

## 5

## Supratensiuni de comutație fază-fază pe liniile de transport

## 5.1 Introducere

Pentru coordonarea izolației fază-fază, scopul este, ca și pentru izolația fază-stâlp, fie de a calcula NDSC fază-fază fie de a determina distanța dintre faze fiind impusă o valoare NDSC. Totuși, nu pentru toate tipurile de stâlpi este necesară stabilirea distanței fază-fază. În cazul stâlpilor la care între faze se află elemente legate la pământ, descărcările pot apărea între fază și pământ înainte de a se produce între faze. Ca urmare, hotărâtoare este distanța fază-pământ. În cazul altor tipuri de stâlpi, ca aceia din fig. 5.1, fazele sunt separate numai de aer astfel că descărcările pot

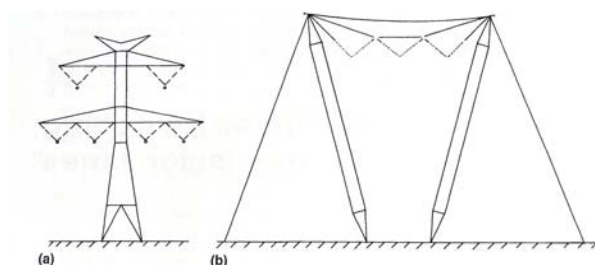


Fig. 5.1 Exemple de stâlpi la care trebuie luată în considerare distanța fază-fază

apărea fie între o fază și pământ, fie între faze. În acest caz trebuie luate în considerare și distanțele fază fază și NDSC respectiv. Stâlpul dublu circuit din fig. 5.1a, este cunoscut ca Delta german și este utilizat peste tot în Europa și în unele zone ale SUA. Stâlpul din fig. 5.1b este un proiect mai recent, utilizat prima dată la 765 kV în Canada.

Izolația fază-fază există și în stații în mod natural între bare și între fazele echipamentelor.

De aceea distanțele izolante fază-fază și NDSC respectiv trebuie luate în considerare în cazul stațiilor.

## 5.2 Ținerea izolației fază-fază

Caracteristicile ținerii izolației autoregeneratoare pot fi obținute folosind o schiță ca aceea din fig. 5.2. Această schiță a unui stâlp poate fi dezvoltată pe una sau mai multe deschideri pentru a simula o linie de transport. Un impuls negativ  $V^-$  se propagă pe o fază și un impuls pozitiv  $V^+$  se propagă pe cealaltă fază, rezultând o tensiune  $V_p$  între faze.

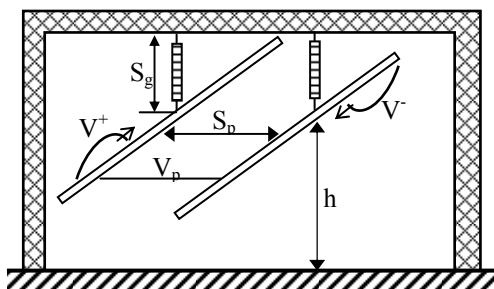


Fig. 5.2 Impulsuri de comutație cu polarități opuse sunt aplicate conductoarelor

Tensiunea negativă este considerată prin modul, ca o mărime pozitivă, astfel că

$$V_p = V^+ + V^- \quad (5.1)$$

Pentru a dezvolta o metodă de încercare, se presupune inițial că distanța izolantă până la pământ  $S_g$  este mult mai mare decât aceea dintre faze,  $S_p$ , astfel că pot apărea numai descărcări între faze. Există două metode de determinare a ținerii izolației dintre faze: metoda Alfa și metoda  $V^+ - V^-$ .

### 5.2.1 Metoda Alfa

Tensiunile aplicate conductoarelor sunt

$$V^+ = (1 - \alpha)V_p; V^- = \alpha V_p \quad (5.2)$$

iar  $\alpha$  este menținut constant. Astfel:

$$\alpha = \frac{V^-}{V^+ + V^-} = \frac{V^-}{V_p} \quad (5.3)$$

$U_{50}$  pentru izolația fază-fază este  $U_{50p}$ , iar deviația standard este notată  $\sigma_{fp}$ . Deși  $\alpha$  poate varia între 0 și 1, de obicei  $U_{50p}$  se obține numai pentru două valori ale lui  $\alpha$ : 0,33 și 0,5 adică în situațiile în care  $V^+ = 2V^-$  și respectiv  $V^+ = V^-$ , sau

$$V^+ = \frac{1 - \alpha}{\alpha} V^- \quad (5.4)$$

$U_{50p}$  se obține din relația:

$$U_{50p} = k_{gp} \frac{3400}{1 + 8/S_p} \quad (5.5)$$

unde  $S_p$  este distanța fază-fază, iar  $k_{gp}$  este factorul de interval. Așa cum se vede în fig. 5.3, dependențele de  $\alpha$  ale  $U_{50p}$  sau  $k_{gp}$  sunt liniare.

