4
Distribuțiile continue ale ținerii şi solicitărilor

4.1 Evaluarea NDSC – numărul specific de descărcări la supratensiuni de comutație

Distribuția ținerii sau caracteristica ținerii unei izolații la supratensiuni de comutație poate fi descrisă printr-o distribuție cumulată Gauss $\boldsymbol{D(V)}$ având o valoare mediană notată cu $\boldsymbol{U_{50}}$ şi o deviație standard $\boldsymbol{\sigma_f}$. Pentru supratensiuni de comutație, $\boldsymbol{\sigma_f}$ este aproximativ egală cu 5% din $\boldsymbol{U_{50}}$, altfel scris $\boldsymbol{\sigma_f / U_{50}} = \sigma_f^* = 0{,}05$.

Distribuția solicitărilor sau distribuția supratensiunilor de comutație poate fi reprezentată printr-o funcție de densitate a probabilității $\boldsymbol{S(V)}$, având o valoare mediană $\boldsymbol{\mu_0}$ şi o deviație standard $\boldsymbol{\sigma_0}$. Dacă mărimea supratensiunilor de comutație se ia în considerare prin valoarea $\boldsymbol{E_2}$ şi deviația standard $\boldsymbol{\sigma_0}$, valoarea mediană a distribuției se poate calcula cu

$$\mu_0 = E_2 - 2{,}054\sigma_0.$$

Problema este de a determina probabilitatea ca solicitarea să depăşească ținerea sau probabilitatea ca ținerea să fie mai mică decât solicitarea.

Probabilitatea incrementală ca tensiunea $\boldsymbol{V}$ să apară este $\boldsymbol{S(V)dV}$, iar probabilitatea ca să apară o descărcare la tensiunea $\boldsymbol{V}$ este $\boldsymbol{D(V)}$ sau mai simplu $\boldsymbol{p}$. Aşadar:

Probabilitatea incrementală a unei descărcări la tensiunea $\boldsymbol{V}$ este notată cu $\boldsymbol{dP}$ şi constă în multiplicarea acestor valori adică

$$dP = p\, S(V)dV = D(V)\, S(V)dV \tag{4.1}$$

Probabilitatea de descărcare, considerând toate supratensiunile de comutație, este suma valorilor ec. 4.1 pentru toate supratensiunile, adică

$$NDSC = P(D) = \frac{1}{2}\int_{E_1}^{E_m} pS(V)dV \tag{4.2}$$

unde NDSC (SSFOR=**S**witching **S**urge **F**lash**o**ver **R**ate) este numărul specific de descărcări la impulsuri de comutație. Integrarea se efectuează între $\boldsymbol{E_1}$, supratensiunea minimă care este de obicei 1 u.r. până la $\boldsymbol{E_m}$ care este supratensiunea maximă de comutație.

Distribuția supratensiunilor de comutație este formată din toate valorile pozitive sau negative, respectiv jumătate din valori sunt pozitive şi celelalte sunt negative. Se cunoaşte că ținerea izolației pentru polaritatea negativă este semnificativ mai mare decât pentru polaritatea pozitivă. De aceea supratensiunile de polaritate negativă pot fi neglijate, iar pentru calculul NDSC integrala se multiplică cu ½.

Utilizarea relației (4.2) necesită utilizarea unui program de calcul numeric având în vedere expresiile distribuțiilor de probabilitate pentru ținere şi pentru solicitări. **În cazul unui număr mare de izolații în paralel**, aşa cum sunt liniile electrice aeriene, se poate folosi o metodă simplificată de calcul, abordabilă manual.

4.2 Determinarea NDSC (SSFOR). Metoda Brown

Metoda Brown se foloseşte pentru calculul NDSC (SSFOR) în cazul unui număr mare de izolații în paralel, ceea ce este cazul liniilor de transport, care au sute de stâlpi. **Esența metodei este de a înlocui distribuția Gauss a ținerii izolațiilor în paralel cu o valoare unică**, U_{50n}. Metoda se poate folosi atât pentru mărime constantă a factorului de supratensiune de-alungul liniei, cât şi pentru cazul unui profil al supratensiunilor definit prin raportul E_S/E_R.

