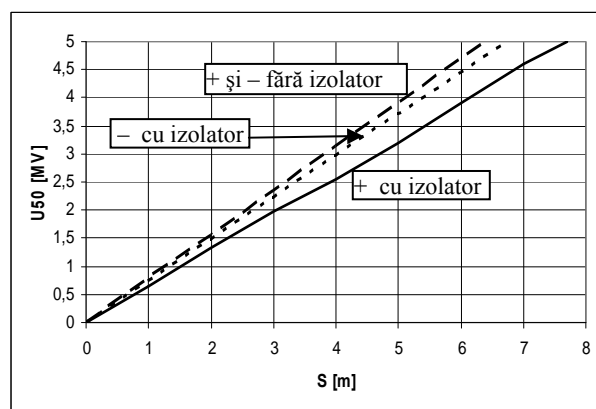


Fig. 2.7  $U_{50}$  pentru interval conductor-traversă pentru impuls de trăsnet

Corelația dintre lungimea intervalului și gradientul  $U_{50T}$  pentru intervalul vârf-placă este dată în fig. 2.8. În timp ce gradientul  $U_{50T}$  la polaritate pozitivă este constant, 525 kV/m, pentru

polaritatea negativă acesta variază cu distanța. Ecuația scrisă lângă curbă produce o estimare brută a acestui gradient.

Publicația IEC 71 recomandă următoarele relații pentru calculul tensiunii  $U_{50}$ :

- pentru polaritate pozitivă și distanțe până la 10 m

$$U_{50}^+ = 530S(0,74 + 0,26k_g) \quad (2.9)$$

având o deviație standard de 3% din  $U_{50}$ .

- pentru polaritatea negativă, intervale până la 6 m, cu  $k_g$  între 1 și 1,44

$$U_{50}^- = 950S^{0,8}(1,5 - 0,5k_g) \quad (2.10)$$

iar pentru  $k_g > 1,44$

$$U_{50}^- = 741S^{0,8} \quad (2.11)$$

Pentru polaritatea negativă, deviația standard este de 5% din  $U_{50}$ .

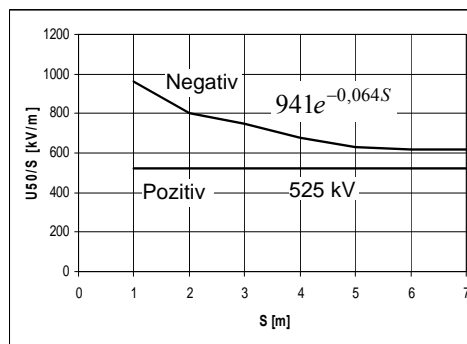


Fig. 2.8 Gradientul  $U_{50}$  pentru interval vârf-plan

Pentru factorul de interval 1,2 care aproximează stâlpii, rezultă valori între 530 și 560 kV, care concordă bine cu încercările la scară reală, care au dat valoarea de 560 kV/m.

Pentru polaritatea negativă, pentru același factor de interval de 1,2 și distanțe de 2, 3 și 5 m gradientii  $U_{50}$  sunt 714, 664 și 603 kV/m. Folosind relațiile IEC pentru intervale de 2, 3 și 5 m, gradientii  $U_{50}$  sunt 744, 686 și 620 kV/m în timp ce testele menționate anterior dau valori de cca. 605 kV/m pentru distanțe de 3,4 -3,5 m, ceea ce este cam cu 10% mai puțin.

Ca și ghid pentru rigiditatea la impuls de trăsnet pentru diferite configurații ale intervalelor, Tabelul 2.2 prezintă valorile gradientului  $U_{50}$  obținute din literatură. Asteriscul din tabel indică neliniaritatea curbei gradient  $U_{50T}$  în funcție de distanță, iar valoarea indicată este valabilă pentru 4 m.