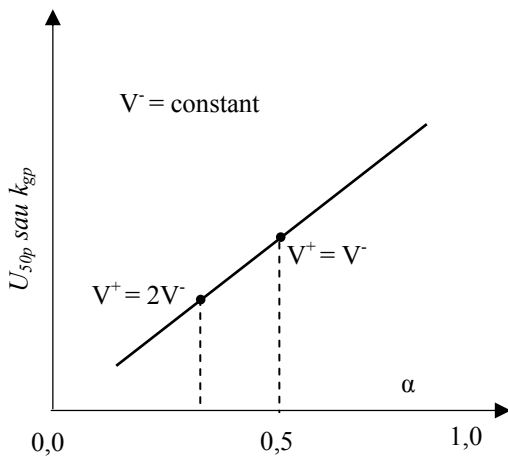


Fig. 5.3  $U_{50p}$  în funcție de  $\alpha$

Pentru determinarea mărimii factorilor de interval s-au realizat experimente de laborator. Deoarece în aceste condiții nu se pot monta conductoare comparabile, ca lungime, cu acelea ale liniilor, rezultatele obținute sunt însoțite și de dimensiunile conductoarelor folosite.

Factorii de interval sunt prezentați în Tabelul 5.1 pentru 5 configurații de interval. Valoarea raportului  $\sigma_{fp}/U_{50p}$  a fost de 5% cu excepția intervalului conductor-conductor, caz în care această valoare scade la 3,5% pentru o lungime a conductoarelor de 10 m. Pentru conductoare lungi, coeficientul de variație scade la 2%.

Factorul de interval mai trebuie redus și datorită faptului

că mai multe segmente de 10 m formează un interval mai lung, de exemplu 400 m. Folosind o valoare  $\sigma_{fp}/U_{50p} = 3,5\%$ , factorul de interval pentru o deschidere de 400 m ar trebui să fie 1,5 pentru  $\alpha = 0,5$  și 1,41 pentru  $\alpha = 0,33$ . Rezultatele din Tabelul 5.1 se aplică pentru intervale între electrozi de la 3 la 8 m și pentru înălțimi de 8,2 până la 9 m.

**Tabelul 5.1** Factori de interval pentru impulsuri de comutație fază-fază

Configurația intervalului	Metoda Alfa			Metoda $V^+ - V^-$		
	$\alpha$	$k_{gp}$	$\sigma_{fp}/U_{50,0}$	$K_L$	$K_{GP}$	$\sigma_{FP}/U_{50,0}$
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			
Vârf – vârf	0,33	1,52	0,05	0,67	1,35	0,05
	0,50	1,62	0,05			
Conductor-conductor, lungime 10 m	0,33	1,52	0,035	0,67	1,35	0,035
	0,50	1,62	0,035			
Conductor-conductor, lungime 400 m	0,33	1,41	0,02	0,68	1,26	0,02
	0,50	1,50	0,02			
Geometrie asimetrică, de ex. conductor-vârf	0,33	1,36	0,05	0,67	1,21	0,05
	0,50	1,45	0,05			
Conductor-conductor, lungime 46 m	0,33	1,56	-	0,68	1,40	-
	0,50	1,66	-			
Conductor-conductor, lungime 360 m	0,33	1,54	0,03	0,65	1,38	0,03
	0,50	1,58	0,03			