4.2.1 $E_S/E_R = 1$ Aceeaşi supratensiune apare la toți stâlpii

Aşa cum se vede în fig. 4.1, cu cât creşte numărul de stâlpi, caracteristica ținerii devine mai abruptă sau deviația standard devine mai mică. Pentru un singur stâlp, probabilitatea de descărcare este p, iar pentru n stâlpi, creşte de la p la $1-q^n = 1-(1-p)^n$. În fig. 4.2, ținerea este reprezentată printr-o valoare egală cu U_{50n}, ceea ce permite să se exprime probabilitatea de descărcare (NDSC/SSFOR) prin relația

$$NDSC = \frac{1}{2}\int_{U_{50n}}^{E_m} S(V)dV\,, \tag{4.3}$$

Pentru distribuția Gauss a supratensiunilor, relația precedentă se poate scrie

$$NDSC = \frac{1}{2}\left[F\left(\frac{E_m-\mu_0}{\sigma_0}\right)-F\left(\frac{U_{50n}-\mu_0}{\sigma_0}\right)\right] \tag{4.4}$$

unde μ_0 şi σ_0 sunt valoarea mediană şi dispersia distribuției supratensiunilor.

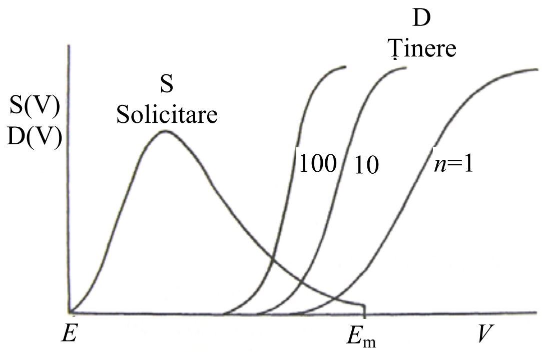

Fig. 4. 1 Panta caracteristicii ținerii creşte odată cu creşterea numărului de stâlpi

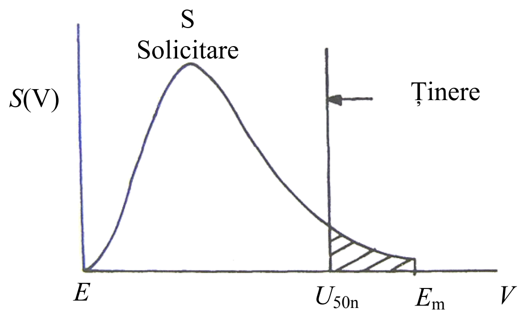

Fig. 4. 2 Calculul simplificat dacă ținerea are o valoare unică

Determinarea mărimii U_{50n}

Prin definiție, U_{50n} este U_{50} pentru n stâlpi şi se poate obține cunoscând caracteristica ținerii pentru un singur stâlp, ca în fig. 4.3. Ca şi U_{50} pentru un stâlp, U_{50n} pentru n stâlpi este definit pentru o probabilitate de 50%. Obiectivul este de a calcula probabilitatea p pe caracteristica ținerii unui singur stâlp, ceea ce este echivalent cu U_{50n} pentru n stâlpi. De aceea

$$\begin{aligned} 0{,}5 &= 1-(1-p)^n \\ p &= 1-\sqrt[n]{0{,}5} \end{aligned} \tag{4.5}$$

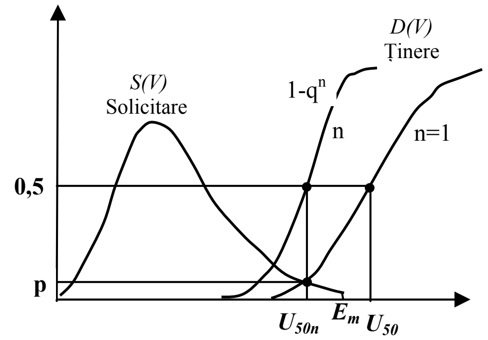

Fig. 4.3 Influența numărului de stâlpi

Pentru valoarea lui p, în tabelul valorilor numerice ale distribuției cumulate se găseşte valoarea variabilei reduse Z **,** care este notată în acest caz Z_f**:**

$$Z_f = \frac{U_{50n} - U_{50}}{\sigma_f}. \tag{4.6}$$

Rezultă relația de calcul pentru U_{50n}:

$$U_{50n} = U_{50}\left(1 + Z_f \frac{\sigma_f}{U_{50}}\right) \tag{4.7}$$

De remarcat că valoarea Z_f este, negativă, deoarece $U_{50n} < U_{50}$.

