

ŘEPy ČR, SR, ČEZ, a.s.	Zkratové proudy - Výpočet účinků Část 2: Příklady výpočtů	PNE 33 3041
<p>Odsouhlasení normy</p> <p>Konečný návrh podnikové normy energetiky pro rozvod elektrické energie odsouhlasily tyto organizace: SČE, a.s.; ČEZ, a.s.; ZČE, a.s.; JME, a.s.; PRE, a.s.; STE, a.s.; JČE, a.s.; VČE, a.s.; SME, a.s.; VSE, š.p; a SSE, š.p.</p> <p>Obsah Stránka</p> <p>Předmluva.....2</p> <p>1 Předmět normy a rozsah platnosti.....3</p> <p>2 Normativní odkazy.....3</p> <p>3 Značky a jednotky.....3</p> <p>4 Příklad 1 - Mechanické účinky na zařízení 10 kV s jednoduchými tuhými vodiči.....4</p> <p>4.1 Vstupní údaje.....4</p> <p>4.2 Maximální síla na střední vodič.....5</p> <p>4.3 Namáhání vodiče a síly na podpěry.....5</p> <p>4.4 Vyhodnocení.....9</p> <p>5 Příklad 2 - Mechanické účinky na zařízení 10 kV s vícenásobnými tuhými vodiči.....9</p> <p>5.1 Vstupní údaje (doplňující k příkladu 1).....10</p> <p>5.2 Maximální síla na střední vodič.....10</p> <p>5.3 Maximální síla na vnější dílčí vodič mezi dvěma sousedními spojovacími díly.....11</p> <p>5.4 Namáhání vodiče a síly na podpěry.....11</p> <p>5.5 Vyhodnocení.....16</p>		
Návaznost: -		Účinnost od: 1.4.1997

6	Příklad 3 - Mechanické účinky na zařízení zvn s trubkovými vodiči.....	16
6.1	Vstupní údaje.....	17
6.2	Maximální síla na střední vodič.....	17
6.3	Namáhání vodiče a síly na podpěry.....	18
6.4	Vyhodnocení.....	25
7	Příklad 4 - Mechanické účinky na zařízení 110 kV s volně zavěšenými vodiči bez izolačních závěsů.....	27
7.1	Vstupní údaje.....	27
7.2	Elektromagnetické síly a charakteristické parametry..	28
7.3	Horizontální výchylka b_h a minimální vzdušná vzdálenost a_{min}	33
7.4	Vyhodnocení.....	34
8	Příklad 5 - Mechanické účinky na předepjaté svazkové vodiče s izolačními závěsy.....	35
8.1	Vstupní údaje.....	36
8.2	Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči, $a_s = 0,1$ m.....	37
8.3	Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči, $a_s = 0,4$ m.....	45
8.4	Vyhodnocení.....	48
9	Příklad 6 - Tepelné účinky na holé vodiče.....	49
9.1	Vstupní údaje.....	49
9.2	Výpočty.....	49
9.3	Vyhodnocení.....	50

Předmluva

Souvisící ČSN

ČSN 33 3020 Elektrotechnické předpisy. Výpočet poměru při zkratech
v trojfázové elektrizační soustavě

ČSN IEC 781 Návod pro výpočet zkratových proudů v paprskových sítích
nízkého napětí (33 3021)

ČSN EN 60865-1 Zkratové proudy - Výpočet účinků. Část 1: Definice
a výpočetní metody (33 3040)

ČSN 33 3210 Elektrotechnické předpisy. Rozvodná zařízení.
Společná ustanovení

Zpracovatel: Ing. Roškota Stanislav - Energoprojekt Praha, a.s.
Ing. Zeman Ivo - ČEZ Praha, a.s. - DPS
Ing. Vybíralík František, CSc. - STE Praha, a.s.

Zkratové proudy - Výpočet účinků

Část 2: Příklady výpočtů

1 Předmět normy a rozsah platnosti

Účelem této normy je ukázat praktické použití postupů podle IEC 865-1 pro výpočet mechanických a tepelných účinků způsobených zkratovými proudy. Tato podniková norma je dodatkem k IEC 865-1 a nemění normalizované postupy uvedené v IEC 865-1.

POZNÁMKY

- 1 - Příklady v této normě znázorňují jak provést výpočet podle IEC 865-1 zjednodušeně a snadným způsobem. Nejsou zamýšleny pro výpočetní programy.
- 2 - Čísla v závorkách na konci výpočtů odkazují na rovnice v IEC 865-1 (a zároveň v ČSN EN 60865-1).
- 3 - Napětí soustav jsou vztažena ke jmenovitým napětím.

2 Normativní odkazy

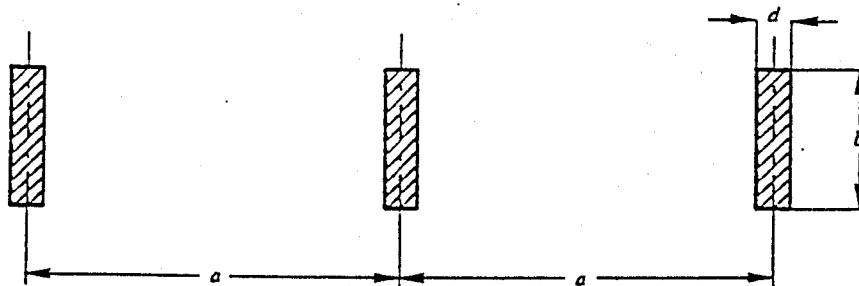
IEC 865-1: 1993, Zkratové proudy - Výpočet účinků. Část 1: Definice a výpočetní metody

3 Značky a jednotky

Význam značek a jednotek je uveden v IEC 865-1, která je zapracována v ČSN EN 60865-1 (33 3040).

4 Příklad 1 - Mechanické účinky na zařízení 10 kV s jednoduchými tuhými vodiči

Výpočet je proveden pro trojfázovou přípojnicí 10 kV s jedním vodičem na fázi. Vodiče tvoří spojité nosníky s prostým podepřením o stejném rozpětí. Uspořádání vodičů je ukázáno na obrázku 1.



Obrázek 1 - Uspořádání vodičů

4.1 Vstupní údaje

Počáteční rázový zkratový proud
(efektivní hodnota)

$$I''_{k3} = 16 \text{ kA}$$

Součinitel pro výpočet nárazového zkratového
proudu

$$K = 1,35$$

Kmitočet sítě
Bez automatického opětového zapínání

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Počet rozpětí

$$\geq 3$$

Vzdálenost mezi podpěrkami

$$l = 1 \text{ m}$$

Fázová vzdálenost mezi vodiči

$$a = 0,2 \text{ m}$$

Vodič obdélníkového průřezu z materiálu
AlMgSi0,5

-Rozměry

$$b = 60 \text{ mm}$$

$$d = 10 \text{ mm}$$

-Hmotnost na jednotku délky

$$m' = 1,62 \text{ kg/m}$$

-Modul pružnosti v tahu

$$E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$$

-Mez průtažnosti

$$R_{p0,2} = 120 \text{ N/mm}^2 \text{ až } 180 \text{ N/mm}^2$$

4.2 Maximální síla na střední vodič

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (30,6 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{1,00 \text{ m}}{0,202 \text{ m}} = 803 \text{ N} \quad (2)$$

kde

$$i_{p3} = \sqrt{2} \kappa I''_{k3} = \sqrt{2} \times 1,35 \times 16 \text{ kA} = 30,6 \text{ kA} = 30,6 \cdot 10^3 \text{ A}$$

a účinná vzdálenost mezi fázovými vodiči

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,2 \text{ m}}{0,99} = 0,202 \text{ m} \quad (6)$$

s k_{12} podle IEC 865-1 obrázek 1 pro $b/d = 6$, $a_{1s} = a$ a $a/d = 20$.

4.3 Namáhání vodiče a síly na podpěry

Výpočet může být proveden podle následujících článků 4.3.1 a 4.3.2.

4.3.1 Zjednodušená metoda

4.3.1.1 Ohybové napětí vodiče

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} & (9,12) \\ &= 1,0 \times 0,73 \times \frac{803 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 73,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 73,3 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

kde

$$V_{\sigma} V_{\tau} = 1,0 = (V_{\sigma} V_{\tau})_{\max} \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 3}$$

$$J = \frac{bd^3}{12} = \frac{0,06 \text{ m} \times (0,010 \text{ m})^3}{12} = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$Z = \frac{J}{d/2} = \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{0,005 \text{ m}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Připojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

s nižší hodnotou $R_{p0,2}$. Pro obdélníkový průřez $q = 1,5$, viz IEC 865-1, tabulka 4. Potom platí:

$$\sigma_{\text{tot}} = 73,3 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

4.3.1.2 Ohybové síly na podpěrky

$$F_d = V_F V_{\tau} \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Podle IEC 865-1, tabulky 2 pro vyšší hodnotu $R_{p0,2}$ je:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{73,3 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2} = 0,509$$

takže, při trojfázovém zkratu

$$0,370 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} < 1$$

Potom

$$V_F V_R = \frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{tot}} = \frac{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2}{73,3 \text{ N/mm}^2} = 1,97$$

Pro vnější podpěrky (A) s $\alpha_A = 0,4$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dA} = V_F V_R \alpha_A F_{m3} = 1,97 \times 0,4 \times 803 \text{ N} = 633 \text{ N}$$

Pro vnitřní podpěrky (B) s $\alpha_B = 1,1$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dB} = V_F V_R \alpha_B F_{m3} = 1,97 \times 1,1 \times 803 \text{ N} = 1\,740 \text{ N}$$

4.3.2 Podrobná metoda

4.3.2.1 Vlastní kmitočet f_c a součinitelé V_F , V_R a V_σ

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} = \frac{3,56}{(1,00 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 52,3 \text{ Hz} \quad (16)$$

kde

$\gamma = 3,56$ v souladu s IEC 865-1, tabulka 3

$J = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$ (viz 4.3.1.1).