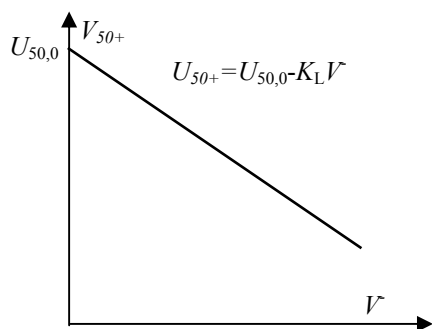
### 5.2.2 Metoda $V^+ - V^-$

În această metodă, componenta  $V^-$  este menținută constantă, iar  $V^+$  variază pentru a obține caracteristica Gauss a ținerii. Astfel  $U_{50}$  pentru impulsul pozitiv,  $U_{50}^+$  se obține și este funcție de  $V^-$ . Dacă se reprezintă grafic  $U_{50}^+$  în funcție de  $V^-$  se obține caracteristica linear descrescătoare din fig. 5.4 :

$$U_{50}^+ = U_{50,0} - K_L V^- \quad (5.6)$$

în care  $U_{50,0}$  este  $U_{50}^+$  atunci când componenta negativă este nulă, iar  $K_L$  este o constantă care depinde de configurația intervalului.  $U_{50,0}$  este dată de relația:

$$U_{50,0} = K_{GP} \frac{3400}{1 + 8 / S_p} \quad (5.7)$$



**Fig. 5.4**  $U_{50}^+$  depinde de  $V^-$

Deviația standard,  $\sigma_{fp}$ , în u.r. față de  $U_{50,0}$  pentru toate intervalele simple variază de la 4 la 9% , cu o medie de 6%. Totuși, pentru intervale conductor-conductor lungi,  $\sigma_{fp}$  este mai mic, între 2 și 3% din  $U_{50,0}$ .

Se propun următoarele ecuații pentru  $U_{50,0}$  și  $K_L$ :

$$U_{50,0} = 640 S_p^{0.6} \left( 1 - \frac{S_p}{4h} \right) \quad (5.8)$$

$$K_L = 0,86 - 0,54 \frac{S_p}{h}$$

### 5.2.3. Corelarea metodelor

Deoarece metoda Alfa a fost folosită prima, multe rezultate ale încercărilor sunt valabile folosind această metodă. Totuși, rezultatele încercărilor pot fi transcrise sau schimbate, astfel ca să fie aplicabile și celeilalte metode. Adică:

$$U_{50p} = U_{50}^+ + V^- = U_{50,0} + (1 - K_L)V^- \quad (5.8)$$

$$V^- = \alpha U_{50p}$$

Astfel:

$$U_{50,0} = [1 - \alpha(1 - K_L)]U_{50p} \quad (5.9)$$

care, după înlocuirea factorilor de interval, devine:

$$K_{GP} = k_{gp}[1 - \alpha(1 - K_L)] \quad (5.10)$$

Cunoscând valorile  $\alpha$  și  $k_{gp}$ , pot fi calculate valorile  $K_L$  și  $K_{GP}$ . Factorii de interval rezultați pentru cele două metode sunt dați în Tabelul 5.1 Valorile lui  $\sigma_{FP}/U_{50,0}$  sunt presupuse a fi egale cu valorile  $\sigma_{fp}/U_{50p}$ .

### Valoarea $K_L$

Pentru liniile de transport există mai multe valori ale raportului  $S_p/h$ . Deoarece  $h$  este cel mai mare în dreptul stâlpului, valoarea minimă apare în acest loc; la jumătatea deschiderii  $h$  este minim, aici apare valoarea maximă pentru  $K_L$ . Pentru liniile existente de 500 și 765 kV,  $S_p/h$  la stâlp este între 0,23 și 0,43 cu o medie de cca. 0,4. La mijlocul deschiderii, raportul  $S_p/h$  este între 0,7 și 1,45, cu o medie de 0,95. Folosind ec. 4.8,  $K_L$  la stâlp este 0,64 – 0,68, iar la mijlocul deschiderii 0,24 – 0,34.

Pentru stațiile de transformare existente,  $S_p/h$  este aproximativ 1,2, deși pentru stațiile care se vor construi poate scădea până la 0,8.  $S_p/S_g$  pentru stațiile actuale este cca.2,0 dar poate scădea la 1,4 în viitor. Dacă se folosește rel. 5.8,  $K_L$  devine negativ, ceea ce este nerealist.

