3

Distribuţia discretă a supratensiunilor de comutaţie

3.1 Introducere

Importanţa supratensiunilor de comutaţie pentru izolaţia instalaţiilor de înaltă tensiune – linii de transport şi staţii de transformare - a fost sesizată după ce a apărut necesitatea trecerii la tensiuni din domeniul A, conform clasificării adoptate de CEI, respectiv la tensiuni mai mari de 245 kV. Înainte de apariţia primei linii de transport la 500 kV se ştiau puţine lucruri despre producerea supratensiunilor de comutaţie ca şi despre comportarea izolaţiei în aceste condiţii. Unele măsurători în reţele de 138 kV şi 345 kV au arătat că supratensiunile de comutaţie pot fi importante, iar unele încercări de laborator au arătat că rigiditatea la impulsuri de comutaţie este mai redusă decât la impulsuri de trăsnet.

Proiectarea primei linii de 500 kV s-a făcut cu metoda deterministă, deoarece natura aleatoare a supratensiunilor de comutaţie nu era luată în considerare, distribuţia de probabilitate pentru acestea nu era cunoscută, iar teoria şi modul de aplicare a metodei probabiliste nu erau încă dezvoltate.

Aceste două probleme au fost depăşite repede. Distribuţia supratensiunilor de comutaţie a fost obţinută folosind analizorul tranzitoriu de reţea (TNA= Transient Network Analyzer) prin comutarea aleatoare a întrerupătorului.

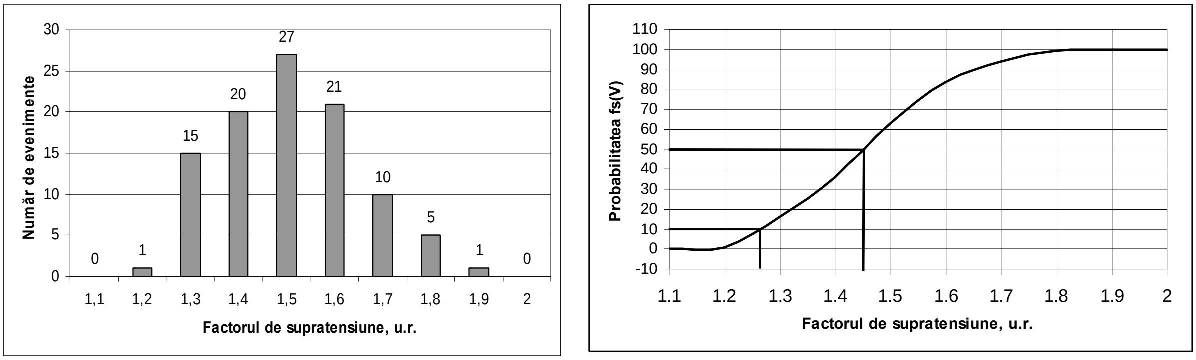
Astăzi, virtual, toate liniile de foarte înaltă tensiune sunt proiectate folosind metoda probabilistică. Această metodă este folosită la linii de 345 kV şi, uneori, chiar la 245 kV. Totuşi, la 245 kV şi mai jos, nu se iau în considerare supratensiunile de comutaţie.

Proiectarea liniilor considerând supratensiunile de comutaţie foloseşte noţiunile de solicitare şi ţinere. Solicitarea este dată de supratensiunile de comutaţie aplicate liniei, descrise printr-o distribuţie statistică. Ţinerea se referă la izolaţie care, de asemenea, poate fi descrisă statistic printr-o distribuţie cumulată de tip Gauss. Din aceste două distribuţii poate fi determinată probabilitatea unei descărcări datorită supratensiunilor.

Performanţa izolaţiei liniei în raport cu supratensiunile de comutaţie se exprimă, cel mai adesea, prin ***numărul specific de descărcări*** NDSC (SSFOR = **S**witching **S**urge **F**lash**O**ver **R**ate), respectiv numărul de descărcări pe care le suportă izolaţia la aplicarea a 100 impulsuri de comutaţie. Acest indicator se poate calcula pentru o distanţă izolantă dată, cunoscînd distribuţia factorilor de supratensiune. Invers, cunoscând riscul de descărcare admis, exprimat prin NDSC, şi distribuţia statistică a supratensiunilor, se poate determina distanţa disruptivă necesară.

3.2 Histograme pentru supratensiuni de comutaţie

Folosind TNA sau un program de calcul pentru regimuri tranzitorii (de exemplu ATP = Alternative Transient Program), se obţin valorile supratensiunilor de comutaţie luând în considerare funcţionarea aleatoare a unui întrerupător. Efectuând un număr suficient de mare de simulări, se poate pune în evidenţă probabilitatea de apariţie supratensiunilor de comutaţie în funcţie de mărimea lor exprimată prin factorul de supratensiune. În fig. 3.1,a sunt prezentate astfel de rezultate, care iau forma „clopotului lui Gauss”. Fiind considerate 100 de cazuri, numărul de



a) b)

Fig. 3.1 Histrograma factorilor de supratensiune (a) şi distribuţia cumulată a supratensiunilor (b)

înregistrări pentru un factor de supratensiune este numeric egal cu probabilitatea de apariţie, exprimată în procente. În fig. 3.1a), 1% dintre tensiuni au amplitudinea 1,9 u.r., 5% sunt egale cu 1,8 u.r. etc.