Pentru ilustrare un exemplu:

- fie n = 200, $p = 1 - \sqrt[200]{0,5} = 0,00346$.
- Deoarece s-a obținut $p = F(Z) < 0,5$ pentru găsirea valorii Z se foloseşte proprietatea $F(-Z) = 1-F(Z) = 1-p = 1-0,00346 = 0,99654$.
- Pentru 1- p = 0,99654 corespunde, din tabel, valoarea $-Z = 2,70$, respectiv $Z_f = -2,70$.
- Înlocuind în relația (4.7) şi considerând σ_f / U_{50} egal cu 5%

$$U_{50n} = U_{50}\left(1 + Z_f \frac{\sigma_f}{U_{50}}\right) = U_{50}(1 - 2,7 * 0,05) = 0,865 U_{50}.$$

- Considerând, de exemplu, că U_{50} = 1000 kV, se obține U_{50n} = 865 kV,
- Distribuția supratensiunilor are parametrii E_2 = 900 kV, σ_0/E_2 =0,11. Mărimea E_m se consideră, de regulă, cu o deviație standard peste E_2. Se obține E_m=999 kV (având probabilitatea de a fi depăşită de cca. 1,1%).

$\mu_0 = E_2 - 2,054\sigma_0 = E_2(1-2,054\ \sigma_0^*) = 900(1-2,054*0,11) = 696,7$ kV

- Conform (4.4), NDSC este

$$NDSC = \frac{1}{2}\left[F\left(\frac{999-696,7}{99}\right) - F\left(\frac{865-696,7}{99}\right)\right] =$$
$$= \frac{1}{2}\left[F(3,05) - F(1,70)\right] = \frac{1}{2}\left[0,998856 - 0,95543\right]$$
$$\approx 0,0217 = 2,17/100$$

unde $F(3,05)$ şi $F(3,05)$ se obține din tabelul valorilor funcției distribuției probabilităților cumulate.

Dacă s-ar considera $\boldsymbol{E_m} = \boldsymbol{E_2}+2\boldsymbol{\sigma_0} = \boldsymbol{E_2}(1+2\boldsymbol{\sigma_0}^*) = 900(1+2*0,11) = 1098$ kV, (cu probabilitate de a fi depăşită de $2,5*10^{-5}$, primul termen al relației NDSC de mai sus ar deveni $F(4,054) = 0,999974$. Aşadar, primul termen al relației de calcul a NDSC poate fi aproximat cu 1,00 ceea ce arată că $\boldsymbol{E_m}$ rareori trebuie considerat sau calculat.

4.2.2 $E_S/E_R \neq 1$ Se consideră profilul longitudinal al supratensiunilor

Numărul echivalent de stâlpi, n_e

Profilul longitudinal al supratensiunilor se ia în considerare prin calculul numărului echivalent de stâlpi, $\boldsymbol{n_e}$, care apoi este folosit în rel. 4.5. Valoarea $\boldsymbol{n_e}$ este numărul de stâlpi care, pentru $\boldsymbol{E_S}/\boldsymbol{E_R} = 1$, dă aceeaşi valoare NDSC ca şi pentru numărul real de stâlpi considerând valorile specificate $\boldsymbol{E_S}/\boldsymbol{E_R}$.

$\boldsymbol{E_S}$ reprezintă supratensiunea la începutul liniei (**S**ending End = începutul liniei), iar $\boldsymbol{E_R}$ este supratensiunea la sfârşitul liniei (**R**eceiving End = sfârşitul liniei).