Datorită acestor situații și datorită influenței valorii raportului  $S_p/h$  asupra  $U_{50}$  pentru izolația față de pământ, se recomandă ca valoarea  $K_L$  să fie aleasă din Tabelul 5.1, adică independent de  $S_p/h$ . Din Tabelul 5.1, pentru liniile ale căror deschideri sunt de 300 – 400 m, valoarea medie a lui  $K_L$  este 0,68, valoarea medie a raportului  $\sigma_{FP}/U_{50,0}$  este 0,02, iar valoarea medie a lui  $K_{GP}$  este cca. 1,26. Aceste valori sunt recomandate a fi folosite pentru liniile de transport.

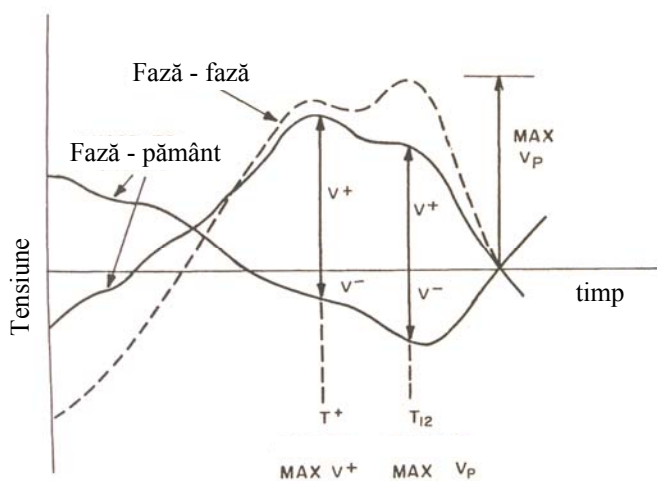


Fig. 5.5 Tensiunile la momentele  $T^+$  și  $T_{12}$  sunt folosite pentru calculul NDSC

### 5.3 Supratensiuni de comutație fază-fază

Ca și în cazul supratensiunilor fază-pământ, există trei valori și pentru supratensiunile fază-fază. Două dintre acestea sunt reprezentate în fig. 5.5. La fiecare moment izolația este supusă unei tensiuni diferite. De aceea, teoretic, ținerea izolației și probabilitatea de descărcare trebuie evaluate la fiecare moment. Probabilitatea totală de descărcare este 1 minus probabilitatea de a nu apărea descărcare la fiecare moment de timp. Pentru a ocoli

această procedură dificilă, se iau în considerare, de obicei, doar două momente de timp: 1 - momentul  $T^+$  la care apare tensiunea maximă pozitivă fază-pământ; 2 -  $T_{12}$  la care apare tensiunea maximă fază-fază. NDSC se calculează pentru fiecare dintre aceste momente și se ia în considerare valoarea cea mai mare.

În general, pentru intervale de aer, de peste 3 m (sisteme de 500 kV și mai mult) momentul maximului pozitiv al supratensiunii este mai important, în timp ce pentru izolația ne-autoregeneratoare, precum transformatoare, cabluri, GIS și pentru distanțe de aer mai mici, (sisteme sub 500 kV), momentul pentru supratensiunea maximă fază-fază este mai important.

În multe cazuri, densitățile supratensiunilor pentru valorile cele mai mari, care interesează în primul rând, sunt suficient de apropiate pentru ambele momente astfel încât, ca o aproximare, oricare dintre momente poate fi folosit.

Mai departe se face ipoteza simplă că distribuția supratensiunilor este compusă din tensiunile  $V^+$  și  $V^-$  sau din tensiunile  $V^+$  și  $V_p$  și că acestea sunt obținute la unul dintre cele două momente, sau în alt mod.

### 5.3.1 Distribuțiile Gauss pentru $V_p$ și $V^+$

Fiind date:

$$\begin{aligned} S(V_p) &= N(\mu_p, \sigma_p) \\ S(V^+) &= N(\mu^+, \sigma^+) \end{aligned} \quad (5.11)$$

și  $\rho_p^+$  - coeficientul de corelație între  $V_p$  și  $V^+$ , atunci pentru țineră, considerând modulul valorii  $V^-$ :

$$V_p = V^+ + V^- ,$$

parametrii distribuției  $V^-$ :

$$S(V^-) = N(\mu^-, \sigma^-)$$

se determină cu relațiile

$$\mu^- = \mu_p - \mu^+ ; \sigma^- = \sqrt{(\sigma^+)^2 + (\sigma_p)^2 - 2\rho_p^+ \sigma^+ \sigma_p} \quad (5.12)$$