Folosind datele din fig. 3.1a, se poate întocmi curba distribuţiei cumulate a probabilităţilor, „curba în S” din fig.3.1,b. Pe această curbă, se pot găsi factorii de supratensiune corespunzători unor probabilităţi de apariţie: pentru 50% corespunde 1,45 u.r. iar pentru 10% corespunde 1,27 u.r.

Admiţând că distribuţia cumulată respectă ecuaţia distribuţiei normale Gauss, între valorile $\boldsymbol{V_{10}}$ şi $\boldsymbol{V_{50}}$ există relaţia**:**

$$V_{10} = V_{50}\left(1 - 1{,}28\frac{\sigma_0}{V_{50}}\right),$$

în care $\boldsymbol{\sigma_0}$ este dispersia factorilor de supratensiune. Această relaţie este formal identică cu aceea cazul ţinerii izolaţiei, care are tot caracter probabilistic, conform distribuţiei normale Gauss. Din această relaţie se poate extrage direct dispersia factorilor de supratensiune, raportată la valoarea medie a distribuţiei

$$\frac{\sigma_0}{V_{50}} = \frac{1}{1{,}28}\left(1 - \frac{V_{10}}{V_{50}}\right) = \frac{1}{1{,}28}\left(1 - \frac{1{,}27}{1{,}45}\right) = 0{,}097\,.$$

3.3. Determinarea numărului specific de descărcări (NDSC)

Producerea unei descărcări (conturnări) a izolaţiei supusă solicitării cu supratensiuni depinde atât de mărimea solicitării cât şi de nivelul ţinerii izolaţiei. Caracteristica ţinerii izolaţiei poate fi aproximată, de asemenea, cu o distribuţie cumulată Gauss.

De exemplu, în fig.3.2 este dată caracteristica ţinerii unei izolaţii având $\boldsymbol{U_{50}}$ = 900 kV şi abaterea standard de 45 kV, având deci un coeficient de variaţie de 5%.

Probabilitatea de apariţie a celei mai mari supratensiuni de comutaţie în fig.3.1 (de 855 kV, respectiv 1,9 u.r.), este de 1% sau 0,01. În fig. 3.2, acestei solicitări îi corespunde o probabilitate de descărcare p = 0,16. Această valoare se poate determina cu suficientă precizie, folosind tabelul de valori (în ANEXĂ) ale funcţiei de distribuţie cumulată normală Gauss scrisă sub forma redusă:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{Z} e^{-\frac{Z^2}{2}}\,dZ \tag{3.1}$$

în care

$$Z = \frac{V - U_{50}}{\sigma_f} \tag{3.2}$$

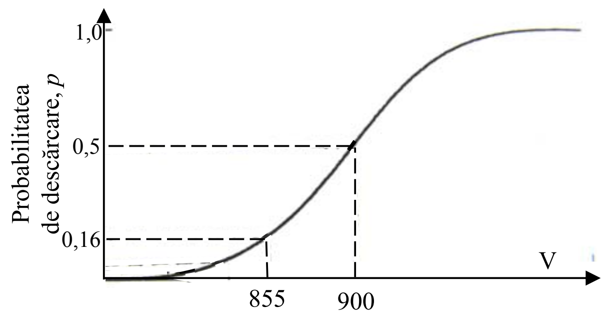


Fig. 3. 2 Caracteristica ţinerii izolaţiei

Pentru factorul de supratensiune 1,9 u.r. , respectiv o valoare de 855 kV:

$$Z = \frac{V - U_{50}}{\sigma_f} = \frac{855 - 900}{45} = -1 \tag{3.3}$$

Valorile funcţiei de distribuţie cumulată normale Gauss, ***F(Z)*** sunt date în tabelul din Anexă. Aceste valori respectă relaţia

$$F(-Z) = 1 - F(Z) \tag{3.4}$$

Din tabel, pentru $Z = 1$, $F(1) = 0{,}8413$,
astfel că

$$F(-1) = 1 - F(1) = 1 - 0{,}8413 = 0{,}1587$$

Probabilitatea de descărcare la aplicarea supratensiunii de 1,9 u.r. este deci 0,1587 (rotunjit 0,16). Deoarece probabilitatea de apariţie a supratensiunii de 1,9 u.r. este de 0,01, probabilitatea de a se produce o descărcare la această valoare a supratensiunii este de 0,001587 (0,1587 x 0,01).

Pentru celelalte valori ale factorului de supratensiune din fig. 3.1a, rezultatele calculelor similare sunt prezentate în tabelul 3.1., în care ***P(V)*** este probabilitatea de existenţă a supratensiunii ***V***, ***D(V) = p*** este probabilitatea unei descărcări la o solicitare cu supratensiunea ***V***, iar ***P(D) = P(V)* D(V)*** este probabilitatea de descărcare la solicitarea cu supratensiunea ***V***, considerând probabilitatea de apariţie a acestei solicitări.