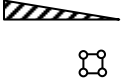
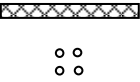


### 2.2.2. Curbe tensiune-timp

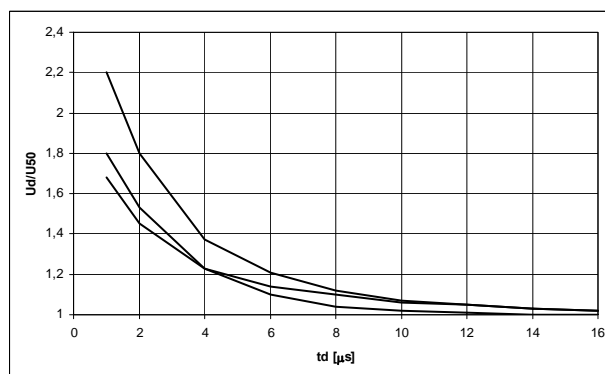
Forma curbelor tensiune-timp variază semnificativ în funcție de configurația intervalului. Dacă aceasta se apropie de câmpul uniform, curba devine mai plată. Dimpotrivă, dacă intervalul are câmp neuniform, panta devine mai pronunțată. Câteva curbe tipice sunt date în fig. 2.9. O ecuație care aproximează brut curba tensiune-timp între 2 și 11  $\mu\text{s}$  este

$$\frac{V_B}{U_{50}} = 0,58 + \frac{1,39}{\sqrt{t}} \quad (2.12)$$

unde  $V_B$  este tensiunea de străpungere, conturare sau valoarea de vârf, iar  $t$  este durata până la descărcare.

**Tabelul 2.2**  $U_{50}/S$  pentru impuls de trăsnet [kV/m]

Configurația intervalului	Schița	Polaritatea +		Polaritatea -	
		Fără izolatoare	Cu izolatoare	Fără izolatoare	Cu izolatoare
Vârf-placă		540	520 540	660	*375 *500
Faza laterală		600 625	500 520	600 625	595 620
Conductor-structură suprapusă		575	560	625	610
Conductor-vârf deasupra		655	*500	595	585
Vârf-vârf		560	500	640	*425 *475



**Fig. 2.9** Curbe tensiune-timp tipice

Valorile propuse pentru izolația stâlpilor sunt:

- tensiunea de străpungere la  $2 \mu s = 1,67 \times U_{50T}$ ;
- tensiunea de străpungere la  $3 \mu s = 1,38 \times U_{50T}$

Pentru izolația de porțelan a echipamentelor, tensiunea de descărcare la  $3 \mu s$  variază între  $1,22 U_{50T}$  și  $1,31 U_{50T}$ , iar tensiunea de descărcare la  $2 \mu s$  variază între  $1,32 U_{50T}$  și  $1,48 U_{50T}$ . Testele standard cu unde tăiate, dacă sunt specificate, folosesc pentru durata de  $3 \mu s$  valoarea de  $1,15 U_{50T}$ , iar pentru întrerupătoare  $1,29 U_{50T}$  la  $2 \mu s$ . Aceste ultime valori sunt folosite frecvent pentru echipamente.

### 2.2.3 Influența duratei de semiamplitudine asupra $U_{50T}$

Valorile tensiunii  $U_{50T}$  au fost obținute experimental aplicând intervalului impulsul standard de trăsnet 1,2/50  $\mu$ s. Dacă durata de semiamplitudine a impulsului este diferită și rezultatul încercării se schimbă. O relație, care arată efectul duratei de semiamplitudine asupra  $U_{50}$ , este de forma

$$U_{50NS} = \left( 0,977 + \frac{2,82}{\tau} \right) U_{50S} \quad (2.13)$$

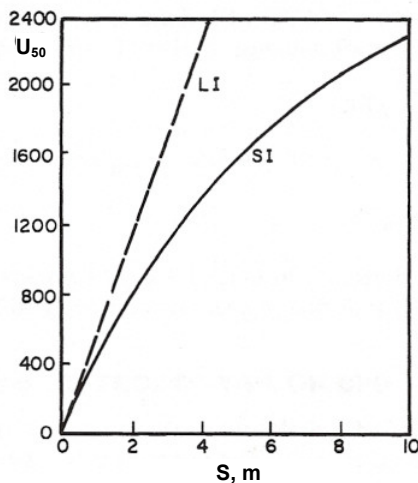
unde  $U_{50S}$  este definit pentru unda standard 1,2/50  $\mu$ s, iar  $U_{50NS}$  corespunde unei ne-standard având constanta de timp a spatelui  $\tau$ . Relația este valabilă pentru timpi de creștere pe front între 0,5 și 5  $\mu$ s și durate de semi-amplitudine între 10 și 100  $\mu$ s. Astfel, durata frontului este de mică importanță dacă este sub 5  $\mu$ s. Tabelul 2.3 arată rezultatele rel. 2.13. Cea mai importantă observație este creșterea valorii  $U_{50T}$  în cazul undelor de impuls cu spate scurt.