Poměr f_c/f je 1,05. Z IEC 865-1, obrázek 4 a 2.2.2.6.2 jsou získány následující hodnoty pro součinitele V_F , V_σ a V_R :

$$V_F = 1,8$$

$$V_\sigma = 1,0$$

$$V_R = 1,0$$

4.3.2.2 Ohybové napětí vodiče

Ohybové napětí ve vodiči je:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} && (9,12) \\ &= 1,0 \times 1,0 \times 0,73 \frac{803 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 73,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 73,3 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned}V_\sigma V_r &= 1,0 \times 1,0 && \text{podle 4.3.2.1} \\ \beta &= 0,73 && \text{podle IEC 865-1, tabulka 3} \\ Z &= 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 && \text{(viz 4.3.1.1).}\end{aligned}$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

s nižší hodnotou $R_{p0,2}$. Pro obdélníkový průřez $q = 1,5$, viz IEC 865-1, tabulka 4. Potom platí:

$$\sigma_{\text{tot}} = 73,3 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

4.3.2.3 Ohybové síly na podpěrkách

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Podle 4.3.2.1, $V_F V_r = 1,8 \times 1,0 = 1,8$, tato hodnota je nižší než hodnota 1,97 podle IEC 865-1 tabulka 2, viz 4.3.1.2.

Pro vnější podpěrky (A) s $\alpha_A = 0,4$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 0,4 \times 803 \text{ N} = 578 \text{ N}$$

Pro vnitřní podpěrky (B) s $\alpha_B = 1,1$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 1,1 \times 803 \text{ N} = 1\,590 \text{ N}$$

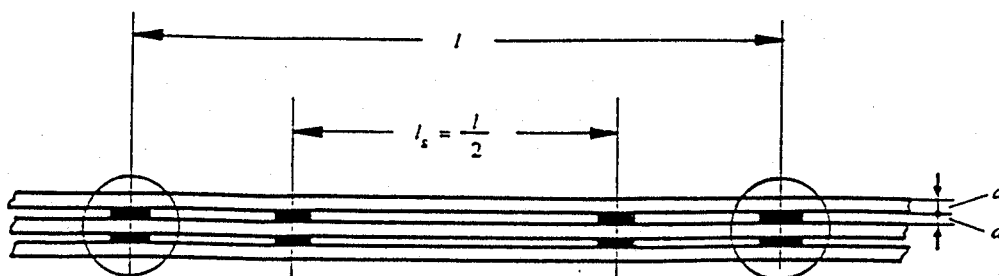
4.4 Vyhodnocení

	Zjednodušená metoda	Podrobná metoda
Přípojnice budou odolné proti zkratové síle		
Vypočítaná ohybová napětí σ_{tot} jsou: N/mm ²	73,3	73,3
Vnější podpěrky musí vydržet nárazovou (dynamickou) ohybovou sílu N	633	578
Vnitřní podpěrky musí vydržet nárazovou (dynamickou) ohybovou sílu N	1 740	1 590

Pozn.: Ohybová síla je vztažena k ose těžiště průřezu vodiče.

5 Příklad 2 - Mechanické účinky na zařízení 10 kV s vícenásobnými tuhými vodiči

Výpočet je proveden pro stejné 10 kV trojfázové přípojnice jako v příkladě 1, ale s hlavním vodičem složeným ze třech dílčích vodičů, jak je znázorněno na obrázku 2. Průřezy dílčích vodičů jsou 60 x 10 mm jako vodičů v příkladě 1.



Obrázek 2 - Uspořádání rozpěrek a dílčích vodičů jedné fáze

5.1 Vstupní údaje (doplňující k příkladu 1)

Počet dílčích vodičů	$n = 3$
Osová vzdálenost dílčích vodičů ve směru síly	$d = 10 \text{ mm}$
Počet rozpěrek v rozpětí	$k = 2$
Vzdálenost mezi rozpěrkami	$l_s = 0,5 \text{ m}$
Rozměry rozpěrek z materiálu AlMgSi0,5	60 mm x 60 mm x 10 mm

5.2 Maximální síla na střední vodič

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (30,6 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{1,00 \text{ m}}{0,20 \text{ m}} = 811 \text{ N} \quad (2)$$

kde

$$i_{p3} = \sqrt{2} \times I''_{k3} = \sqrt{2} \times 1,35 \times 16 \text{ kA} = 30,6 \text{ kA} = 30,6 \cdot 10^3 \text{ A}$$

a účinná vzdálenost mezi hlavními vodiči

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,2}{1,00} = 0,20 \text{ m} \quad (6)$$

s k_{12} podle IEC 865-1 obrázek 1 pro $b_m/d_m = 60 \text{ mm}/50 \text{ mm} = 1,2$ a $a/d_m = 200 \text{ mm}/50 \text{ mm} = 4$. Rozměry b_m a d_m jsou ukázány na obrázku 2b v IEC 865-1.

5.3 Maximální síla na vnější dílčí vodič mezi dvěma sousedními spojovacími díly (rozpěrkami)

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_{p3}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A\text{m}} \times \left(\frac{30,6 \cdot 10^3 \text{ A}}{3} \right)^2 \times \frac{0,5 \text{ m}}{20,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 515 \text{ N} \quad (4)$$

kde

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} = \frac{0,60}{20 \text{ mm}} + \frac{0,78}{40 \text{ mm}} = \frac{1}{20,2 \text{ mm}} \quad (8)$$

s k_{12} a k_{13} z IEC 865-1, obrázek 1:

- $k_{12} = 0,60$ pro $a_{12}/d = 20 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 2$ a $b/d = 6$
- $k_{13} = 0,78$ pro $a_{13}/d = 40 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 4$ a $b/d = 6$

nebo a_s z IEC 865-1, tabulka 1.

5.4 Namáhání vodiče a síly na podpěry

Výpočty mohou být provedeny podle 5.4.1 nebo 5.4.2.

5.4.1 Zjednodušená metoda

5.4.1.1 Ohybové napětí způsobené silami mezi hlavními vodiči

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \quad (9)$$

$$= 1,0 \times 0,73 \times \frac{811 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 24,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 24,7 \text{ N/mm}^2$$

kde

$$V_\sigma V_r = 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 3}$$

$$Z = n \frac{bd^2}{6} = 3 \times \frac{0,06 \text{ m} \times (0,01 \text{ m})^2}{6} \text{ m}^3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{podle IEC 865-1, 2.2.2.3}$$

5.4.1.2 Ohybové napětí způsobené silami mezi dílčími vodiči

$$\begin{aligned}\sigma_s &= V_{\sigma_s} V_r \frac{F_s l_s}{16Z_s} \\ &= 1,0 \times \frac{515 \text{ N} \times 0,5 \text{ m}}{16 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 16,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 16,1 \text{ N/mm}^2\end{aligned}\quad (10)$$

kde

$$V_{\sigma_s} V_r = 1,0 = (V_{\sigma_s}, V_r)_{\max} \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 2}$$

$$Z_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{jako } Z \text{ v 4.3.1 (příklad 1)}$$

5.4.1.3 Výsledné ohybové napětí v materiálu přípojnice

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s = 24,7 \text{ N/mm}^2 + 16,1 \text{ N/mm}^2 = 40,8 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

s nižší hodnotou $R_{p0,2}$. Pro obdélníkový průřez $q = 1,5$, viz IEC 865-1, tabulka 4 nebo 2.2.2.3. Potom platí:

$$\sigma_{\text{tot}} = 40,8 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 16,1 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 120 \text{ N/mm}^2$$

5.4.1.4 Ohybové síly na podpěrkách

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3}$$

Podle IEC 865-1, tabulka 2 s vyšší hodnotou $R_{p0,2}$ je:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{40,8 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2} = 0,283$$

proto pro trojfázový zkrat

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} \leq 0,370$$

Potom

$$V_F V_R = 2,7$$

Pro vnější podpěrky (A) je s $\alpha_A = 0,4$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dA} = 2,7 \times 0,4 \times 811 \text{ N} = 876 \text{ N}$$

Pro vnitřní podpěrky (B) je s $\alpha_B = 1,1$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dB} = 2,7 \times 1,1 \times 811 \text{ N} = 2\,409 \text{ N}$$

5.4.2 Podrobná metoda

5.4.2.1 Vlastní kmitočet f_c fázového vodiče, f_{cs} dílčího vodiče a součinitelé V_F , V_σ , V_{cs} , V_R a V_{rs}

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} = 0,97 \times \frac{3,56}{(1,00 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 50,8 \text{ Hz} \quad (17)$$

kde

$c = 0,97$ podle IEC 865-1, obrázek 3c pro $k = 2$ a poměr

$$\frac{m_z}{n m'_s l} = \frac{1,62 \text{ kg/m} \times 0,06 \text{ m} \times 2}{3 \times 1,62 \text{ kg/m} \times 1,00 \text{ m}} = 0,04$$

$\gamma = 3,56$ z IEC 865-1, tabulka 3

$J = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$ je stejné jako v příkladu 1.