Tabelul 3.1 Calculul probabilităţii de descărcare (**NDSC/SSFOR**)

V (u.r./kV)	*Z*	*P*(*V*)	*n* = 1 stâlp		*n* = 100 stâlpi	
			D(*V*) = *p*	*P*(*D*) = *P*(*V*)* *D*(*V*)	$D_n(V)$ = $1-(1-p)^n$	$P_n(D)$= *P*(*V*)* *D*(*V*)
0	1	2	3	4	5	6
1,9/855	-1	0,01	0,1587	0,00159	1,00000	0,01000
1,8/810	-2	0,05	0,02275	0,00114	0,8999	0,04499
1,7/765	-3	0,1	0,00135	0,00014	0,12636	0,01264
1,6/720	-4	0,21	0,0003267	0,0001	0,00797	0,00326
1,5/675	-5	0,27	0,0000028	0,0000	0,000028	0,00001
			Total NDSC	0,0028 sau **0,288/100**		0,0709 sau **7,09/100**

Pentru a obţine numărul specific de descărcări, NDSC, se adună rezultatele din coloana 4 şi se obţine totalul de 0,0028 pentru o comutaţie, respectiv 0,288 conturnări la 100 de comutaţii.

Mai multe izolaţii în paralel (mai mulţi stâlpi)

Distribuţia ţinerii izolaţiei din fig. 3.2 este valabilă pentru un stâlp (o singură izolaţie solicitată), dar o linie are mai mulţi stâlpi, iar supratensiunile se aplică simultan tuturor

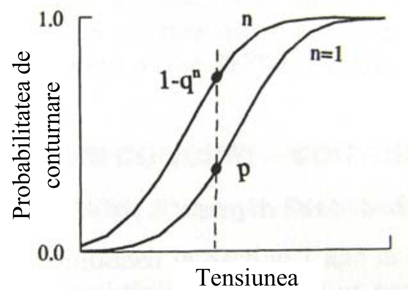


Fig. 3.3 Creşterea probabilităţii de conturnare pentru ***n*** stâlpi

izolatoarelor. Se adoptă notaţiile:

- ***p*** - probabilitatea de conturnare pentru izolaţia unui singur stâlp (valoarea din coloana 3 a tabelului 3.1),
- ***q****,* probabilitatea de a nu apărea conturnarea la un stâlp, $q = 1 - p$,
- ***n****,* numărul de stâlpi.

Considerând doi stâlpi, pot avea loc următoarele situaţii:

- lipsa descărcării la ambii stâlpi, probabilitatea fiind q^2 sau $(1-p)^2$.
- descărcare la primul stâlp şi lipsa descărcării la al doilea sau lipsa descărcării la primul şi descărcare la al doilea, probabilitatea fiind pq sau $p(1-p)$.
- descărcare la ambii stâlpi simultan, cu probabilitatea p^2.

Toate aceste probabilităţi însumate dau 1, deoarece unul dintre evenimente trebuie să aibă loc. Deci:

$$q^2 + 2pq + p^2 = 1.$$

Totuşi valoarea căutată este probabilitatea unei descărcări fie la primul, fie la al doilea stâlp sau la ambii, astfel că termenul q^2, care corespunde lipsei descărcărilor, se poate elimina, adică

$$2pq + p^2 = 1 - q^2.$$

Pentru ***n*** stâlpi aceasta devine $1 - q^n$. Probabilitatea de descărcare, la cel puţin un stâlp, pentru o supratensiune dată, V, devine:

$$D_n(V) = 1 - q^n = 1 - (1 - p)^n \tag{3.5}$$

Relaţia 3.5 arată că probabilitatea de conturnare este egală cu 1 minus probabilitatea de a nu apărea descărcarea la vreunul dintre stâlpi. Deoarece $q < 1$, $1 - q^n > 1 - q$**.** Fig. 3.3 prezintă această creştere a probabilităţii de descărcare pentru ***n*** stâlpi.

Folosind ecuaţia 3.5, calculul NDSC (SSFOR) decurge ca mai înainte şi este dat în Tabelul 3.1 (coloanele 5-6) pentru $n = 100$ stâlpi. Aşa cum era de aşteptat, NDSC (SSFOR)creşte la 7,09/100, dar numai partea superioară a distribuţiei supratensiunilor are o contribuţie importantă.

Variaţia factorului de supratensiune de-alungul liniei (profilul tensiunii)

În calculele anterioare, s-a considerat aceeaşi supratensiune la fiecare stâlp al liniei. Totuşi, supratensiunile diferă de-alungul linei, fiind mai reduse lângă întrerupătorul care a comutat decât la sfârşitul liniei. Profilul supratensiunii este dat în fig. 3.4 prin linia continuă.