Numărul echivalent de stâlpi poate fi estimat din ecuația:

$$n_e = \frac{k_n}{1-\gamma}\frac{\sigma_f}{U_{50}}n \tag{4.8}$$

unde

$$\gamma = \frac{E_S}{E_R}. \tag{4.9}$$

$\boldsymbol{k_n}$ este funcție de $\boldsymbol{n_e}$. Teoretic, $\boldsymbol{k_n}$ trebuie determinat iterativ. Totuşi, pentru un număr de 30 – 500 stâlpi, se poate folosi o valoare medie de 0,4 pentru $\boldsymbol{k_n}$. Astfel

$$n_e = \frac{0{,}4}{1-\gamma}\frac{\sigma_f}{U_{50}}n\ . \tag{4.10}$$

Ca exemplu, se consideră cazul anterior pentru distribuția Gauss cu 200 stâlpi, dar se presupune că $\boldsymbol{E_S}/\boldsymbol{E_R}=0,9$. Rezultă

$$n_e = \frac{0.4}{1-\gamma}\frac{\sigma_f}{U_{50}}n = \frac{0{,}4}{1-0{,}9}*0{,}05*200 = 40$$

Mai departe,

$$p = 1-\sqrt[40]{0{,}5} = 1-0{,}9828\ .$$

Ca mai sus, se obține $\boldsymbol{Z_f} = -2,12$ pentru care

$$U_{50_n} = U_{50}\left(1+Z_f\frac{\sigma_f}{U_{50}}\right) = U_{50}(1-2{,}12*0{,}05) = 0{,}894U_{50} = 894kV$$

$$NDSC = \frac{1}{2}\left[F\left(\frac{999-696{,}7}{99}\right)-F\left(\frac{895-696{,}7}{99}\right)\right] = \frac{1}{2}\left[F(3{,}05)-F(2{,}0)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[0{,}998856-0{,}97725\right] \approx 0{,}0108 = 1{,}08/100$$

4.3 Calculul raportului V_3/E_2 pentru NDSC(SSFOR) impus

Un avantaj important al metodei expuse mai sus este că aceasta poate fi utilizată pentru a obține direct valoarea necesară a raportului $\boldsymbol{V_3/E_2}$ dacă se pleacă de la o valoare impusă a NDSC, ceea ce este o problemă uzuală de proiectare. Cu $\boldsymbol{V_3}$ s-a definit arbitrar tensiunea de ținere statistică pentru izolația liniei (probabilitate de descărcare de 0,1%), valoare care se foloseşte pentru dimensionarea distanțelor izolante:

$$V_3 = U_{50}\left(1 - 3\frac{\sigma_f}{U_{50}}\right). \tag{4.11}$$

Cunoscând distribuția supratensiunilor (dată prin $\boldsymbol{E_2}$ şi $\boldsymbol{\mu_0}$), se poate determina $\boldsymbol{U_{50}}$ şi distanța izolantă corespunzătoare.

Pentru a aplica această metodă, rel. 4.7 poate fi pusă sub forma:

$$U_{50n} = \frac{V_3}{K_f}, \tag{4.12}$$

de unde

$$K_f = \frac{1 - 3\sigma_f / U_{50}}{1 + Z_f\left(\sigma_f / U_{50}\right)}. \tag{4.13}$$

Considerând egal cu 1 primul termen al rel. 4.6, NDSC este

$$NDSC = \frac{1}{2}\int_{U_{50n}}^{E_m} S(V)dV = \frac{1}{2}\left[1 - F(Z_e)\right] \tag{4.14}$$

sau

$$2 * NDSC = 1 - F(Z_e) \tag{4.15}$$

unde

$$Z_e = \frac{U_{50n} - \mu_0}{\sigma_0}. \tag{4.16}$$

$\boldsymbol{Z_e}$, conform ec. 4.16, se obține din tabelul probabilităților cumulate pentru NDSC impus. În continuare, din (4.16) se obține

$$U_{50n} = Z_e\sigma_0 + \mu_0.$$

Folosind relația dintre $\boldsymbol{\mu_0}$ şi $\boldsymbol{E_2}$ $\quad \mu_0 = E_2 - 2{,}054\sigma_0$

$$U_{50n} = Z_e\sigma_0 + E_2 - 2{,}054\sigma_0 == E_2 - \left(2{,}054 - Z_e\right)\sigma_0. \tag{4.17}$$