Dacă  $\rho_p^+ = 1,0$ , atunci

$$\sigma^- = |\sigma^+ - \sigma_p| \quad (5.13)$$

### 5.3.2 Distribuțiile Gauss pentru $V^+$ și $V^-$

Fiind date:

$$\begin{aligned} S(V^-) &= N(\mu^-, \sigma^-) \\ S(V^+) &= N(\mu^+, \sigma^+) \end{aligned} \quad (5.14)$$

și  $\rho_+^-$  - coeficientul de corelație între  $V^+$  și  $V^-$ , parametrii distribuției  $V_p$  se determină cu relațiile:

$$\mu_p = \mu^+ + \mu^- ; \sigma_p = \sqrt{(\sigma^+)^2 + (\sigma^-)^2 - 2\rho_+^- \sigma^+ \sigma^-} \quad (5.15)$$

Dacă  $\rho_+^- = 1,0$ , atunci

$$\sigma_p = \sigma^+ + \sigma^- \quad (5.16)$$

### 5.3.3 Coeficienții de corelație

Relațiile dintre coeficienții de corelație pot fi obținute din ecuațiile precedente pentru  $\sigma^+$  și  $\sigma^-$ . Rezultă relațiile:

$$\rho_{+}^{-} = \frac{\rho_{p}^{+}\sigma_{p} - \sigma^{+}}{\sigma^{-}} \quad \rho_{p}^{+} = \frac{\rho_{+}^{-}\sigma^{-} + \sigma^{+}}{\sigma^{-}} \quad \rho_{p}^{-} = \frac{\rho_{+}^{-}\sigma^{+} + \sigma^{-}}{\sigma^{-}} \quad (5.17)$$

Dacă  $\rho_{+}^{-} = 1,0$ , atunci  $\rho_{p}^{+} = 1,0$  și  $\rho_{p}^{-} = 1,0$ .

### 5.3.4 Calculul valorii $E_{2p}$

Până acum nu au fost efectuate suficiente studii pentru a evalua cu precizie parametrii distribuțiilor supratensiunilor de comutație fază-fază. Totuși din IEC 71-1, se poate calcula valoarea statistică a supratensiunii fază-fază,  $E_{2p}$  plecând de la valoarea statistică  $E_2$  a supratensiunii fază-pământ. Raportul  $E_{2p}/E_2$  variază de la cca. 1,6 pentru  $E_2 = 2,0$  u.r. până la cca. 1,5 dacă  $E_2 = 3,0$  u.r. Astfel, o valoare a raportului de 1,55 apare potrivită pentru toate valorile  $E_2$ . Astfel pentru  $E_2 = 1,8$  și 2,8 u.r., rezultă  $E_{2p}$  de 2,8 și 4,3 u.r. De asemenea, în general, valorile  $\sigma_p/E_{2p}$  sunt egale cu valorile  $\sigma_0/E_2$  (sau  $\sigma^+/E_2^+$ ). Supratensiunea maximă fază-fază este cu cca. 1 sau 2 abateri standard peste  $E_{2p}$ . Valorile factorului de profil longitudinal al tensiunii,  $\gamma_p$  sunt similare cu acelea pentru fază-pământ.

## 5.4 Calculul NDSC fază-fază

### 5.4.1 NDSC fază-fază

Teoretic exact, NDSC pentru un sistem de izolație, care este compus din zonele fază-pământ și fază-fază, trebuie calculat ca un singur sistem. Pentru a scrie ecuațiile adecvate, se consideră mai întâi numai supratensiunile fază-fază și ținerea izolației respective, neglijând supratensiunile fază-pământ și ținerea izolației fază-pământ. Pentru izolația fază - fază, se folosește notația NDSC<sub>p</sub>:

$$NCSC_p = \frac{I}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} p_p [S(V^+ | V^-)] dV^+ \right] S(V^-) dV^- \quad (5.18)$$

### 5.4.2 NDSC combinat pentru izolația fază-fază și fază-pământ

Pentru orice tensiune  $V^+$  probabilitatea unei descărcări fază-fază, a unei descărcări fază-pământ sau a ambelor este  $1-(1-p_p)(1-p_g)$  sau  $1-q_p q_g$  unde  $p_p$  este probabilitatea unei descărcări fază-fază iar  $p_g$  este probabilitatea unei descărcări fază-pământ. Ca și mai sus,  $q_s$  este probabilitatea lipsei descărcărilor. Astfel NDSC devine:

$$NCSC_p = \frac{I}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} (1 - q_p q_g) [S(V^+ | V^-)] dV^+ \right] S(V^-) dV^- \quad (5.19)$$