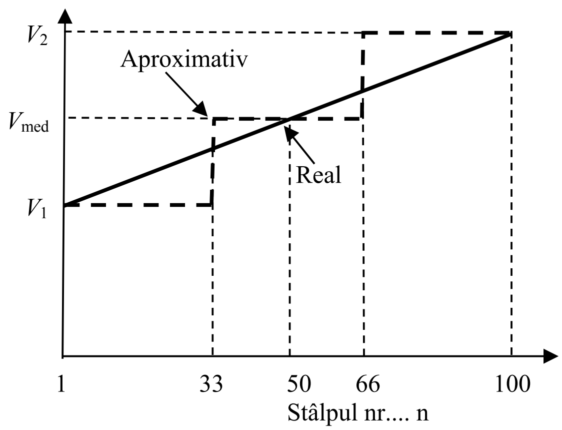


Fig. 3.4 Profilul longitudinal al factorilor de supratensiune

Continuând exemplul liniei cu 100 stâlpi, se presupune că $\boldsymbol{V_1 / V_2}$ este egal cu 0,9 şi vor fi considerate numai trei valori: tensiunea la sfârşitul liniei, $\boldsymbol{V_2}$, la mijlocul liniei $\boldsymbol{V_{med}}$ şi tensiunea $\boldsymbol{V_1}$,la începutul liniei, unde are loc comutaţia astfel încât profilul longitudinal al supratensiunilor este redat prin linia întreruptă. De asemenea, se presupune că pentru fiecare dintre aceste tensiuni revin câte $\boldsymbol{n}$ =33 stâlpi.

De exemplu $\boldsymbol{V_2}$ = 1,9 u.r., $\boldsymbol{V_1}$ =1,9 x 0,9 = 1,71 u.r., iar $\boldsymbol{V_{med}}$ = ($\boldsymbol{V_1}$ + $\boldsymbol{V_2}$)/2 = 1,805. Probabilitatea de a nu avea descărcări pentru $\boldsymbol{V_2}$ (1,9 u.r.) este q_2^n, probabilitatea de a nu avea descărcări pentru $\boldsymbol{V_{med}}$ este de q_{med}^n , iar probabilitatea de a nu avea descărcări pentru $\boldsymbol{V_1}$ este q_1^n . Probabilitatea de descărcare pentru întreaga liniei este

$$D_n(V) = 1 - q_2^n q_{med}^n q_1^n . \tag{3.6}$$

Calculele aferente sunt date în tabelul 3.2.

De exemplu:

Pentru $\boldsymbol{V_2}$/ $\boldsymbol{V_{med}}$/ $\boldsymbol{V_1}$/ = 1,9/1,805/1,71, rezultă $\boldsymbol{Z}$ =-1/-1,95/-2,9. Din ANEXĂ, se obţin valorile probabilităţii de descărcare, ***p***:

F(-1) = 1-F(1) = 1-0,8413 = **0,1587**;

F(-1,95) = 1-F(1,95) = 1-0,97441 = **0,02559**;

F(-2,9) = 1-F(2,9) = 1-0,998134 = **0,001866**.

Probabilităţile de ne-descărcare (***q***) vor fi: $\boldsymbol{q_2/q_{med}/q_1}$ = 0,8413 / 0,97441 / 0,998134.

Cu relaţia (3.6), rezultă o probabilitate de descărcare $D(V)$=1-0,8413^{33}. 0,97441^{33}. 998134^{33}= 0,99866

Deoarece probabilitatea de apariţie a supratensiunii respective este de 0,01, rezultă că probabilitatea descărcării pentru o tensiune de 1,9 u.r. la sfârşitul liniei este 0,99866 x 0,01 = 0,0099866.

Pe total, se obţine o reducere a NDSC de la 7,09/100 la 4,28/100.

Tabelul 3.2 Calculul probabilităţii de descărcare sau NDSC V_1/V_2 = 0,9

V u.r./kV	$P(V)$	q_2	q_{med}	q_1	$P_n(D/V)=1-q_2^n q_{med}^n q_1^n$	P_n[D] (%)
1,9/855	0,01	0,84134	0,97441	0,99813	0,99866	0,0099
1,8/810	0,05	0,97725	0,99813	0,99993	0,56111	0,2806
1,7/765	0,1	0,99865	0,99994	1,00000	0,04549	0,00455
1,6/720	0,21	0,99997	1,00000	1,00000	0,00108	0,00023
					Total NDSC	0,04283 **4,28/100**

3.4. Evaluarea solicitărilor (supratensiunilor)

Supratensiunile de comutaţie se determină de obicei folosind un program de calcul a regimurilor tranzitorii. Întrerupătoarele se închid aleator şi se obţin supratensiunile corespunzătoare. Pentru fiecare comutaţie, apare o supratensiune pe fiecare fază, iar probabilitatea de descărcare D(V) se poate calcula, pentru fiecare caz, cu relaţia

$$D(V)=\frac{1}{N}\left(1-q_A q_B q_C\right) \tag{3.7}$$

unde $\boldsymbol{q}_A$ este probabilitatea nici unei descărcări pe faza A etc., iar $\boldsymbol{N}$ este numărul de cazuri. Suma valorilor $\boldsymbol{D(V)}$ pentru cele $\boldsymbol{N}$ cazuri este NDSC. Această metodă este denumită adesea metoda forţei brute. Ea este cea mai exactă metodă deoarece consideră supratensiunile pe toate fazele aşa cum apar în fiecare caz.