**Tabelul 2.3.** Efectul duratei spatelui unei asupra  $U_{50T}$

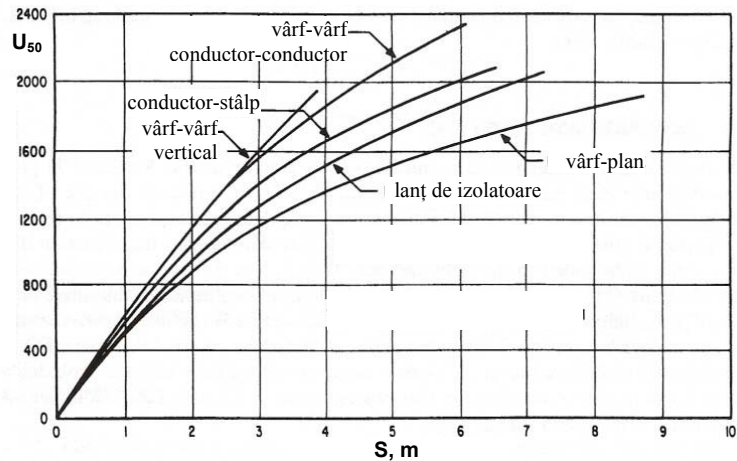
Durata de semiamplitudine, $\mu$ s	Constanta de timp pe spate $\tau$ , $\mu$ s	$U_{50NS}/U_{50S}$
100	144	0,997
50	72	1,016
40	58	1,025
20	29	1,075
10	14	1,172

### 2.3 Comparație între impulsurile de trăsnet și de comutație

Compararea valorilor  $U_{50}$  pentru impulsuri de trăsnet și de comutație, fig. 2.10, arată motivul pentru care există interes în proiectarea liniilor de transport în funcție de supratensiunile de comutație. De exemplu pentru a obține  $U_{50} = 1600$  kV la impuls de trăsnet este necesară o distanță disruptivă de cca. 3 m. Pentru a obține aceeași  $U_{50}$  la impuls de comutație este nevoie de cca. 5 m.



**Fig. 2.10** Comparația ținării stâlpului la impulsuri de trăsnet și de comutație



**Fig. 2.11**  $U_{50}$  la frecvență industrială pentru intervale lungi și izolatoare



## 2.4 Frecvența industrială

Pentru liniile de transport și pentru stații, rigiditatea izolației la tensiune de frecvență industrială în lipsa poluării este rareori hotărâtoare pentru proiectarea izolatoarelor sau stabilirea distanțelor izolante de aer. Mai degrabă, performanțele izolației externe poluate pot hotărî asupra proiectării. Rezultate obținute în stare uscată sunt redate în fig. 2.11. Deviația standard este de cca. 2%. Pentru izolatoare, ploaia poate reduce substanțial ținerea izolației, depinzând de intensitatea ploii, conductivitate și de configurația izolatorului (în V, I sau orizontal). Pentru izolatoare verticale, I, această scădere poate atinge 30%. Efectul ploii asupra intervalelor de aer este neglijabil. Publicația IEC 71 prezintă o ecuație aproximativă pentru  $U_{50}$  la frecvența industrială:

$$U_{50FI} = 750 \left( 1,35k_g - 0,35k_g^2 \right) \ln \left( 1 + 0,55S^{1,2} \right) \quad (2.14)$$

care este valabilă pentru distanțe mai mari de cel puțin 2 m. În general, această ecuație corespunde cu graficele din fig. 2.11. Deși nu este precizat în Publicația IEC,  $U_{50}$  este dat în valori eficace ale tensiunii. Tabelul 2.4 prezintă o comparație între  $U_{50}$  la frecvență industrială cu  $U_{50}$  pentru impuls, în cazul unui interval de 3 m având factorul de interval egal cu 1,2. De remarcat că  $U_{50}$  la frecvență industrială este cu 19% mai mare decât  $U_{50}$  pentru impuls de comutație pozitiv.