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} = \frac{3,56}{(0,5 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 209 \text{ Hz} \quad (18)$$

Pro poměr $f_C/f = 1,02$ a $f_{CS}/f = 4,18$ udává IEC 865-1, obrázek 4 a 2.2.2.6.2, následující hodnoty součinitelů V_F , V_σ , $V_{\sigma S}$, V_r a V_{rS} :

$$\begin{aligned} V_F &= 1,8 \\ V_\sigma &= 1,0 \\ V_{\sigma S} &= 1,0 \\ V_r &= 1,0 \\ V_{rS} &= 1,0 \end{aligned}$$

5.4.2.2 Ohybové napětí způsobené silami mezi fázovými vodiči

$$\begin{aligned} \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} & (9) \\ &= 1,0 \times 1,0 \times 0,73 \times \frac{811 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 24,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned} V_\sigma V_r &= 1,0 \times 1,0 && \text{podle 5.4.2.1} \\ \beta &= 0,73 && \text{podle IEC 865-1, tabulka 3} \end{aligned}$$

$$Z = n \frac{bd^2}{6} = 3 \times \frac{0,06 \times 0,012^2}{6} \text{ m}^3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ podle IEC 865-1, 2.2.2.3}$$

5.4.2.3 Ohybové napětí způsobené silami mezi dílčími vodiči

$$\begin{aligned} \sigma_s &= V_{\sigma S} V_{rS} \frac{F_s l_s}{16Z_s} & (10) \\ &= 1,0 \times 1,0 \times \frac{515 \text{ N} \times 0,5 \text{ m}}{16 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 16,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 16,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

kde

$$V_{\sigma S} V_{rS} = 1,0 \times 1,0 \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 2}$$

$$Z_S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{stejně jako } Z \text{ v 4.3.1.1 (příklad 1)}$$

5.4.2.4 Výsledné ohybové napětí přípojnice

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s = 24,7 \text{ N/mm}^2 + 16,1 \text{ N/mm}^2 = 40,8 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{\text{tot}} \leq qR_{p0,2} \quad (13)$$

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

s nižší hodnotou $R_{p0,2}$. Pro obdélníkový průřez $q = 1,5$, viz IEC 865-1, tabulka 4. Potom platí:

$$\sigma_{\text{tot}} = 40,8 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 16,1 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 120 \text{ N/mm}^2$$

5.4.2.5 Ohybové síly na podpěrkách

$$F_d = V_F V_R \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Podle 5.4.2.1 je $V_F V_R = 1,8 \times 1,0 = 1,8$ a je nižší než hodnota 2,7 získaná z IEC 865-1, tabulka 2 v případě zjednodušené metody, viz 5.4.1.4.

Pro vnější podpěrky (A) s $\alpha_A = 0,4$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dA} = V_F V_R \alpha_A F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 0,4 \times 811 \text{ N} = 584 \text{ N}$$

Pro vnitřní podpěrky (B) s $\alpha_B = 1,1$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

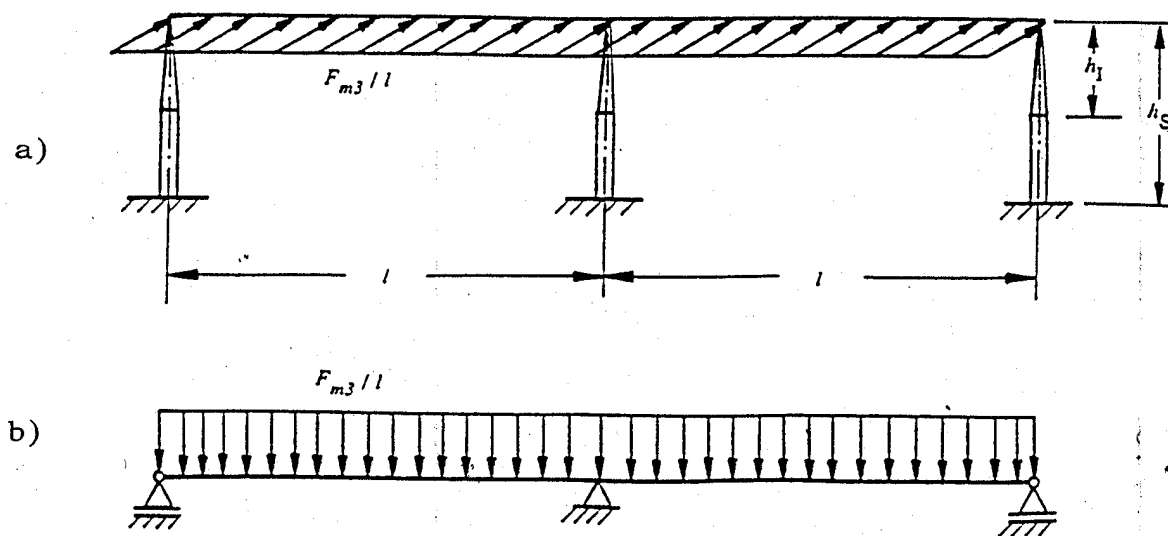
$$F_{dB} = V_F V_R \alpha_B F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 1,1 \times 811 \text{ N} = 1\,606 \text{ N}$$

5.5 Vyhodnocení

		Zjednodušená metoda	Podrobná metoda
Přípojnice budou odolné proti zkratové síle			
Vypočítaná ohybová napětí σ_{tot} :	N/mm ²	40,8	40,8
σ_S :	N/mm ²	16,1	16,1
Vnější podpěrky musí vydržet nárazovou (dynamickou) ohybovou sílu	N	876	584
Vnitřní podpěrky musí vydržet nárazovou (dynamickou) ohybovou sílu	N	2 409	1 606

6 Příklad 3 - Mechanické účinky na zařízení zvn s trubkovými vodiči

Výpočet je proveden pro trojfázovou přípojnici 380 kV, s jedním trubkovým vodičem na fázi. Uspořádání vodiče je znázorněno na obrázku 3. Tento příklad zahrnuje výpočty s vlivem a bez vlivu automatického opětovného zapínání (OZ).



- a) Uspořádání se dvěma rozpětími
b) Model zanedávající vliv podpěrných konstrukcí

Obrázek 3 - Uspořádání vodiče a podpěrek

6.1 Vstupní údaje

Trojfázový počáteční rázový zkratový proud $I''_{k3} = 50 \text{ kA}$
(efektivní hodnota)

Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu $K = 1,81$

Kmitočet sítě $f = 50 \text{ Hz}$

Počet rozpětí $= 2$

Vzdálenost mezi podpěrkami $l = 18 \text{ m}$

Osová vzdálenost mezi vodiči $a = 5 \text{ m}$

Výška izolátoru se svorkou $h_I = 3,7 \text{ m}$

Výška podpěry (celková) $h_S = 7,0 \text{ m}$

Trubkový vodič z materiálu z AlMgSi0,5

- Hmotnost na jednotku délky

$$m' = 7,84 \text{ kg/m}$$

- Vnější průměr

$$D = 160 \text{ mm}$$

- Tloušťka stěny

$$s = 6 \text{ mm}$$

- Modul pružnosti v tahu

$$E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$$

- Mez průtažnosti

$$R_{p0,2} = 160 \text{ N/mm}^2 \text{ až } 240 \text{ N/mm}^2$$

6.2 Maximální síla na střední vodič

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_S}{\text{Am}} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (128 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{18 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 10\,200 \text{ N} = 10,2 \text{ kN} \quad (2)$$

kde

$$i_{p3} = \sqrt{2K} I_{k3} = \sqrt{2} \times 1,81 \times 50 \text{ kA} = 128 \text{ kA} = 128 \cdot 10^3 \text{ A}$$

a $a_m = a = 5 \text{ m}$.

6.3 Namáhání vodiče a síly na podpěry

Výpočet může být proveden podle 6.3.1 nebo podle 6.3.2.

6.3.1 Zjednodušená metoda

6.3.1.1 Ohybové namáhání ve vodiči bez vlivu automatického trojfázového OZ

Maximální ohybové namáhání je:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} & (9,12) \\ &= 1,0 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 155 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 155 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned}V_\sigma V_r &= 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} && \text{podle IEC 865-1, tabulka 2} \\ \beta &= 0,73 && \text{podle IEC 865-1, tabulka 3}\end{aligned}$$

$$Z = \frac{J}{D/2} = \frac{8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{0,080 \text{ m}} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

kde

$$J = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2s)^4] = \frac{\pi}{64} [0,160^4 - (0,160 - 2 \times 0,006)^4] \text{ m}^4 = 8,62 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

s nižší hodnotou $R_{p0,2}$.

Pro trubku s kruhovým průřezem podle IEC 865-1, tabulka 4

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4} = 1,7 \times \frac{1 - (1 - 2 \times 0,006/0,160)^3}{1 - (1 - 2 \times 0,006/0,160)^4} = 1,32$$

Potom platí:

$$\sigma_{\text{tot}} = 155 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.3.1.2 Ohybová síla na podpěrkách bez vlivu trojfázového OZ

$$F_d = V_F V_R \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Podle IEC 865-1, tabulka 2 pro vyšší hodnotu $R_{p0,2}$ je:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{155 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2} = 0,807$$

tudíž

$$0,370 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} < 1$$

Proto

$$V_F V_R = \frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{\text{tot}}} = \frac{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2}{155 \text{ N/mm}^2} = 1,24$$

Síla na vnější podpěrky (A) s $\alpha_A = 0,375$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dA} = V_F V_R \alpha_A F_{m3} = 1,24 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 4,74 \text{ kN}$$

Síla na vnitřní podpěrky (B) s $\alpha_B = 1,25$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dB} = V_F V_R \alpha_B F_{m3} = 1,24 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 15,8 \text{ kN}$$

Ohybové momenty na nosné konstrukce (stoličky) jsou:

- v patě vnějšího izolátoru

$$M_{IA} = F_{dA} h_I = 4,74 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 17,5 \text{ kNm}$$

- v patě vnější podpěry

$$M_{SA} = F_{dA} h_S = 4,74 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 33,2 \text{ kNm}$$

- v patě vnitřního izolátoru

$$M_{IB} = F_{dB} h_I = 15,8 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 58,5 \text{ kNm}$$

- v patě vnitřní podpěry

$$M_{SB} = F_{dB} h_S = 15,8 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 110,6 \text{ kNm}$$

6.3.1.3 Ohybové namáhání ve vodiči způsobené trojfázovým OZ

Ohybové namáhání způsobené trojfázovým OZ:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} & (9,12) \\ &= 1,8 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 279 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 279 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

kde

$$V_\sigma V_r = 1,8 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 3}$$

$$Z = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{viz 6.3.1.1}$$

Přípojnice jsou odolné zkratovým silám, jestliže:

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

pro nižší hodnotu $R_{p0,2}$ a $q = 1,32$, viz 6.3.1.1.