Supratensiunile pot fi pozitive sau negative. Dacă sunt negative, pentru proiectare valorile $\boldsymbol{q}$ sunt egale cu 1 (nu se produc descărcări). De asemenea, dacă supratensiunile sunt mici, $\boldsymbol{q}$ este egal cu 1. De obicei, valorile $\boldsymbol{D(V)}$ sunt determinate numai de una dintre valorile $\boldsymbol{q}$, pentru o supratensiune pozitivă şi cea mai mare pentru cele trei faze.

Pentru a ocoli problemele legate de metoda forţei brute, datele pot fi colectate şi analizate prin două metode:

1. ***Metoda vârfului pentru caz.*** Se înregistrează supratensiunile pentru fiecare comutaţie. Se va reţine numai amplitudinea cea mai mare, de polaritate pozitivă sau negativă, indiferent de faza pe care apare. Această metodă presupune că predomină o singură supratensiune. Două dintre valorile $\boldsymbol{q}$, de exemplu $\boldsymbol{q}_B$ şi $\boldsymbol{q}_C$ sunt egale cu 1, încât, conform rel. 3.7,

$$D(V)=\frac{1}{N}\left(1-q_A\right)=\frac{1}{N}p_A. \tag{3.8}$$

Această probabilitate trebuie înmulţită cu ½ deoarece, supratensiuni de cele două polarităţi pot apărea cu aceeaşi frecvenţă, iar acelea negative sunt neglijate deoarece ţinerea izolaţiei la supratensiuni negative este mai mare semnificativ decât la polaritate pozitivă. NDSC (SSFOR) calculat prin această metodă este NDSC (SSFOR) pentru întrerupător acţionat trifazat sau NDSC (SSFOR) pentru linie.

2. ***Metoda vârfului pe fază.*** Metoda constă în folosirea a trei supratensiuni maxime, presupuse a avea polaritate pozitivă, câte una pentru cele trei faze. $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{V})$ se calculează individual, pentru fiecare

din cele trei supratensiuni. Astfel NDSC (SSFOR) se calculează pentru fiecare fază. Conform cu rel. 3.14, ***D***(***V***) este

$$D(V)=\frac{1}{3N}\left[(1-q_A)+(1-q_B)+(1-q_C)\right]=\frac{1}{3N}\left[p_A+p_B+p_C\right] \tag{3.9}$$

unde ecuaţia se împarte la 3***N*** deoarece sunt colectate de 3 ori mai multe date. Ca şi pentru metoda vârfului pe caz, probabilitatea trebuie de asemenea divizată cu 2. De obicei, două dintre valorile lui ***p*** sunt nule, astfel că, cu excepţia factorului 3***N***, rel. 3.7 şi 3.9 sunt identice. Pentru o obţine NDSC (SSFOR) sau suma valorilor ***D***(***V***), fiecare calcul trebuie multiplicat cu 3. Această problemă apare atunci când se foloseşte o distribuţie continuă pentru a reprezenta aceste trei valori ale supratensiunilor. În acest caz, se foloseşte următoarea relaţie pentru a obţine NDSC ca valoare aproximativă

$$NDSC=1-\left[1-NDSC_p\right]^3\approx 3NDSC_p \tag{3.10}$$

$NDSC_p$ este NDSC calculat folosind metoda de vârf pe fază. Pentru valorile $NDSC_p$ care, în mod normal, sunt mici, NDSC este bine aproximat cu 3NDSC.

ANEXA

Distribuţia statistică Gauss

Probabilitatea producerii unui eveniment ***X*** dintr-o mulţime de evenimente de aceeaşi natură se exprimă prin ponderea (în unităţi relative sau în procente) numărului de evenimente ***X*** în numărul total de evenimente considerate:

$$p(x) = \frac{N_X}{N}.$$

Dacă se reprezintă grafic probabilitatea de producere a fiecărui eveniment ***X*** în funcţie de mărimea ***X***, se obţine o curbă numită clopotul lui Gauss (fig.A1). Forma acestui grafic arată că evenimentele cu mărimi extreme (mici sau mari) au probabilitate de apariţie mult mai mică decât evenimentele cu valori apropiate de medie.

Reprezentarea grafică a probabilităţii cumulate de producere a evenimentelor are forma unei curbe în ***S*** (fig.A2).

Considerând cazul rezultatelor unor încercări ale izolaţiei în laborator, respectiv tensiunile disruptive care au amplitudinea ***V*,** ecuaţia curbei în S din fig. 2 este

$$p = D(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \int_{-\infty}^{V} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{V-U_{50}}{\sigma_f}\right)^2} dV \,. \qquad \text{(A1)}$$

D(V) reprezintă probabilitatea cumulată de obţinere a tensiunii disruptive de mărime cel mult ***V***. Valoarea particulară U_{50}**,** numită şi valoare medie corespunde probabilităţii cumulate de 50%