Chiar și această relație nu este completă deoarece se aplică numai unei izolații, iar linia este formată din 100 până la 1000 de stâlpi și deschideri. De aceea, presupunând că există  $n$  izolații în paralel și că supratensiunile pot fi diferite la fiecare stâlp sau deschidere, NDSC devine

$$NCSC_p = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ 1 - \prod_{i=1}^n q_{pi} q_{gi} \right] \left[ S(V^+ | V^-) \right] dV^+ \right] S(V^-) dV^- \quad (5.20)$$

Folosind valori tipice, NDSC a fost calculat separat pentru izolațiile fază-fază și fază-pământ. Cu excepția câtorva procente, NDSC total este suma valorilor corespunzătoare celor două zone ale izolației. Altfel spus NDSC poate fi calculat separat pentru fiecare zonă de izolație. Nu este necesară utilizarea rel. 5.20. Mai rămâne să fie simplificată procedura. Dar, pentru a completa analiza, se va considera și ținerea la polaritatea negativă și folosirea parametrilor inverșați.

### 5.4.3 Parametrii inverșați

Amplitudinea supratensiunilor de comutație poate fi aceeași, cu egală probabilitate, la polaritatea pozitivă sau negativă. De aceea, teoretic, NDSC este suma dintre NDSC pentru parametri considerați inițial și NDSC pentru parametri distribuției supratensiunilor inverse. Aceasta este rareori necesar, deoarece NDSC pentru parametri inverșați este mic, comparativ cu valoarea pentru parametri originali.

## 5.5. Reducerea solicitării de la două variabile la o variabilă

### 5.5.1. Generalități

Ecuatia ținării poate fi rescrisă astfel:

$$U_{50,0} = U_{50}^+ + K_L V^- \quad (5.21)$$

care arată că ținerea fază-fază, descrisă prin  $U_{50,0}$  și deviația sa standard, sunt funcție de  $U_{50}$  pentru polaritatea pozitivă și de tensiunea negativă  $K_L V^-$ . Dacă solicitarea fază-fază poate fi exprimată în funcție de aceleași variabile, adică:

$$V_Z = V^+ + K_L V^- \quad (5.22)$$

problema calculării NDSC fază-fază poate fi redusă de la considerarea a două variabile aleatoare  $V^+$  și  $V^-$  la considerarea numai a unei singure variabile  $V_Z$ . Conform cu fig. 5.5, densitatea  $f(V_Z)$  este compusă cu ținerea  $T_p$  sau  $p_p$ , care este definită prin  $U_{50,0}$  și  $\sigma_{FF}/U_{50,0}$ . De aceea, considerând numai o singură izolație, NDSC fază-fază este

$$NSDSC_p = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} p_p S(V_Z) dV_Z \quad (5.23)$$

Pentru  $n$  izolații:

$$NCSC_p = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( 1 - \prod_{i=1}^n q_{ip} \right) f(V_Z) dV_Z \quad (5.24)$$

Această relație arată că solicitarea sau supratensiunea trebuie să fie exprimată în funcție de  $V_Z$  ca în ec. 5.22 sau, deoarece

$$V_p = V^+ + V_- \quad (5.25)$$

sub forma

$$V_Z = (1 - K_L)V^+ + K_L V_p \quad (5.26)$$

În continuare, pentru fiecare comutație aleatoare, tensiunile  $V_p$  și  $V^+$  sau  $V^-$  și  $V^+$  sunt măsurate și apoi prelucrate folosind rel. 5.22 sau rel. 5.26 pentru a obține  $V_Z$ . Ca și în cazul fază-pământ, datele sunt approximate printr-o distribuție continuă care poate fi Gauss (normală) sau altă distribuție. Îndiferent de tipul distribuției, se aplică ec. 5.23 și 5.24. Apoi, aceleași simplificări și aproximări se folosesc pentru calculul NDSC fază-pământ, adică metoda lui Brown poate fi folosită pentru calculul NDSC fază-fază.