Potom není splněna podmínka (13), protože

$$\sigma_{\text{tot}} = 279 \text{ N/mm}^2 \text{ je větší než } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

Při výpočtu zjednodušenou metodou přípojnice nejsou odolné vůči působení zkratové síly.

POZNÁMKA - Proto je nutné použít podrobnou metodu.

6.3.1.4 Ohybové síly na podpěrkách způsobené trojfázovým OZ

POZNÁMKA - Následující výpočet je proveden pouze pro ilustraci, vzhledem k tomu, že přípojnice nevydrží zkratové síly podle zjednodušené metody.

$$F_d = V_F V_R \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Podle IEC 865-1, tabulka 2 s vyšší hodnotou $R_{p0,2}$ je:

$$\frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{279 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2} = 1,45$$

potom

$$1 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}}$$

Proto

$$V_F V_R = 1,0$$

Síla na vnější podpěrky (A) s $\alpha_A = 0,375$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dA} = V_F V_R \alpha_A F_{m3} = 1,0 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 3,83 \text{ kN}$$

Síla na vnitřní podpěrky (B) s $\alpha_B = 1,25$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dB} = V_F V_R \alpha_B F_{m3} = 1,0 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 12,75 \text{ kN}$$

6.3.2 Podrobná metoda

6.3.2.1 Vlastní kmitočet f_c a součinitelé V_F , V_σ a V_R

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} = \frac{2,45}{(18 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{7,84 \text{ kg/m}}} = 2,10 \text{ Hz} \quad (16)$$

kde

$\gamma = 2,45$ podle IEC 865-1, tabulka 3
 $J = 8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ (viz 6.3.1.1).

Poměr f_c/f je

$$\frac{f_c}{f} = \frac{2,10}{50} = 0,042$$

pro tento poměr jsou součinitelé V_F , V_σ a V_R podle IEC 865-1, 2.2.2.6.2, obrázek 4 a obrázek 5:

$$\begin{aligned} V_F &= 0,36 \\ V_\sigma &= 0,31 \\ V_R &= 1,0 \quad \text{bez trojfázového OZ} \\ V_R &= 1,8 \quad \text{s trojfázovým OZ} \end{aligned}$$

6.3.2.2 Ohybové namáhání vodiče bez vlivu trojfázového OZ

Maximální ohybové namáhání vodiče je:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_R \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} & (9,12) \\ &= 0,31 \times 1,0 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 48,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 48,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned} V_\sigma V_R &= 0,31 \times 1,0 = 0,31 \quad \text{podle 6.3.2.1, hodnota, která je nižší} \\ &\quad \text{než } 1,0 = (V_\sigma V_R)_{\text{max}} \text{ podle IEC 865-1,} \\ &\quad \text{tabulka 2} \\ \beta &= 0,73 \quad \text{podle IEC 865-1, tabulka 3} \end{aligned}$$

$$Z = \frac{J}{D/2} = \frac{8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{0,080 \text{ m}} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{\text{tot}} \leq \sigma_{Rp0,2} \quad (13)$$

pro nižší hodnotu $R_{p0,2}$ přičemž $q = 1,32$, viz 6.3.1.1

Z toho vyplývá:

$$\sigma_{\text{tot}} = 48,1 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.3.2.3 Ohybové síly na podpěrkách bez vlivu trojfázového OZ

$$F_d = V_F V_R \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Podle 6.3.2.1 je $V_F V_R = 0,36 \times 1,0 = 0,36$, tato hodnota je nižší než hodnota 1,24 získaná z IEC 865-1, tabulka 2, v případě zjednodušené metody, viz 6.3.1.2.

Síla na vnější podpěrky (A) s $\alpha_A = 0,375$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dA} = V_F V_R \alpha_A F_{m3} = 0,36 \times 1,0 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 1,38 \text{ kN}$$

Síla na vnitřní podpěrky (B) s $\alpha_B = 1,25$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dB} = V_F V_R \alpha_B F_{m3} = 0,36 \times 1,0 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 4,59 \text{ kN}$$

Ohybové momenty na nosné konstrukce (stoličky) jsou:

- v patě vnějšího izolátoru

$$M_{IA} = F_{dA} h_I = 1,38 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 5,11 \text{ kNm}$$

- v patě vnější podpěry

$$M_{SA} = F_{dA} h_S = 1,38 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 9,66 \text{ kNm}$$

- v patě vnitřního izolátoru

$$M_{IB} = F_{dB} h_I = 4,59 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 17,0 \text{ kNm}$$

- v patě vnitřní podpěry

$$M_{SB} = F_{dB} h_S = 4,59 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 32,1 \text{ kNm}$$

6.3.2.4 Ohybové namáhání ve vodiči při trojfázovém OZ

Maximální ohybové namáhání je:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} & (9,12) \\ &= 0,31 \times 1,8 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 86,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 86,6 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

kde

$$V_\sigma V_r = 0,31 \times 1,8 = 0,558 \text{ podle 6.3.2.1, hodnota, která je nižší než } 1,8 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \text{ podle IEC 865-1, tabulka 2}$$

$$\beta = 0,73 \text{ podle IEC 865-1, tabulka 3}$$

$$Z = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ viz 6.3.2.2}$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

pro nižší hodnotu $R_{p0,2}$ přičemž $q = 1,32$, viz 6.3.1.1.

Z toho vyplývá

$$\sigma_{\text{tot}} = 86,6 \text{ N/mm}^2 \text{ což je menší než } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.3.2.5 Ohybové síly na podpěrkách při trojfázovém OZ

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Podle 6.3.2.1 je $V_F V_r = 0,36 \times 1,8 = 0,65$, tato hodnota je nižší než hodnota 1,0 získaná z IEC 865-1, tabulka 2, v případě zjednodušené metody, viz 6.3.1.4.

Síla na vnější podpěrky (A) s $\alpha_A = 0,375$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 0,36 \times 1,8 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 2,48 \text{ kN}$$

Síla na vnitřní podpěrky (B) s $\alpha_B = 1,25$, viz IEC 865-1, tabulka 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 0,36 \times 1,8 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 8,26 \text{ kN}$$

Ohybové momenty na nosné konstrukce (stoličky) jsou:

- v patě vnějšího izolátoru

$$M_{IA} = F_{dA} h_I = 2,48 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 9,18 \text{ kNm}$$

- v patě vnější podpěry

$$M_{SA} = F_{dA} h_S = 2,48 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 17,4 \text{ kNm}$$

- v patě vnitřního izolátoru

$$M_{IB} = F_{dB} h_I = 8,26 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 30,6 \text{ kNm}$$

- v patě vnitřní podpěry

$$M_{SB} = F_{dB} h_S = 8,26 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 57,8 \text{ kNm}$$

6.4 Vyhodnocení

		Zjednodušená metoda	Podrobná metoda
a) Bez trojfázového OZ			
Přípojnice budou odolné proti zkratové síle			
Vypočítaná ohybová napětí σ_{tot} :	N/mm ²	155	48,1
Vnější podpěrky musí vydržet nárazovou (dynamickou) ohybovou sílu	kN	4,74	1,38
Vnitřní podpěrky musí vydržet nárazovou (dynamickou) ohybovou sílu	kN	15,8	4,59

b) Při trojfázovém OZ

Vypočítané ohybové napětí σ_{tot} :	N/mm ²	279	86,6
--	-------------------	-----	------

Zkratová odolnost přípojnice vůči zkratové síle je prokázána při použití podrobné metody, nikoliv při použití zjednodušené metody

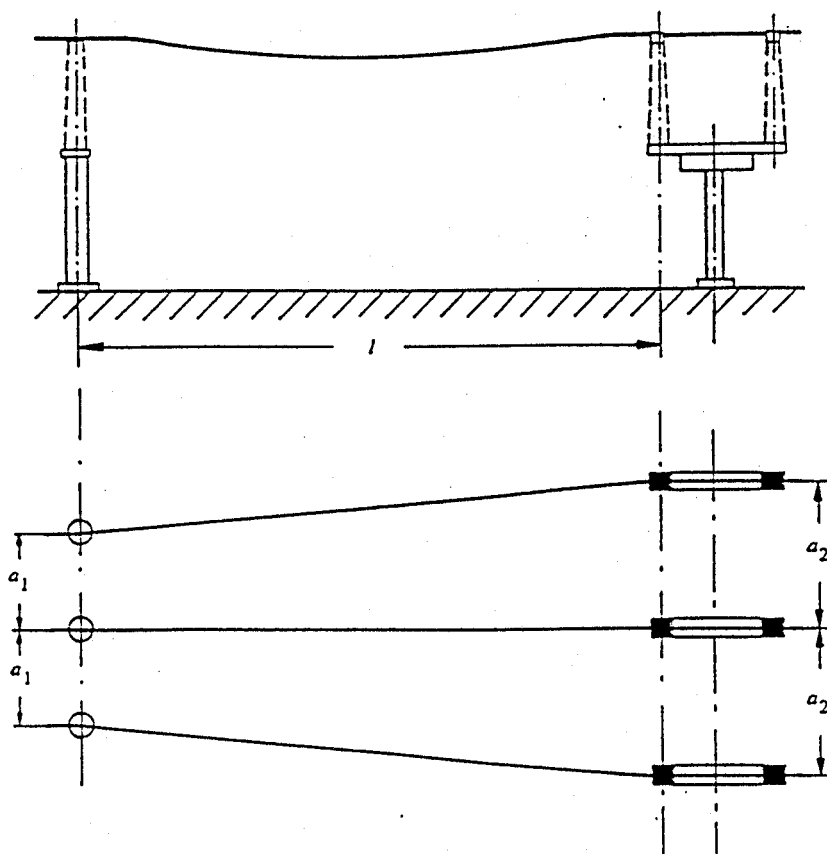
Vnější podpěrky musí vydržet nárazovou ohybovou sílu	kN	3,83	2,48
--	----	------	------

Vnitřní podpěrky musí vydržet nárazovou ohybovou sílu	kN	12,8	8,26
---	----	------	------

POZNÁMKA: Ohybové síly na podpěrky jsou vztaženy k ose trubkového vodiče. Při výběru vhodného typu podpěrky respektivě její zaručené pevnosti v ohybu je nutné tuto skutečnost respektovat.