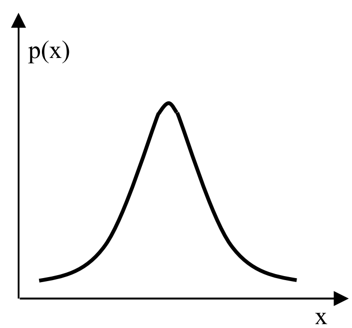


Fig.A1 Probabilitatea producerii unui eveniment

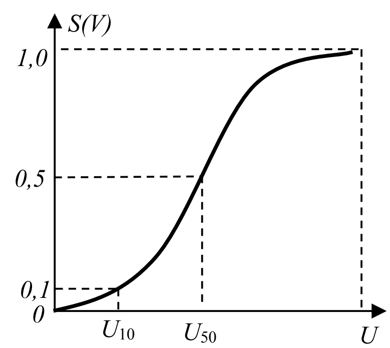


Fig.A2 Probabilitatea cumulată a ţinerii izolaţiei

(***D***(U_{50}) = 0,5)**.**

Abaterea valorilor ***V*** de la valoarea medie se exprimă prin parametrul σ_f denumit deviaţie standard. De obicei, deviaţia standard este indicată în u.r. sau procentual faţă de U_{50} şi este cunoscută drept *coeficient de variaţie* (σ_f^*).

Relaţia (A1) poate fi pusă sub o formă mai compactă dacă se introduce notaţia

$$Z = \frac{V - U_{50}}{\sigma_f}. \qquad \text{(A2)}$$

Această formă este

$$p = D(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \,. \tag{A3}$$

Limita inferioară a integrării, -∞, este o imposibilitate practică deoarece ar însemna că există o probabilitate de descărcare finită când tensiunea tinde la zero. Teste detaliate asupra ţinerii izolaţiei aer-porţelan arată că limita inferioară este cel mult cu $4\boldsymbol{\sigma_f}$ mai mică decât $\boldsymbol{U_{50}}$.

Determinarea prin calcul a probabilităţii cumulate conform distribuţiei Gauss necesită recurgerea la ajutorul calculatorului. Valorile funcţiei ***D(Z)***, conform cu relaţia (A3), sunt prezentate în tabelul A3, folosind notaţia generală ***F(Z)***.

Exemple

1. ***Distribuţia statistică a tensiunilor disruptive***

Parametrii specifici ai acestei distribuţii sunt $\boldsymbol{U_{50}}$ care corespunde probabilităţii de descărcare de 50% şi coeficientul de variaţie $\boldsymbol{\sigma_f}$**,** ambele exprimate în kV.

Se observă în tabel că funcţia ***F(Z)*** ia valori în domeniul (0,5 – 1), pentru valori ale variabilei ***Z*** de la 0 la 4,99. Valoarea ***Z*** = 0 corespunde tensiunii $\boldsymbol{U_{50}}$, a cărei probabilitate de apariţie este de 0,5 (50%).

Pentru cazul probabilităţilor de descărcare mai mici de 50%, ***Z < 0***, astfel că trebuie folosită proprietatea funcţiei ***F(Z)***:

F(- ***Z***) = 1 - ***F***(***Z***), respectiv, ***F***(***Z***) = 1 - ***F***(-***Z***).

Astfel pentru a găsi valoarea tensiunii $\boldsymbol{U_{10}}$, corespunzătoare probabilităţii de descărcare de 10% se caută în tabelul A3, mărimea parametrului **- *Z*,** corespunzătoare valorii 1- ***F***(***Z***) = 1 – 0,1 = 0,9. Se găseşte - ***Z*** = 1,28.

Introducând acest rezultat în relaţia (A2)

$$-1{,}28 = \frac{U_{10} - U_{50}}{\sigma_f}.$$

se obţine (A4).

$$U_{10} = U_{50}\left(1 - 1{,}28\,\frac{\sigma_f}{U_{50}}\right) . \tag{A4}$$

Procedând la fel, pentru probabilitatea de descărcare de 0,1% = 0,001, 1- ***F***(***Z***) = 1 – 0,001 = 0,999. Din tabelul A3 se găseşte – ***Z*** = 3,09. Aşadar

$$U_{0,1} = U_{50}\left(1 - 3{,}09\frac{\sigma_f}{U_{50}}\right). \tag{A.5}$$

2. Distribuţia statistică a mării supratensiunilor de comutaţie.

Mărimile supratensiunilor obţinute prin încercări în reţele sau prin simulare pe calculator se supun aceleaşi legi de distribuţie normală Gauss. Această distribuţie se descrie prin $\boldsymbol{\mu_0}$ corespunzătoare probabilităţii de 50% şi coeficientul de variaţie $\boldsymbol{\sigma_0}$.

Pentru această distribuţie parametrul ***Z*** are expresia

$$Z = \frac{E - \mu_0}{\sigma_0}. \tag{A.6}$$

Una dintre mărimile supratensiunilor care prezintă interes pentru dimensionarea izolaţiei este $\boldsymbol{E_2}$ având probabilitatea de a fi depăşită de 2%, respectiv probabilitatea de apariţie de 98%.