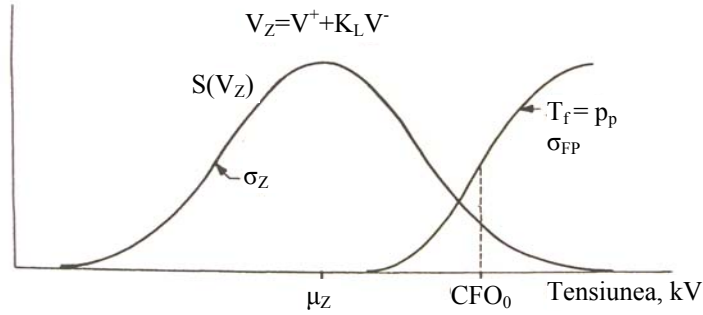


Fig. 4.5 Folosirea unei unice variabile aleatoare  $V_Z$  pentru a calcula NDSC

### 5.5.2 Parametrii distribuției variabilei combinate $V_Z$

Dacă sunt cunoscute supratensiunile  $V^+$  și  $V^-$  și densitățile  $S(V^+)$  și  $S(V^-)$ , presupuse normale:

$$\begin{aligned} S(V^-) &= N(\mu^-, \sigma^-) \\ S(V^+) &= N(\mu^+, \sigma^+) \end{aligned} \quad (5.27)$$

folosind ec. 5.22, densitatea  $S(V_Z)$  este, de asemenea, normală având media și deviația standard date de

$$\begin{aligned} \mu_Z &= \mu^+ + K_L \mu^- \\ \sigma_Z &= \sqrt{(\sigma^+)^2 + (K_L \sigma^-)^2 + 2\rho_{+-} K_L \sigma^+ \sigma^-} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Dacă sunt cunoscute supratensiunile  $V_p$  și  $V^+$ , iar densitățile sunt considerate normale adică:

$$\begin{aligned} S(V_p) &= N(\mu_p, \sigma_p) \\ S(V^+) &= N(\mu^+, \sigma^+) \end{aligned} \quad (5.29)$$

atunci din rel. 5.26, densitatea  $S(V_Z)$  este, de asemenea, normală având media și deviația standard date de

$$\begin{aligned} \mu_Z &= (1 - K_L)\mu^+ + K_L \mu_p \\ \sigma_Z &= \sqrt{(1 - K_L)\sigma^+ + (K_L \sigma_p)^2 + 2\rho_{+-}(1 - K_L)K_L \sigma^+ \sigma_p} \end{aligned} \quad (5.30)$$

Dacă  $K_L = 1,00$ , atunci

$$\sigma_Z = \sigma_p \quad \mu_Z = \mu_p \quad E_{2Z} = E_{2p} \quad (5.31)$$



### 5.5.3 Adaptarea metodei simplificate a lui Brown

Pentru a calcula NDSC fază-fază sau a determina distanța izolantă pentru o valoare dată a NDSC, se folosește aceeași metodă ca și pentru calcularea NDSC fază-pământ sau de calcul a distanței fază-pământ, cu diferența că trebuie folosit profilul longitudinal al  $V_Z$ . Definind profilul longitudinal al tensiunii prin:

$$\gamma^+ = \frac{E_S^+}{E_R^+} \quad \gamma^- = \frac{E_S^-}{E_R^-} \quad \gamma_p = \frac{E_{pS}}{E_{pR}} \quad (5.32)$$

rezultă

$$\gamma_Z = \frac{E_{ZS}}{E_{ZR}} = \frac{E_S^+ + K_L E_S^-}{E_R^+ + K_L E_R^-} \quad (5.33)$$

Simplificând cu  $E_R^+$

$$\gamma_Z = \frac{\gamma^+ + \gamma^- K_L E_R^- / E_R^+}{1 + K_L E_R^- / E_R^+} \quad (5.34)$$

Cele mai bune estimări ale  $E_S$  sunt valorile  $E_2$  respective. Astfel

$$\gamma_Z = \frac{\gamma^+ + \gamma^- K_L E_2^- / E_2^+}{1 + K_L E_2^- / E_2^+} \quad (5.35)$$

În mod asemănător,  $\gamma_Z$  poate fi dat în funcție de  $\gamma_p$ :

$$\gamma_Z = \frac{\gamma_p + \gamma^+ \frac{(1 - K_L) E_2^-}{K_L E_{2p}}}{1 + \frac{(1 - K_L) E_2^+}{K_L E_{2p}}} \quad (5.36)$$

Ca și pentru izolația fază-pământ, numărul echivalent de stâlpi sau de deschideri,  $n_e$  este:

$$n_e = \frac{0,4}{1 - \gamma_Z} \frac{\sigma_{FG}}{U_{50,0}} n \quad (5.37)$$

**Notă:** deoarece izolația fază-fază este considerată a fi numai din aer, la calculul NDSC sau a distanței dintre faze nu se va reduce  $U_{50}$  din cauza umidității, deci nu se va folosi factorul 0,96.