7 Příklad 4 - Mechanické účinky na 110 kV zařízení s volně zavěšenými vodiči bez izolačních závěsů

Výpočet je proveden pro trojfázové propojení pomocí ohebných přípojníc s jedním celohliníkovým lanovaným vodičem na fázi s měnící se vzdáleností mezi vodiči. Kotevní body na každém konci rozpětí jsou podpěrné izolátory na ocelových konstrukcích (stoličkách) tak, jak je znázorněno na obrázku 4.



Obrázek 4 - Systém s volně zavěšenými vodiči

7.1 Vstupní údaje

Trojfázový počáteční rázový zkratový proud
(efektivní hodnota)

$$I''_{k3} = 19 \text{ kA}$$

Doba prvního přerušení proudu

$$T_{k1} = 0,3 \text{ s}$$

Vzdálenost mezi podpěrkami

$$l = 11,5 \text{ m}$$

Osová vzdálenost mezi vodiči	$a_1 = 1,6 \text{ m}$ $a_2 = 2,4 \text{ m}$
Výsledná pérová konstanta obou podpěrných bodů rozpětí	$S = 100 \text{ N/mm}^2$
Celohliníkový lanovaný vodič AAC 240	
- Průřez	$A_S = 242 \text{ mm}^2$
- Hmotnost na jednotku délky	$m'_S = 0,670 \text{ kg/m}$
- Modul pružnosti v tahu	$E = 55\,000 \text{ N/mm}^2$
Statická tahová síla ve vodiči při teplotě $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ (místní minimální zimní teplota)	$F_{St,-20} = 400 \text{ N}$
Statická tahová síla ve vodiči při teplotě $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (zvolená maximální teplota vodiče)	$F_{St,60} = 273 \text{ N}$
Tíhové zrychlení	$g_n = 9,81 \text{ m/s}^2$

7.2 Elektromagnetické síly a charakteristické parametry

Elektromagnetická síla na jednotku délky je:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I'_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Am}} \times 0,75 \times \frac{(19 \cdot 10^3 \text{ A})^2}{2\text{m}} \times 1,0 = 27,1 \text{ N/m} \quad (19)$$

$$\text{s } l_c/l = 1,0 \text{ a ekvivalentní vzdáleností } a = \frac{a_1 + a_2}{2} = \frac{1,6 \text{ m} + 2,4 \text{ m}}{2} = 2 \text{ m}$$

Parametr r je:

$$r = \frac{F'}{nm'_S g_n} = \frac{27,1 \text{ N/m}}{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 4,12 \quad (20)$$

Úhel výsledné síly je:

$$\delta_1 = \operatorname{arctg} r = \operatorname{arctg} 4,12 = 76,4^\circ \quad (21)$$

Ekvivalentní statické průhyby vodiče ve středu rozpětí jsou:

$$b_{c,-20} = \frac{n m'_s g_n l^2}{8 F_{st,-20}} = \frac{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5^2 \text{ m}^2}{8 \times 400 \text{ N}} = 0,272 \text{ m} \quad (22)$$

$$b_{c,60} = \frac{n m'_s g_n l^2}{8 F_{st,60}} = \frac{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5^2 \text{ m}^2}{8 \times 273 \text{ N}} = 0,398 \text{ m} \quad (22)$$

Doby kmitání vodiče jsou:

$$T_{-20} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-20}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{0,272}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 0,936 \text{ s} \quad (23)$$

$$T_{60} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,60}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{0,398}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 1,132 \text{ s} \quad (23)$$

Výsledné doby kmitání vodiče jsou:

$$\begin{aligned} T_{\text{res},-20} &= \frac{T_{-20}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24) \\ &= \frac{0,936 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+4,12^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{76,4}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 0,511 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{res},60} &= \frac{T_{60}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24) \\ &= \frac{1,132 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+4,12^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{76,4}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 0,618 \text{ s} \end{aligned}$$

Normované tuhosti jsou:

$$N_{-20} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,-20} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{10^5 \text{ N/m} \times 11,5 \text{ m}} + \frac{1}{1 \times 1,85 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,093 \cdot 10^{-6} \text{ N}^{-1}$$

s

$$E_{s,-20} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,-20}}{n A_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 55 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{1,65 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 1,85 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

pro $\frac{F_{st,-20}}{n A_s}$ platí:

$$\frac{F_{st,-20}}{n A_s} = \frac{400 \text{ N}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,65 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ je menší než } \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$N_{60} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,60} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{10^5 \text{ N/m} \times 11,5 \text{ m}} + \frac{1}{1 \times 1,79 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,100 \cdot 10^{-6} \text{ N}^{-1}$$

s

$$E_{s,60} = E \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{F_{st,60}}{n A_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 55 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{1,13 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 1,79 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

pro $\frac{F_{st,60}}{n A_s}$ platí:

$$\frac{F_{st,60}}{n A_s} = \frac{273 \text{ N}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,13 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ je menší než } \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Součinitelé napjatosti jsou:

$$\zeta_{-20} = \frac{(nm'_s g_n l)^2}{24 F_{st,-20}^3 N_{-20}} = \frac{(1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5 \text{ m})^2}{24 \times (400 \text{ N})^3 \times 1,093 \cdot 10^{-6} \text{ 1/N}} = 3,40 \quad (28)$$

$$\zeta_{60} = \frac{(nm'_s g_n l)^2}{24 F_{st,60}^3 N_{60}} = \frac{(1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5 \text{ m})^2}{24 \times (273 \text{ N})^3 \times 1,100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/N}} = 10,6 \quad (28)$$

Úhly vychýlení rozpětí jsou:

$$\delta_{k,-20} = 2\delta_1 = 2 \times 76,4^\circ = 153^\circ \quad (29)$$

protože

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} = \frac{0,3 \text{ s}}{0,511 \text{ s}} = 0,587 \quad \text{je větší než } 0,5$$

$$\delta_{k,60} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,60}} \right) \right] = 76,4^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,3}{0,618} \right) \right] = 152,5^\circ \quad (29)$$

protože

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,60}} = \frac{0,3 \text{ s}}{0,618 \text{ s}} = 0,485 \quad \text{je menší než } 0,5$$

Maximální úhel vychýlení $\delta_{m,-20}$ a $\delta_{m,60}$ závisí na χ_{-20} a χ_{60} , které dále závisí na $\delta_{k,-20}$ a $\delta_{k,60}$.

Pro $\delta_{k,-20} = 153^\circ$ větší než 90° je:

$$\chi_{-20} = 1 - r = 1 - 4,12 = -3,12 \quad (30)$$

a pro $\chi_{-20} = -3,12$ menší než $-0,985$ je:

$$\delta_{m,-20} = 180^\circ \quad (31)$$

Pro $\delta_{k,60} = 152,5^\circ$ větší než 90° je:

$$\chi_{60} = 1 - r = 1 - 4,12 = -3,12 \quad (30)$$

a pro $\chi_{60} = -3,12$ menší než $-0,985$ je:

$$\delta_{m,60} = 180^\circ \quad (31)$$

7.2.1 Tahová síla F_t při zkratu

Parametr zatížení je:

$$\varphi_{60} = \varphi_{-20} = 3(\sqrt{1+r^2} - 1) = 3(\sqrt{1+4,12^2} - 1) = 9,72 \quad (32)$$

protože $T_{k1} = 0,3$ s je větší než $\frac{T_{res,-20}}{4} = \frac{0,511 \text{ s}}{4} = 0,128$ s

a $T_{k1} = 0,3$ s je větší než $\frac{T_{res,60}}{4} = \frac{0,618 \text{ s}}{4} = 0,155$ s

Podle IEC 865-1, obrázek 7, součinitelé Ψ_{-20} a Ψ_{60} jsou:

- pro $\varphi_{-20} = 9,72$ a $\zeta_{-20} = 3,40$:

$$\Psi_{-20} = 0,58$$

- pro $\varphi_{60} = 9,72$ a $\zeta_{60} = 10,6$:

$$\Psi_{60} = 0,75$$

Tahové síly při zkratu jsou pro $n = 1$:

$$F_{t,-20} = F_{st,-20} (1 + \varphi_{-20} \Psi_{-20}) = 400 \text{ N} (1 + 9,72 \times 0,58) = 2 655 \text{ N} = 2,66 \text{ kN} \quad (34)$$

$$F_{t,60} = F_{st,60} (1 + \varphi_{60} \Psi_{60}) = 273 \text{ N} (1 + 9,72 \times 0,75) = 2 263 \text{ N} = 2,26 \text{ kN} \quad (34)$$

Tahová síla F_t je maximální hodnota z $F_{t,-20}$ a $F_{t,60}$:

$$F_t = \max \{F_{t,-20}, F_{t,60}\} = \max \{2,66 \text{ kN}, 2,26 \text{ kN}\} = 2,66 \text{ kN}$$

7.2.2 Tahová síla F_f po zkratu

Protože $r = 4,12$ je větší než 0,6 nebo $\delta_{m,-20} = \delta_{m,60} = 180^\circ$ je větší než 70° pak tahová síla po zkratu F_f je významná:

$$\begin{aligned} F_{f,-20} &= 1,2 F_{st,-20} \sqrt{1 + 8 \zeta_{-20} \cdot \frac{\delta_{m,-20}}{180^\circ}} & (35) \\ &= 1,2 \times 400 \text{ N} \sqrt{1 + 8 \times 3,40 \times \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 2\,549 \text{ N} = 2,55 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{f,60} &= 1,2 F_{st,60} \sqrt{1 + 8 \zeta_{60} \cdot \frac{\delta_{m,60}}{180^\circ}} & (35) \\ &= 1,2 \times 273 \text{ N} \sqrt{1 + 8 \times 10,6 \times \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 3\,035 \text{ N} = 3,04 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tahová síla F_f je maximální hodnota z $F_{f,-20}$ a $F_{f,60}$:

$$F_f = \max \{F_{f,-20}, F_{f,60}\} = \max \{2,55 \text{ kN}, 3,04 \text{ kN}\} = 3,04 \text{ kN}$$

7.3 Horizontální výchylka b_h a minimální vzdušná vzdálenost a_{\min}

Všechny následující hodnoty jsou vypočítány pro vodiče při teplotě 60°C , které vedou k větším výchylkám rozpětí než pro vodiče při teplotě -20°C .