În acest caz, ***F***(***Z***) = 0,98. Se obţine din tabel ***Z*** ≈ 2,06, valoarea exactă fiind 2,054. Prin introducere în relaţia (A2) rezultă (A7).

$$E_2 = \mu_0 + 2{,}054\sigma_0. \tag{A7}$$

Tabelul A3 - Funcţia de distribuţie cumulată normală, valori ale $F(Z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{Z} e^{-\frac{Z^2}{2}}\,dZ$

Z	**0.00**	**0.01**	**0.02**	**0.03**	**0.04**	**0.05**	**0.06**	**0.07**	**0.08**	**0.09**
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5526	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.9026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7057	0.7088	0.7123	00.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7703	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8368	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8489	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.90147
1.3	0.9032	0.9049	0.90658	0.90824	0.90988	0.91149	0.91309	0.91466	0.91621	0.91774
1.4	0.91924	0.92073	0.9222	0.92364	0.92507	0.92647	0.92785	0.92922	0.93056	0.93189
1.5	0.93319	0.93448	0.93574	0.93699	0.93822	0.93943	0.94062	0.94179	0.94295	0.94408
1.6	0.9452	0.9463	0.94738	0.94845	0.9495	0.95053	0.95154	0.95254	0.95352	0.95449
1.7	0.95543	0.95637	0.95728	0.95818	0.95907	0.95994	0.9608	0.96164	0.96246	0.96327
1.8	0.96407	0.94485	0.96562	0.96638	0.96712	0.96784	0.96856	0.96926	0.96995	0.97062
1.9	0.97128	0.97193	0.97257	0.97320	0.97381	0.97441	0.9750	0.97558	0.97615	0.97670
2.0	0.97725	0.97778	0.97831	0.97882	0.97932	0.97982	0.9803	0.98077	0.97124	0.98169
2.1	0.98214	0.98257	0.9830	0.98341	0.98382	0.98422	0.98461	0.9850	0.98537	0.98574
2.2	0.9861	0.98645	0.98679	0.98713	0.98745	0.98778	0.98809	0.9884	0.9887	0.98899
2.3	0.98928	0.98956	0.98983	$0.9^{2}0097$	$0.9^{2}0458$	$0.9^{2}0613$	$0.9^{2}0863$	$0.9^{2}1106$	$0.9^{2}1344$	$0.9^{2}1576$
2.4	$0.9^{2}1802$	$0.9^{2}2024$	$0.9^{2}2240$	$0.9^{2}2451$	$0.9^{2}2656$	$0.9^{2}2857$	$0.9^{2}3053$	$0.9^{2}3244$	$0.9^{2}3431$	$0.9^{2}3613$
2.5	$0.9^{2}379$	$0.9^{2}3963$	$0.9^{2}4132$	$0.9^{2}4297$	$0.9^{2}4457$	$0.9^{2}4614$	$0.9^{2}4766$	$0.9^{2}4915$	$0.9^{2}506$	$0.9^{2}5201$
2.6	$0.9^{2}5339$	$0.9^{2}5473$	$0.9^{2}5604$	$0.9^{2}5731$	$0.9^{2}5855$	$0.9^{2}5975$	$0.9^{2}6093$	$0.9^{2}6207$	$0.9^{2}6319$	$0.9^{2}6427$
2.7	$0.9^{2}6533$	$0.9^{2}6636$	$0.9^{2}6736$	$0.9^{2}6833$	$0.9^{2}6928$	$0.9^{2}702$	$0.9^{2}711$	$0.9^{2}7197$	$0.9^{2}7282$	$0.9^{2}7365$
2.8	$0.9^{2}7445$	$0.9^{2}7523$	$0.9^{2}7599$	$0.9^{2}7673$	$0.9^{2}7744$	$0.9^{2}7814$	$0.9^{2}7882$	$0.9^{2}7948$	$0.9^{2}8012$	$0.9^{2}8074$
2.9	$0.9^{2}8134$	$0.9^{2}8493$	$0.9^{2}825$	$0.9^{2}8305$	$0.9^{2}8359$	$0.9^{2}8411$	$0.9^{2}8462$	$0.9^{2}8511$	$0.9^{2}8559$	$0.9^{2}8605$
3.0	$0.9^{2}865$	$0.9^{2}8694$	$0.9^{2}8736$	$0.9^{2}8777$	$0.9^{2}8817$	$0.9^{2}8856$	$0.9^{2}8893$	$0.9^{2}893$	$0.9^{2}8965$	$0.9^{2}8999$