### 5.5.4 Exemplul 1

Să se calculeze NDSC pentru condițiile următoare:  $n = 625$ ;  $U_{\max} = 550$  kV; 1 u.r. = 449 kV.

Ținerea izolației:  $S = 3,4$  m  $K_L = 0,68$   $K_{GP} = 1,26$   $\frac{\sigma_{FP}}{U_{50,0}} = 0,02$

Solicitări: Distribuțiile pentru tensiunile  $V^+$  și  $V_p$  sunt de tip Gauss:

$$E_2^+ = 2,0 \text{ u.r.} \quad \frac{\sigma^+}{E_2^+} = 0,10 \quad E_{2p} = 3,2 \text{ u.r.} \quad \frac{\sigma_p}{E_{2p}} = 0,10$$

$$\gamma_p = 0,90 \quad \gamma^+ = 0,90 \quad \rho_{p+} = 0,80$$

Rezultă:

$$\mu^+ = E_2^+(1 - 2,054) \frac{\sigma_2^+}{E_2^+} = 2(1 - 2,054 \times 0,1) = 1,589, \quad \sigma^+ = 0,20$$

$$\mu_p = E_{2p}(1 - 2,054) \frac{\sigma_p}{E_{2p}} = 3,2(1 - 2,054 \times 0,1) = 2,543, \quad \sigma_p = 0,32$$

Din rel. 5.30:

$$\mu_Z = 2,238 \text{ u.r.} = 1004,8 \text{ kV} \quad \sigma_Z = 0,272 \text{ u.r.} = 121,9 \text{ kV}$$

Mai departe:

$$\gamma_Z = 0,9; \quad n_e = 50; \quad Z_f = -2,204$$

$$U_{50n} = U_{50,0} + Z_f \sigma_{FG} = 1221,4 \text{ kV}$$

$$NCSC_p = \frac{1}{2} P(V_Z > 1221,4 \text{ kV})$$

$$Z = \frac{1221,4 - 1004,8}{121,9} = 1,7768$$

$$NDSC_p = 1,89/100$$

Rezultatele programului de calcul : 1,94/100; cu parametri inversați 2,24/100.

Dacă  $\rho_{p+} = 1,00$ , atunci

$$\sigma_Z = (1 - K_L)\sigma^+ + K_L\sigma_p = 0,279 \text{ u.r.} = 126,5 \text{ kV}$$

$$Z = \frac{1221,4 - 1004,8}{126,5} = 1,7123 \quad NSDSC = 2,17/100$$

Calculatorul dă 2,22/100; cu parametri inversați 2,41/100.

## 5.6 Folosirea $\rho_{p+} = 1,00$

Considerarea  $\rho_{p+} = 1,00$  este acoperitoare. Aceasta se vede mai limpede în tab. 5.2 unde s-au folosit aceiași parametri ca în exemplul precedent cu excepția că  $\gamma_p = \gamma^+ = 1,0$ . Modificând coeficientul de corelație de la 0,7 la 1,0 NDSC se modifică cu 7 până la 16 %.

Teoretic, NDSC total este suma valorilor calculate ca în exemplu plus NDSC pentru parametri inversați ai solicitării. Adică, tensiunile pozitive devin negative iar cele negative devin pozitive. Tabelul 5.4 arată că efectul este de a aduna o valoare nesemnificativă la NDSC și de aceea acest efect poate fi neglijat.

**Tabelul 5.4** NDSC fază-fază pentru  $\gamma_p = \gamma^+ = 1,0$

Condiția	$\rho_{p+} = 1,00$	= 0,9	= 0,8	= 0,7
Pentru parametrii inițiali	3,17	3,01	2,84	2,67
Pentru parametrii inversați	3,51	3,42	3,33	3,25