Poměrné pružné prodloužení je:

$$\varepsilon_{\text{ela}} = N_{60} (F_{t,60} - F_{st,60}) \quad (36)$$

$$= 1,10 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}} \times (2\,263 \text{ N} - 273 \text{ N}) = 2,19 \cdot 10^{-3}$$

Poměrné tepelné prodloužení je:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{th}} &= c_{\text{th}} \left(\frac{I_{k3}''}{n A_s} \right)^2 \frac{T_{\text{res},60}}{4} & (37) \\ &= 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2 \text{s}} \times \left(\frac{19 \cdot 10^3 \text{ A}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \right)^2 \times \frac{0,618 \text{ s}}{4} = 2,57 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

protože

$$T_{k1} = 0,3 \text{ s je větší než } \frac{T_{res,60}}{4} = \frac{0,618 \text{ s}}{4} = 0,155 \text{ s}$$

$$\text{a } c_{th} = 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2 \text{s}} \text{ pro celohliníkové vodiče}$$

Součinitel C_D je:

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c,60}} \right)^2 (\epsilon_{cla} + \epsilon_{th})} \quad (38)$$

$$= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \times \left(\frac{11,5 \text{ m}}{0,398 \text{ m}} \right)^2 \times (2,19 \cdot 10^{-3} + 2,57 \cdot 10^{-4})} = 1,33$$

Protože platí, že $r = 4,12$, což je větší než $1,8$, pak musí být použit součinitel $C_F = 1,15$ (viz IEC 865-1, vztah (39)).

Maximální horizontální výchylka b_h pro $\delta_{m,60} = 180^\circ$ větší než 90° :

$$b_h = C_F C_D b_{c,60} = 1,15 \times 1,33 \times 0,398 = 0,61 \text{ m} \quad (40)$$

Minimální vzdušná vzdálenost a_{min} :

$$a_{min} = a - 2b_h = 2 \text{ m} - 2 \times 0,61 \text{ m} = 0,78 \text{ m} \quad (42)$$

7.4 Vyhodnocení

Podpěry (podpěrky a stoličky) musí vydržet nárazovou ohybovou sílu $3,04 \text{ kN}$, která je daná tahovou silou F_f po zkratu.

Podle IEC 865-1, 2.4.1, svorkový materiál (armatury) pro ukotvení vodiče musí být navržen na základě vrcholových sil

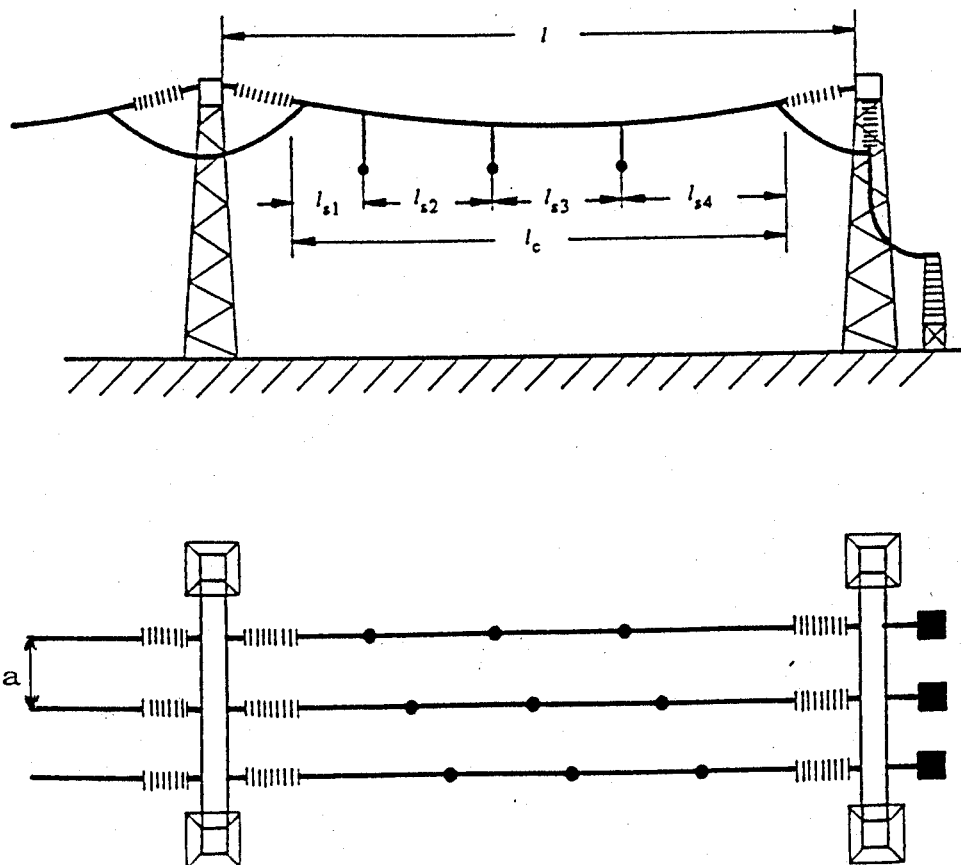
$$\begin{aligned} \max(1,5 \cdot F_t, 1,0 \cdot F_f) &= \max(1,5 \times 2,66 \text{ kN}, 1,0 \times 3,04 \text{ kN}) = \\ &= \max(3,99 \text{ kN}, 3,04 \text{ kN}) = 3,99 \text{ kN} \end{aligned}$$

Horizontální výchylka rozpětí je $0,61 \text{ m}$ a minimální vzdušná vzdálenost mezi vodiči sousedních fází je $0,78 \text{ m}$.

8 Příklad 5 - Mechanické účinky na předepjaté svazkové vodiče s izolačními závěsy

Výpočet je proveden pro trojfázové uspořádání přípojníc 380 kV se dvěma lanovými vodiči ve svazku jak znázorňuje obrázek 5. V rozpětí jsou tři připojení pro pantografové odpojovače, které zároveň plní funkci rozpěrek.

Výpočet je proveden pro dvě rozdílné osové vzdálenosti mezi dílčími vodiči ukazující účinek síly sevření.



Obrázek 5 - Uspořádání se svazkovými vodiči s izolačními závěsy

8.1 Vstupní údaje

Trojfázový počáteční rázový zkratový proud (efektivní hodnota)	$I''_{k3} = 63 \text{ kA}$
Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu	$\kappa = 1,81$
Doba prvního přerušení proudu	$T_{k1} = 0,5 \text{ s}$
Vzdálenost mezi podpěrami (portály)	$l = 48 \text{ m}$
Délka vodiče, kterým prochází zkratový proud ($l_C = l - 2l_i$, kde l_i je délka izolátorového řetězce)	$l_C = 37,4 \text{ m}$ $l_i = 5,3 \text{ m}$
Osová vzdálenost mezi fázovými vodiči	$a = 5 \text{ m}$
Výsledná pérová konstanta koncových bodů vodiče	$S = 500 \text{ N/mm}$
Ocelohliníkový vodič AlFe 1045/45	
- Počet dílčích vodičů	$n = 2$
- Průřez dílčího vodiče	$A_S = 1\,090 \text{ mm}^2$
- Hmotnost dílčího vodiče na jednotku délky	$m'_S = 3,25 \text{ kg/m}$
- Modul pružnosti v tahu	$E = 60\,000 \text{ N/mm}^2$
- Průměr dílčího vodiče	$d_S = 43 \text{ mm}$
Statická tahová síla ve vodiči při teplotě $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ (místní minimální zimní teplota)	$F_{st,-20} = 23,1 \text{ kN}$
Statická tahová síla ve vodiči při teplotě $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (zvolená maximální teplota vodiče)	$F_{st,60} = 18,9 \text{ kN}$
Přídavná hmotnost reprezentující připojení pantografových odpojovačů	
- Počet	$n_C = 3$

- Hmotnost jednoho připojení	$m_c = 36 \text{ kg}$
- Vzdálenosti	$l_{s1} = 5,7 \text{ m}$ $l_{s2} = 10,0 \text{ m}$ $l_{s3} = 10,0 \text{ m}$ $l_{s4} = 11,7 \text{ m}$
Tíhové zrychlení	$g_n = 9,81 \text{ m/s}^2$

8.2 Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči, $a_s = 0,1 \text{ m}$

8.2.1 Elektromagnetické síly a charakteristické parametry

Elektromagnetická síla na jednotku délky je:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I'_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Am}} \times 0,75 \times \frac{(63 \cdot 10^3 \text{ A})^2}{5 \text{ m}} \times \frac{37,4 \text{ m}}{48 \text{ m}} = 92,8 \text{ N/m} \quad (19)$$

Parametr r je:

$$r = \frac{F'}{nm'_{sc}g_n} = \frac{92,8 \text{ N/m}}{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 1,009 \quad (20)$$

kde m'_{sc} je výsledná hmotnost na jednotku délky jednoho dílčího vodiče s respektováním přídavných hmotností připojených pantografových odpojovačů:

$$m'_{sc} = m'_s + \frac{n_c m_c}{nl_c} = 3,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}} + \frac{3 \times 36 \text{ kg}}{2 \times 37,4 \text{ m}} = 4,69 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Úhel výsledné síly je:

$$\delta_1 = \text{arctg } r = \text{arctg } 1,009 = 45,3^\circ \quad (21)$$

Ekvivalentní statické průhyby vodiče ve středu rozpětí jsou:

$$b_{c,-20} = \frac{n m'_{sc} g_n l^2}{8 F_{st,-20}} = \frac{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48^2 \text{ m}^2}{8 \times 23,1 \cdot 10^3 \text{ N}} = 1,15 \text{ m} \quad (22)$$

$$b_{c,60} = \frac{n m'_{sc} g_n l^2}{8 F_{st,60}} = \frac{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48^2 \text{ m}^2}{8 \times 18,9 \cdot 10^3 \text{ N}} = 1,40 \text{ m} \quad (22)$$