**Tabelul 2.4** Comparație impuls-frecvență industrială

Mărimea	Valoarea, kV	Valoarea, u.r.
$U_{50IC}^+$	1113	1
$U_{50IC}^-$	1935	1,74
$U_{50IT}^+$	1680	1,51
$U_{50IT}^-$	1815	1,63
$U_{50FI}$	1322 vârf	1,19

## 2.5 Proiectarea deterministă a liniilor de transport

Folosind informațiile și relațiile precedente, se poate dezvolta o metodă de dimensionare numită deterministă. Aceasta constă în calculul distanțelor izolante de plecând de la solicitarea maximă considerată și admitând un risc de conturare a izolației. Se presupune că mai întâi s-a efectuat un studiu EMTP (ATP) sau TNA pentru determinarea supratensiunii de comutație maxime,  $E_m$ . Dacă această solicitare ar fi egală cu nivelul  $U_{50}$  al izolației, riscul de defectare ar fi de 50%, ceea ce este inadmisibil. Un risc de conturare admisibil pentru izolația autoregeneratoare este 0,1%, căruia îi corespunde o solicitare,  $V_3$ , cu  $3\sigma^*$  mai mică decât  $U_{50}$ :

$$V_3 = U_{50} \left( 1 - 3\sigma_f^* \right). \quad (2.15)$$

Pentru ca solicitarea cu supratensiunea  $E_m$  să fie suportată cu riscul de defectare de 0,1%, trebuie ca

$$V_3 = E_m.$$

Rezultă

$$U_{50A} = \frac{E_m}{1 - 3(\sigma_f / U_{50})}, \quad (2.16)$$

unde indicele A arată că valoarea  $U_{50A}$  corespunde altitudinii medii a liniei. Astfel, poate fi determinată distanța disruptivă plecând de la  $E_m$  și  $U_{50A}$ .

1.  $U_{50}$  pentru faza centrală, condiții uscate, pentru durată critică a frontului undei (DCF), la polaritate pozitivă și izolatoare în V este

$$U_{50S} = k_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}} \quad (2.17)$$

unde  $S$  este în metri,  $U_{50S}$  este în kV în condiții atmosferice standard, iar

$$k_g = 1,25 + 0,005 \left( \frac{h}{S} - 6 \right) + 0,25 \left( e^{-\frac{8W}{S}} - 0,2 \right), \quad (2.18)$$

unde  $h$  este înălțimea conductorului, iar  $W$  este lățimea coloanei stâlpului.

2. Pentru alte condiții:

- Prezența umidității reduce  $U_{50}$  cu 4%, adică se multiplică ec. 2.17 cu 0,96.
- Faza laterală are  $U_{50}$  mai mare cu 8%, adică se multiplică ec. 2.17 cu 1,08.
- $U_{50S}$  trebuie mărit cu 10% pentru front al undei lung de 1000  $\mu$ s sau mai mult, adică se multiplică ec. 2.20 cu 1,10.
- Lungimea lanțului de izolatoare trebuie să fie cel puțin 1,05 față de distanța disruptivă.
- Pentru izolatoare I,  $U_{50S}$  se poate estima cu ec. 2.17 multiplicată cu 1,08.
- $S$  este cea mai mică dintre trei distanțe:  $S_1$  către traversă,  $S_2$  către coloana stâlpului și  $S_{1z}/1,05$ , unde  $S_{1z}$  este lungimea lanțului de izolatoare.

3. Pentru proiectare se presupune prezența umidității. De asemenea linia trebuie proiectată pentru altitudinea medie a traseului. De aceea  $U_{50}$  în asemenea condiții, notată  $U_{50A}$ , poate fi obținută cu ecuația

$$U_{50A} = \delta^m U_{50S} \quad (2.19)$$

În aplicații, pentru  $U_{50S}$  se consideră valoarea pentru condiții de umiditate. Adică

$$U_{50S} = 0,96 k_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}}. \quad (2.20)$$

$U_{50A}$  devine

$$U_{50A} = \delta^m U_{50S} = 0,96 k_g \delta^m \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}}. \quad (2.21)$$

De aici rezultă distanța disruptivă,  $S$

$$S = \frac{8}{\frac{3400 \times 0,96 k_g \delta^m}{U_{50A}} - 1} \quad (2.22)$$

unde

$$m = 1,25 G_0 (G_0 - 0,2); \quad G_0 = \frac{U_{50S}}{500S}, \quad (2.23)$$

iar densitatea relativă a aerului este

$$\delta = e^{-A/8,6} \approx 0,997 - 0,106 A, \quad (2.24)$$

unde  $A$  este altitudinea, în km.