Din rel. (4.12) şi (4.17) rezultă

$$\frac{V_3}{K_f} = \left[E_2 - \left(2{,}054 - Z_e\right)\sigma_0\right] \tag{4.18}$$

sau

$$\frac{V_3}{E_2} = K_f K_G \tag{4.19}$$

în care

$$K_G = 1 - \left(2{,}054 - Z_e\right)\frac{\sigma_0}{E_2}. \tag{4.20}$$

Raportul V_3/E_2 poate fi obținut direct din K_f care este funcție numai de ținere şi K_G care este funcție numai de solicitare.

Exemplu:
Se cere valoarea raportului V_3/E_2 pentru NDSC = 1,5/100. Fie n = 200, σ_0/E_2 =0,08 şi σ_f/U_{50} =0,05.

- p = 1- $\sqrt[200]{0,5}$ = 0,003460. Fiind mai mică decât 0,5, acestei valori îi corespunde Z_f = -2,70 şi

$$K_f = \frac{1-3\sigma_f/U_{50}}{1+Z_f\left(\sigma_f/U_{50}\right)} = \frac{1-3*0,05}{1-2,7*0,05} = 0,9827\,.$$

- Din relația (4.15), se obține $F(Z_e)$ = 1-2*NDSC. Pentru NDSC = 1,5/100, $F(Z_e)$ = 1-2*0,015 = 0,97. Din tabelul probabilităților cumulare, Z_e = 1,88 şi, ca urmare
- $K_G = 1-\left(2,054-Z_e\right)\dfrac{\sigma_0}{E_2} = 1-\left(2,054-1,88\right)*0,08 = 0,9862$
- Astfel, $\dfrac{V_3}{E_2} = 0,9827*0,9862 = 0,9691$.

Influența profilului longitudinal al supratensiunilor se ia în considerare ca mai înainte. De exemplu, dacă E_S/E_R = 0,9 şi σ_f/U_{50} = 0,05, rezultă n_e = 40. Procedând ca mai sus precedent, K_f = 0,9507, iar K_G nu se modifică. Rezultă V_3/E_2 = 0,9376.
Acest rezultat se utilizează pentru determinarea mărimii V_3, necesară pentru dimensionarea distanței disruptive.

4.4 Exemplu

Să se determine distanța disruptivă şi lungimea lanțului de izolatoare pentru un stâlp de 500 kV, dacă NDSC = 1,0/100. Pe toate fazele sunt lanțuri de izolatoare în V. Altitudinea liniei este 1500 m.
Supratensiunile de comutație: distribuție Gauss , E_2 = 810 kV, σ_0/E_2 = 0,07, $E_S/E_R = \gamma$ = 0,90.
Ținerea : σ_f/U_{50} = 0,05, n = 250, lățimea coloanei stâlpului W = 1,6 m, înălțimea conductorului h = 18 m.

1. Calcule preliminare

$$\delta = e^{-A/8,6} = 0,840;\; n_e = \frac{0,4\sigma_f^*}{1-\gamma} = \frac{0,4*0,05}{1-0,9}250 = 50;\; p = 1-\sqrt[50]{0,5} = 1-0,9862 = 0,01376;$$

$$Z_f = -2,2.$$

$$K_f = \frac{1-3\sigma_f/U_{50}}{1+Z_f\left(\sigma_f/U_{50}\right)} = \frac{1-3*0,05}{1-2,2*0,05} = 0,9551$$

Pentru NDSC = 1,0/100, $F(Z_e)$ = 1-2*0,01 = 0,98. Rezultă Z_e = 2,06 şi, ca urmare

$K_G = 1-\left(2,054-Z_e\right)\dfrac{\sigma_0}{E_2} = 1-\left(2,054-2,06\right)*0,08 = 1,00048$. Practic, K_G=1.

$$\frac{V_3}{E_2} = K_f K_G = 0{,}9551*1 = 0{,}9551 .$$

$$V_3 = 0{,}9551*810 = 774\,kV \quad U_{50} = \frac{V_3}{1-3\sigma_f / U_{50}} = \frac{774}{1-3*0{,}05} = 910\,kV$$

Aceasta este valoarea necesară a ținerii la altitudinea liniei, $\boldsymbol{U_{50A}}$.