Doby kmitání vodiče jsou:

$$T_{-20} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-20}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{1,15 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 1,92 \text{ s} \quad (23)$$

$$T_{60} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,60}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{1,40 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 2,12 \text{ s} \quad (23)$$

Výsledné doby kmitání vodiče jsou:

$$T_{res,-20} = \frac{T_{-20}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{1,92 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+1,009^2} \times \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{45,3^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 1,68 \text{ s}$$

$$T_{res,60} = \frac{T_{60}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{2,12 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+1,009^2} \times \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{45,3^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 1,85 \text{ s}$$

Normované tuhosti jsou:

$$N_{-20} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,-20} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{5 \cdot 10^5 \text{ N/m} \times 48 \text{ m}} + \frac{1}{2 \times 3,17 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 1090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 5,61 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{N}}$$

kde

$$E_{s,-20} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,-20}}{n A_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 6 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{10,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 3,17 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

pro $\frac{F_{st,-20}}{n A_s}$ platí:

$$\frac{F_{st,-20}}{n A_s} = \frac{23,1 \cdot 10^3 \text{ N}}{2 \times 1090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 10,6 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ je menší než } \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$N_{60} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,60} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{5 \cdot 10^5 \text{ N/m} \times 48 \text{ m}} + \frac{1}{2 \times 2,93 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 1090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 5,73 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{N}}$$

kde

$$E_{s,60} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,60}}{n A_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 6 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{8,67 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 2,93 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

pro $\frac{F_{st,60}}{nA_S}$ platí:

$$\frac{F_{st,60}}{nA_S} = \frac{18,9 \cdot 10^3 \text{ N}}{2 \times 1090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 8,67 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ je menší než } \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Součinitelé napjatosti jsou:

$$\zeta_{-20} = \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{st,-20}^3 N_{-20}} = \frac{(2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48 \text{ m})^2}{24 \times (23,1 \cdot 10^3 \text{ N})^3 \times 5,61 \cdot 10^{-8} \text{ 1/N}} = 1,176 \quad (28)$$

$$\zeta_{60} = \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{st,60}^3 N_{60}} = \frac{(2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48 \text{ m})^2}{24 \times (18,9 \cdot 10^3 \text{ N})^3 \times 5,73 \cdot 10^{-8} \text{ 1/N}} = 2,101 \quad (28)$$

Úhly vychýlení rozpětí jsou:

$$\delta_{k,-20} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} \right) \right] = 45,3^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,5 \text{ s}}{1,68 \text{ s}} \right) \right] = 58,7^\circ \quad (29)$$

pro $\frac{T_{k1}}{T_{res,-20}}$ platí:

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} = \frac{0,5 \text{ s}}{1,68 \text{ s}} = 0,30 \text{ je menší než } 0,5$$

$$\delta_{k,60} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,60}} \right) \right] = 45,3^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,5 \text{ s}}{1,85 \text{ s}} \right) \right] = 51,1^\circ \quad (29)$$

pro $\frac{T_{k1}}{T_{res,60}}$ platí:

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,60}} = \frac{0,5 \text{ s}}{1,85 \text{ s}} = 0,27 \text{ je menší než } 0,5$$

Maximální úhel vychýlení $\delta_{m,-20}$ a $\delta_{m,60}$ závisí na χ_{-20} a χ_{60} , které dále závisí na $\delta_{k,-20}$ a $\delta_{k,60}$.

Pro 0 menší než $\delta_{k,-20} = 58,7^\circ$ menší než 90° je:

$$\chi_{-20} = 1 - r \sin \delta_{k,-20} = 1 - 1,009 \times \sin 58,7^\circ = 0,138 \quad (30)$$

a pro $-0,985$ menší než $\chi_{-20} = 0,138$ menší než $0,766$ je:

$$\delta_{m,-20} = 10^\circ + \arccos \chi_{-20} = 10^\circ + \arccos 0,138 = 92,1^\circ \quad (31)$$

Pro 0 menší než $\delta_{k,60} = 51,1^\circ$ menší než 90° je:

$$\chi_{60} = 1 - r \sin \delta_{k,60} = 1 - 1,009 \times \sin 51,1^\circ = 0,215 \quad (30)$$

a pro $-0,985$ menší než $\chi_{60} = 0,215$ menší než $0,766$ je:

$$\delta_{m,60} = 10^\circ + \arccos \chi_{60} = 10^\circ + \arccos 0,215 = 87,6^\circ \quad (31)$$

8.2.2 Tahová síla F_t při zkratu

Při zkratu dojde k účinnému sevření dílčích vodičů svazku protože:

$$a_s = 0,1 \text{ m je menší než } 2,5 \cdot d_s = 2,5 \times 0,043 \text{ m} = 0,1075 \text{ m} \quad (44)$$

a $l_s = 9,4 \text{ m}$ je větší než $70 \cdot a_s = 70 \times 0,1 \text{ m} = 7 \text{ m}$

s

$$l_s = \frac{l_{s1} + l_{s2} + l_{s3} + l_{s4}}{4} = \frac{5,7 + 10 + 10 + 11,7}{4} \text{ m} = 9,4 \text{ m}$$

Potom kontrakční síla F_{pi} může být zanedbána v porovnání s tahovou silou F_t vypočítanou podle IEC 865-1, 2.3.3.

Parametry zatížení jsou:

$$\varphi_{60} = \varphi_{-20} = 3(\sqrt{1+r^2} - 1) = 3 \times (\sqrt{1+1,009^2} - 1) = 1,26 \quad (32)$$

protože $T_{k1} = 0,5$ s je větší než $\frac{T_{res,-20}}{4} = \frac{1,68 \text{ s}}{4} = 0,42$ s

a $T_{k1} = 0,5$ s je větší než $\frac{T_{res,60}}{4} = \frac{1,85 \text{ s}}{4} = 0,46$ s

Podle obrázku 7 IEC 865-1, součinitelé Ψ_{-20} a Ψ_{60} jsou:

- pro $\varphi_{-20} = 1,26$ a $\zeta_{-20} = 1,176$:

$$\Psi_{-20} = 0,6$$

- pro $\varphi_{60} = 1,26$ a $\zeta_{60} = 2,101$:

$$\Psi_{60} = 0,71$$

Tahové síly při zkratu pro $n = 2$ jsou:

$$\begin{aligned} F_{t,-20} &= 1,1 \cdot F_{st,-20} (1 + \varphi_{-20} \Psi_{-20}) \\ &= 1,1 \times 23,1 \text{ kN} \times (1 + 1,26 \times 0,6) = 44,6 \text{ kN} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} F_{t,60} &= 1,1 \cdot F_{st,60} (1 + \varphi_{60} \Psi_{60}) \\ &= 1,1 \times 18,9 \text{ kN} \times (1 + 1,26 \times 0,71) = 39,4 \text{ kN} \end{aligned} \quad (34)$$

Tahová síla F_t je maximální hodnota z $F_{t,-20}$ a $F_{t,60}$:

$$F_t = \max \{F_{t,-20}, F_{t,60}\} = \max \{44,6 \text{ kN}, 39,4 \text{ kN}\} = 44,6 \text{ kN}$$

8.2.3 Tahová síla F_f po zkratu

Protože $r = 1,009$ a je větší než $0,6$ a $\delta_{m,-20} = 92,1^\circ$ nebo

$\delta_{m,60} = 87,6^\circ$ jsou větší než 70° je tahová síla po zkratu F_f významná.

$$\begin{aligned} F_{f,-20} &= 1,2 F_{st,-20} \sqrt{1 + 8 \zeta_{-20} \cdot \frac{\delta_{m,-20}}{180^\circ}} \\ &= 1,2 \times 23,1 \text{ kN} \sqrt{1 + 8 \times 1,176 \times \frac{92,1^\circ}{180^\circ}} = 66,8 \text{ kN} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
 F_{f,60} &= 1,2 F_{st,60} \sqrt{1 + 8 \zeta_{60} \cdot \frac{\delta_{m,60}}{180^\circ}} & (35) \\
 &= 1,2 \times 18,9 \text{ kN} \sqrt{1 + 8 \times 2,101 \times \frac{87,6^\circ}{180^\circ}} = 68,7 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tahová síla F_f je maximální hodnota z $F_{f,-20}$ a $F_{f,60}$:

$$F_f = \max \{F_{f,-20}, F_{f,60}\} = \max \{66,8 \text{ kN}, 68,7 \text{ kN}\} = 68,7 \text{ kN}$$

8.2.4 Horizontální výchylka b_h a minimální vzdušná vzdálenost a_{min}

Všechny následující hodnoty jsou vypočítány pro vodiče při teplotě 60 °C, které vedou ke větším výchylkám než pro vodiče při teplotě -20 °C.