**Exemplu:** Să se determine distanța disruptivă, lungimea izolatorului și numărul de izolatoare standard pentru faza mediană a unei linii de 500 kV (550 kVmax), care va fi construită la altitudinea de 1000 m. Factorul maxim de supratensiune de comutație este 2,0 (1.u.r. = 450 kV = 550 \*  $\sqrt{2}/\sqrt{3}$ ), lățimea coloanei stâlpului este  $W = 1,5$  m, iar înălțimea conductorului este  $h = 15$  m. Se presupune că impulsurile de comutație au un durată frontului egală cu valoarea critică. Pentru condiții de umiditate se va considera  $\sigma_f / U_{50} = 5\%$ . Dimensiunile izolatorului standard, capă-tijă, sunt 170 x 280 x 390 mm (înălțime x diametru x lungime linie de fugă).

Din rel. 2.16 se obține  $U_{50A}$  adică valoarea  $U_{50}$  necesară la 1000 m egală cu

$$U_{50A} = \frac{E_m}{1 - 3(\sigma_f / U_{50})} = \frac{2 * 450}{1 - 3 * 0,05} = 1059 \text{ kV}$$

Densitatea relativă a aerului, este (2.24)

$$\delta = 0,997 - 0,106 A = 0,997 - 0,106 * 1 = 0,891.$$

Obținerea distanței de izolație,  $S$  necesită cunoașterea factorului de interval și a exponentului, care depinde de parametrul  $G_0$ . Deoarece ambele mărimi sunt funcții de distanța disruptivă, aceasta nu poate fi obținută direct, ci printr-un proces iterativ.

Pentru început se aleg valori  $k_g$  și  $m$  cât mai probabile, conform experienței de proiectare. De exemplu, pentru stâlpii liniilor de transport,  $k_g = 1,2$  și  $m = 0,5$ , rezultând  $S = 3,21$  m. Cu acest rezultat,  $k_g$  se obține cu rel. 2.18,  $U_{50S}$  cu rel. 2.17 considerând factorul 0,96 pentru condiții de umiditate,  $G_0$  și  $m$  cu rel. 2.23, iar în final noua valoare  $S$  cu rel. 2.22. Operațiile se repetă până când diferența dintre valorile  $S$ , inițială și finală din iterație este considerată acceptabilă. Aici sunt necesare doar două iterații. De obicei nu este nevoie de mai mult de 3 iterații.

$S$	$k_g$	$U_{50S}$	$G_0$	$m$	$S$
	1,2			0,5	3,21
3,21	1,199	1120,6	0,698	0,435	3,18
3,18	1,199	1113,1	0,700	0,437	3,18

Astfel pentru faza mediană, distanța disruptivă este de 3,18 m, iar lungimea minimă a lanțului de izolatoare este cu 5% mai mare respectiv 3,34 m; acestea îi corespunde un număr de  $3,34/0,170=19,6$  izolatoare.

Distanța disruptivă pentru fazele laterale va fi mai mică. Deoarece pentru fazele laterale rigiditatea este cu 8% mai mare, pentru acestea distanța disruptivă ar fi de  $3,18/1,08 = 2,94$  m. Totuși acest mod de calcul nu este corect. Procedeeul corect este de a efectua calculul de mai sus cu  $k_g$  de 1,08 ori mai mare decât pentru faza centrală. Se obține o distanță de 3,04 m pentru faza laterală și respectiv 17,88 izolatoare.

#### ANEXĂ – Factori de interval

##### **Conductor – structură inferioară, fig.2.12**

Ecuția pentru factorul de interval, fig. 2.12, este mai complicată:

$$k_g = 1,5 + 0,81 \left( \frac{h'}{h} \right)^{1,167} + 0,02 \frac{h'}{S} - A \left[ 1,209 \left( \frac{h'}{h} \right)^{1,167} + 0,03 \frac{h'}{S} \right] \left( 0,67 - e^{-\frac{2W}{S}} \right), \quad (2.25)$$

unde, dacă  $W/S < 0,2$  se va lua  $A = 0$ . În celelalte cazuri,  $A = 1$ .

##### *Observații:*

Dacă  $h' = 0$  și  $W = 0$ , atunci intervalul se reduce la cazul conductor-plan cu un factor de interval egal cu 1,15.

De exemplu, un camion se află sub o linie având  $W = 8$  m și  $h' = 3$  m. Fie  $h = 10$  m și  $S = 7$  m. Atunci  $k_g = 1,15$  și se aplică unui interval de 10 m, rezultând  $U_{50} = 2172$  kV. Astfel camionul va reduce  $U_{50}$  cu numai 14% chiar dacă distanța disruptivă se reduce cu 30%.