2. Dimensionarea distanțelor disruptive:

Faza centrală:

$$S = \frac{8}{\dfrac{0{,}96*3400*k_g*\delta^m}{U_{50A}} - 1} .$$

Este necesar un calcul iterativ. Pentru primul pas, fie m = 0,5, k_g =1,20. Rezultă S = 2,72 m. Cu aceste rezultat, se reia calculul, folosind relațiile următoare:

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

$$U_{50S} = 0{,}96 k_g \frac{3400}{1+8/S} \qquad G_0 = \frac{U_{50S}}{500S} \qquad m = 1{,}25 G_0 (G_0 - 0{,}2)$$

Tabelul 4.1 Iterațiile pentru faza centrală

S	k_g	U_{50S}	G_0	m	S
	1,2			0,5	2,72
2,72	1,205	998,2	0,734	0,490	2,70
2,70	1,205	998,2	0,734	0,490	2,70

Ca urmare, pentru faza centrală S = 2,70 m, iar lungimea minimă a izolatorului, care trebuie să fie cu cel puțin 5% mai mare decât distanța disruptivă, rezultă de 2,84 m.

Faza laterală

Se consideră factorul de interval majorat cu 8%.

$$S = \frac{8}{\dfrac{0{,}96*3400*1{,}08 k_g \delta^m}{U_{50A}} - 1} .$$

Este necesar un calcul iterativ. Pentru primul pas, fie m = 0,5, k_g =1,20. Rezultă S = 2,46 m. Cu aceste rezultat, se reia calculul, folosind relațiile următoare:

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

$$U_{50S} = 0{,}96*1{,}08*k_g \frac{3400}{1+8/S} \qquad G_0 = \frac{U_{50S}}{500S} \qquad m = 1{,}25 G_0 (G_0 - 0{,}2)$$

Pentru faza laterală, după iterații, $\boldsymbol{S}$ = 2,51 m. De asemenea valoarea $\boldsymbol{S}$ poate fi aceea găsită pentru faza centrală divizată cu 1,08, ceea ce dă 2,5 m. Lungimea minimă a izolatorului este de 2,64 m sau 18 izolatoare standard.

Tabelul 4.2 Iterațiile pentru faza laterală

S	k_g	U_{50S}	G_0	m	S
	1,2			0,5	2,46
2,46	1,208	1001	0,814	0,625	2,51
2,51	1,207	1001	0,810	0,618	2,51

Aşa cum arată relațiile 4.15 şi 4.18, NDSC se poate estima în funcție de $\boldsymbol{V_3/E_2}$ şi $\boldsymbol{K_f}$, astfel :

4.5 Calculul NDSC pe baza raportului V_3/E_2

Se pleacă de la relația 4.18

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

din care se extrage

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

NDSC se calculează cu relația 4.14

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

Din exemplul de mai sus $\boldsymbol{K_f}$ = 0,955 şi $\boldsymbol{\sigma_0/E_2}$ = 0,07. Se obțin mărimile NDSC din tabel

$\boldsymbol{V_3/E_2}$	$\boldsymbol{Z_e}$	NDSC
0,95	1,979	1,19/100
1,00	2,697	0,16/100
1,05	3,475	0,013/100

Rezultatele arată sensibilitatea mărimii NDSC în funcție de raportul $\boldsymbol{V_3/E_2}$. Modificarea $\boldsymbol{V_3/E_2}$ cu 5%, se reflectă în schimbarea NDSC cu un ordin de mărime. Deoarece valoarea $\boldsymbol{E_2}$ este dată, modificarea raportului se poate realiza prin creşterea ținerii izolației cu 5, respectiv cu 10%.