3.1	$0.9^{3}0324$	$0.9^{3}0646$	$0.9^{3}0957$	$0.9^{3}126$	$0.9^{3}1553$	$0.9^{3}1836$	$0.9^{3}2112$	$0.9^{3}2378$	$0.9^{3}2636$	$0.9^{3}2886$
3.2	$0.9^{3}3129$	$0.9^{3}3363$	$0.9^{3}359$	$0.9^{3}381$	$0.9^{3}4024$	$0.9^{3}423$	$0.9^{3}4429$	$0.9^{3}4623$	$0.9^{3}481$	$0.9^{3}4991$
3.3	$0.9^{3}5166$	$0.9^{3}5335$	$0.9^{3}5499$	$0.9^{3}5658$	$0.9^{3}5811$	$0.9^{3}5959$	$0.9^{3}6103$	$0.9^{3}6242$	$0.9^{3}6376$	$0.9^{3}6505$
3.4	$0.9^{3}6613$	$0.9^{3}6752$	$0.9^{3}6869$	$0.9^{3}6982$	$0.9^{3}7091$	$0.9^{3}7197$	$0.9^{3}7299$	$0.9^{3}7398$	$0.9^{3}7493$	$0.9^{3}7585$
3.5	$0.9^{3}7674$	$0.9^{3}7759$	$0.9^{3}7842$	$0.9^{3}7922$	$0.9^{3}7999$	$0.9^{3}8074$	$0.9^{3}8146$	$0.9^{3}8215$	$0.9^{3}8282$	$0.9^{3}8347$
3.6	$0.9^{3}8409$	$0.9^{3}8469$	$0.9^{3}8527$	$0.9^{3}8583$	$0.9^{3}8637$	$0.9^{3}8689$	$0.9^{3}8739$	$0.9^{3}8787$	$0.9^{3}8834$	$0.9^{3}8879$
3.7	$0.9^{3}8922$	$0.9^{3}8964$	$0.9^{4}0039$	$0.9^{4}0426$	$0.9^{4}0799$	$0.9^{4}1158$	$0.9^{4}1504$	$0.9^{4}1838$	$0.9^{4}2159$	$0.9^{4}2468$
3.8	$0.9^{4}2765$	$0.9^{4}3052$	$0.9^{4}3327$	$0.9^{4}3593$	$0.9^{4}3848$	$0.9^{4}4094$	$0.9^{4}4331$	$0.9^{4}4558$	$0.9^{4}4777$	$0.9^{4}4988$
3.9	$0.9^{4}5190$	$0.9^{4}5385$	$0.9^{4}5573$	$0.9^{4}5753$	$0.9^{4}5926$	$0.9^{4}6092$	$0.9^{4}6253$	$0.9^{4}6406$	$0.9^{4}6554$	$0.9^{4}6696$
4.0	$0.9^{4}6833$	$0.9^{4}6964$	$0.9^{4}709$	$0.9^{4}7211$	$0.9^{4}7327$	$0.9^{4}7439$	$0.9^{4}7546$	$0.9^{4}7649$	$0.9^{4}7748$	$0.9^{4}7843$
4.1	$0.9^{4}7934$	$0.9^{4}8022$	$0.9^{4}8106$	$0.9^{4}8186$	$0.9^{4}8263$	$0.9^{4}8338$	$0.9^{4}8409$	$0.9^{4}8477$	$0.9^{4}8542$	$0.9^{4}8605$
4.2	$0.9^{4}8665$	$0.9^{4}8723$	$0.9^{4}8778$	$0.9^{4}8832$	$0.9^{4}8882$	$0.9^{4}8931$	$0.9^{4}8978$	$0.9^{5}0226$	$0.9^{5}0655$	$0.9^{5}1066$
4.3	$0.9^{5}146$	$0.9^{5}1837$	$0.9^{5}2199$	$0.9^{5}2545$	$0.9^{5}2876$	$0.9^{5}3193$	$0.9^{5}3497$	$0.9^{5}3788$	$0.9^{5}4066$	$0.9^{5}4332$
44	$0.9^{5}4587$	$0.9^{5}5065$	$0.9^{5}5165$	$0.9^{5}5288$	$0.9^{5}5502$	$0.9^{5}5706$	$0.9^{5}5902$	$0.9^{5}6089$	$0.9^{5}6268$	$0.9^{5}6349$
4.5	$0.9^{5}6602$	$0.9^{5}6759$	$0.9^{5}6908$	$0.9^{5}7051$	$0.9^{5}7187$	$0.9^{5}7318$	$0.9^{5}7442$	$0.9^{5}7561$	$0.9^{5}7675$	$0.9^{5}7784$
4.6	$0.9^{5}7888$	$0.9^{5}7987$	$0.9^{5}8081$	$0.9^{5}8172$	$0.9^{5}8258$	$0.9^{5}834$	$0.9^{5}8419$	$0.9^{5}8494$	$0.9^{5}8566$	$0.9^{5}8634$
4.7	$0.9^{5}8699$	$0.9^{5}8761$	$0.9^{5}8821$	$0.9^{5}8877$	$0.9^{5}8931$	$0.9^{5}8983$	$0.9^{6}032$	$0.9^{6}0789$	$0.9^{6}1235$	$0.9^{6}1661$
4.8	$0.9^{6}2067$	$0.9^{6}2453$	$0.9^{6}2822$	$0.9^{6}3173$	$0.9^{6}3508$	$0.9^{6}3827$	$0.9^{6}4131$	$0.9^{6}4420$	$0.9^{6}4696$	$0.9^{6}4958$
4.9	$0.9^{6}5208$	$0.9^{6}5446$	$0.9^{6}5673$	$0.9^{6}5889$	$0.9^{6}6094$	$0.9^{6}6289$	$0.9^{6}6475$	$0.9^{6}6652$	$0.9^{6}6821$	$0.9^{6}6981$

Funcţia ***F(Z)*** prezintă proprietatea

$$\boldsymbol{F}(-\boldsymbol{Z}) = 1 - \boldsymbol{F}(\boldsymbol{Z}),\ \text{respectiv},\ \boldsymbol{F}(\boldsymbol{Z}) = 1 - \boldsymbol{F}(-\boldsymbol{Z})$$