##### **Intervalul conductor – structură laterală, fig.2.13**

Ecuția factorului de interval, fig. 2. 13 este:

$$k_g = 1,45 + 0,024 \left( \frac{h}{S} - 6 \right) + 0,35 \left( e^{-\frac{8W}{S}} - 0,2 \right) \quad (2.26)$$

Ecuția se poate aplica pentru valori ale lui  $S$  de la 2 la 10 m,  $W/S = 0,1..1$  și  $h/S = 2.. 10$ .

##### *Observații:*

De exemplu, această structură este coloana unui stâlp cu  $W/S = 0,5..0,6$  și  $h/S = 4..5$ . Atunci  $k_g = 1,41-1,43$ . Această valoare poate fi comparată cu factorul de interval pentru traversă care este de 1,28-1,3. Factorul de interval pentru traversă trebuie să fie mai mic decât 1,41-1,43 calculat aici deoarece traversa adaugă un braț suplimentar la structura conductor-structură laterală, ceea ce se respectă.

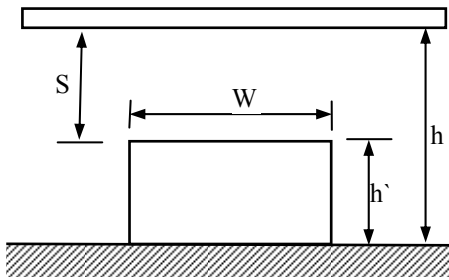


Fig. 2.12 Conductor-structură inferioară

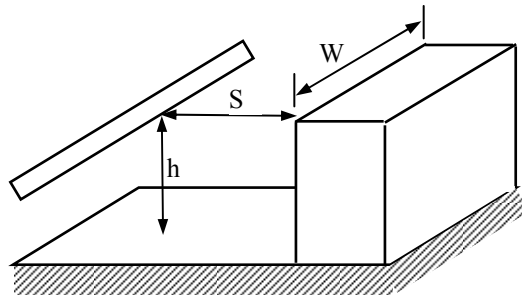


Fig. 2.13 Conductor-structură laterală

**Intervalul structură-vârf-vârf, fig. 2.14**

Aceasta este o configurație foarte complexă, având doi factori de interval,  $k_{g1}$  pentru distanța  $S_1$  și  $k_{g2}$  pentru distanța  $S_2$ :

$$k_{g1} = 1.35 - 0.1 \frac{h'}{h} - \left( \frac{S_1}{h} - 0.5 \right) \tag{2.27}$$

$$k_{g2} = 1 + 0.6 \frac{h'}{h} - 1.093 A \frac{h'}{h} \left( 0.549 - e^{-\frac{3W}{S_2}} \right)$$

unde  $A = 0$  dacă  $W/S_2 < 0.2$ ; în caz contrar  $A = 1$ .

Pentru factorul de interval  $k_{g1}$ ,  $S_2$  trebuie să fie mai mare decât  $S_1$ ; domeniul de valabilitate este  $S_1 = 2-10$  m, iar  $S_1/h = 0.1 - 0.8$ . Pentru factorul de interval  $k_{g2}$ ,  $S_1$  trebuie să fie mai mare decât  $S_2$ , iar domeniul de valabilitate este  $S_2 = 2-10$  m, iar  $W/S_2 = 0 - \infty$ .

Dacă  $h' = 0$  și  $W=0$ , atunci  $k_{g2}=1$ , ceea ce verifică ecuația pentru intervalul vârf-placă. Pentru a obține factorul de interval pentru configurația vârf-vârf vertical, se va considera că  $W/S_2$  are

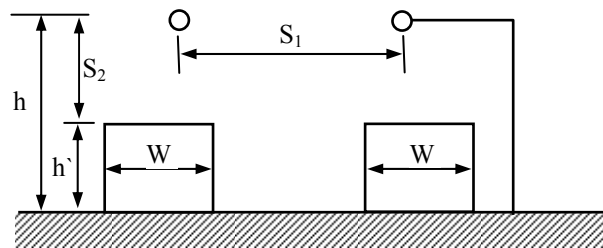


Fig. 2.14 Interval vârf-vârf cu structuri inferioare

valoare mică. Atunci  $A = 0$  și  $k_{g2} = 1 + 0.6[h'/(2.h'+S_2)]$ , care este aceeași ecuație ca aceea din tabelul 2.1. Pentru un interval vârf-vârf orizontal, se consideră  $h' = 0$  și de aceea  $k_{g1} = 1.35 - (2S_1/h - 0.5)$ . Dacă  $S_1/h$  este mic, atunci  $k_{g1}$  devine egal cu 1.4.