Poměrné pružné prodloužení je:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{ela} &= (F_{t,60} - F_{st,60}) N_{60} & (36) \\
 &= (39,4 - 18,9) \cdot 10^3 \text{ N} \times 5,73 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{N}} = 1,18 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Poměrné tepelné prodloužení je:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{th} &= c_{th} \left(\frac{I_{k3}''}{n A_s} \right)^2 \frac{T_{res,60}}{4} & (37) \\
 &= 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2 \text{s}} \times \left(\frac{63 \cdot 10^3 \text{ A}}{2 \times 1090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \right)^2 \times \frac{1,85 \text{ s}}{4} = 1,04 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

protože

$$T_{k1} = 0,5 \text{ s je větší než } \frac{T_{res,60}}{4} = \frac{1,85 \text{ s}}{4} = 0,46 \text{ s}$$

a přičemž c_{th} se rovná pro poměr $\frac{A_{Al}}{A_{St}} = \frac{1\,045\text{ mm}^2}{45\text{ mm}^2} = 23,2$ a to je větší

než 6 a pak platí hodnota $c_{th} = 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}$

Součinitel C_D je:

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c,60}}\right)^2 (\epsilon_{ela} + \epsilon_{th})} \quad (38)$$

$$= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \times \left(\frac{48}{1,40}\right)^2 \times (1,18 \cdot 10^{-3} + 1,04 \cdot 10^{-4})} = 1,25$$

Součinitel C_F pro 0,8 je menší než $r = 1,009$ je menší než 1,8:

$$C_F = 0,97 + 0,1 \cdot r = 0,97 + 0,1 \times 1,009 = 1,07 \quad (39)$$

Maximální horizontální výchylka b_h pro délku rozpětí přesahující 20 m a pro $\delta_{m,60} = 87,6^\circ$ větší než $\delta_1 = 45,3^\circ$ je pro vodiče s izolačními závěsy $l_c = l - 2l_i$:

$$b_h = C_F C_D b_{c,60} \sin \delta_1 = 1,07 \times 1,25 \times 1,40\text{ m} \times \sin 45,3^\circ = 1,33\text{ m} \quad (41)$$

Minimální vzdušná vzdálenost mezi osami svazku dvou sousedních fází je:

$$a_{\min} = a - 2b_h = 5\text{ m} - 2 \times 1,33\text{ m} = 2,34\text{ m} \quad (42)$$

8.2.5 Vyhodnocení

Pro konstrukce, izolátory a spojení se musí počítat s maximální hodnotou z F_t , F_f jako statickým zatížením:

$$\max \{F_t, F_f\} = \max \{44,6\text{ kN}, 68,7\text{ kN}\} = 68,7\text{ kN}$$

Horizontální výchylka je 1,33 m a minimální vzdušná vzdálenost je 2,34 m.

8.3 Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči, $a_S = 0,4 \text{ m}$

8.3.1 Úvodní poznámky

V tomto případě

$$\frac{a_S}{d_S} = \frac{0,400 \text{ m}}{0,043 \text{ m}} = 9,3$$

a ani rovnice (43) ani rovnice (44) IEC 865-1 nejsou splněny. Z toho důvodu se musí kontrakční síla F_{pi} vypočítat. Výsledky výpočtů ostatních parametrů jsou stejné jako v 8.2.3, 8.2.4 a 8.2.5:

Tahová síla při zkratu	$F_t = 44,6 \text{ kN}$
Tahová síla po zkratu	$F_f = 68,7 \text{ kN}$
Minimální horizontální výchylka	$b_h = 1,33 \text{ m}$
Minimální vzdušná vzdálenost	$a_{min} = 2,34 \text{ m}$

8.3.2 Kontrakční síla F_{pi}

Součinitel v_1 je:

$$v_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d_s) m'_s}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n}\right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} \quad (46)$$

$$= 50 \frac{1}{s} \times \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{2}} \times \sqrt{\frac{(0,400 \text{ m} - 0,043 \text{ m}) \times 3,25 \text{ kg/m}}{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{Vs}{Am} \times \left(\frac{63 \cdot 10^3 \text{ A}}{2}\right)^2 \times \frac{(2-1)}{0,400 \text{ m}}}} = 2,42$$

Podle obrázku 8 IEC 865-1, je součinitel v_2 pro $v_1 = 2,42$ a $\kappa = 1,81$:
 $v_2 = 2,2$

Podle obrázku 9 IEC 865-1, je součinitel v_3 pro $a_S/d_S = 9,3$:
 $v_3 = 0,25$

Zkratová síla je:

$$F_v = (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_{k3}''}{n} \right)^2 \frac{l_s v_2}{a_s v_3} \quad (45)$$

$$= 1 \times \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times \left(\frac{63 \cdot 10^3 \text{ A}}{2} \right)^2 \times \frac{9,4 \text{ m} \times 2,2}{0,4 \text{ m} \times 0,25} = 41,0 \cdot 10^3 \text{ N} = 41,0 \text{ kN}$$

Součinitelé napjatosti jsou:

$$\varepsilon_{st,-20} = 1,5 \cdot \frac{F_{st,-20} l_s^2}{(a_s - d_s)^2} N_{-20} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (47)$$

$$= 1,5 \times \frac{23,1 \cdot 10^3 \text{ N} \times (9,4 \text{ m})^2}{(0,400 \text{ m} - 0,043 \text{ m})^2} \times 5,61 \cdot 10^{-8} \text{ N}^{-1} \times \left(\sin \frac{180^\circ}{2} \right)^2$$

$$= 1,35$$

$$\varepsilon_{st,60} = 1,5 \cdot \frac{F_{st,60} l_s^2}{(a_s - d_s)^2} N_{60} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (47)$$

$$= 1,5 \times \frac{18,9 \cdot 10^3 \text{ N} \times (9,4 \text{ m})^2}{(0,400 \text{ m} - 0,043 \text{ m})^2} \times 5,73 \cdot 10^{-8} \text{ N}^{-1} \times \left(\sin \frac{180^\circ}{2} \right)^2$$

$$= 1,13$$

$$\varepsilon_{pi,-20} = 0,375 \cdot n \frac{F_v l_s^3}{(a_s - d_s)^3} N_{-20} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (48)$$

$$= 0,375 \times 2 \times \frac{41,0 \cdot 10^3 \text{ N} \times (9,4 \text{ m})^3}{(0,400 \text{ m} - 0,043 \text{ m})^3} \times 5,61 \cdot 10^{-8} \text{ N}^{-1} \times \left(\sin \frac{180^\circ}{2} \right)^3$$

$$= 31,5$$

$$\varepsilon_{pi,60} = 0,375 \cdot n \frac{F_v l_s^3}{(a_s - d_s)^3} N_{60} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (48)$$

$$= 0,375 \times 2 \times \frac{41,0 \cdot 10^3 \text{ N} \times (9,4 \text{ m})^3}{(0,400 \text{ m} - 0,043 \text{ m})^3} \times 5,73 \cdot 10^{-8} \text{ N}^{-1} \times \left(\sin \frac{180^\circ}{2} \right)^3$$

$$= 32,2$$

Parametry j_{-20} a j_{60} jsou:

$$j_{-20} = \sqrt{\frac{\epsilon_{pi,-20}}{1 + \epsilon_{st,-20}}} = \sqrt{\frac{31,5}{1 + 1,35}} = 3,66 \quad (49)$$

$$j_{60} = \sqrt{\frac{\epsilon_{pi,60}}{1 + \epsilon_{st,60}}} = \sqrt{\frac{32,2}{1 + 1,13}} = 3,89 \quad (49)$$

Protože j_{-20} a j_{60} jsou větší než 1, dílčí vodiče jsou sevřeny a $F_{pi,-20}$ a $F_{pi,60}$ jsou:

$$F_{pi,-20} = F_{st,-20} \left(1 + \frac{v_{c,-20}}{\epsilon_{st,-20}} \xi_{-20} \right) \quad (50)$$

$$F_{pi,60} = F_{st,60} \left(1 + \frac{v_{c,60}}{\epsilon_{st,60}} \xi_{60} \right) \quad (51)$$

Podle IEC 865-1, obrázek 10

- s $j_{-20} = 3,66$ a $\epsilon_{st,-20} = 1,35$, součinitel ξ_{-20} je:
 $\xi_{-20} = 2,77$

- s $j_{60} = 3,89$ a $\epsilon_{st,60} = 1,13$, součinitel ξ_{60} je:
 $\xi_{60} = 2,85$

Součinitel v_4 je:

$$v_4 = \frac{a_s - d_s}{d_s} = \frac{0,400 \text{ m} - 0,043 \text{ m}}{0,043 \text{ m}} = 8,3$$

Součinitelé $v_{e,-20}$ a $v_{e,60}$ jsou:

$$v_{e,-20} = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} N_{-20} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi_{-20}^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctg \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (52)$$

$$= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \times 2 \times (2-1) \times \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times 5,61 \cdot 10^{-8} \frac{1}{N} \times \left(\frac{63 \cdot 10^3 \text{ A}}{2} \right)^2 \times 2,2 \times \left(\frac{9,4 \text{ m}}{0,400 \text{ m} - 0,043 \text{ m}} \right)^4 \times \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{2} \right)^4}{2,77^3} \times \left(1 - \frac{\arctg \sqrt{8,3}}{\sqrt{8,3}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{1/2}$$

$$= 1,18$$

$$\begin{aligned}
v_{e,60} &= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} N_{60} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi_{60}^3} \right. \\
&\quad \left. \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (52) \\
&= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \times 2 \times (2-1) \times \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times 5,73 \cdot 10^{-8} \frac{1}{N} \right. \\
&\quad \times \left(\frac{63 \cdot 10^3 \text{ A}}{2} \right)^2 \times 2,2 \times \left(\frac{9,4 \text{ m}}{0,400 \text{ m} - 0,043 \text{ m}} \right)^4 \times \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{2} \right)^4}{2,85^3} \\
&\quad \left. \times \left(1 - \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{8,3}}{\sqrt{8,3}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= 1,15
\end{aligned}$$

$$F_{pi,-20} = F_{st,-20} \left(1 + \frac{v_{e,-20}}{\varepsilon_{st,-20}} \xi_{-20} \right) = 23,1 \text{ kN} \times \left(1 + \frac{1,18}{1,35} \times 2,77 \right) = 79,0 \text{ kN} \quad (50)$$

$$F_{pi,60} = F_{st,60} \left(1 + \frac{v_{e,60}}{\varepsilon_{st,60}} \xi_{60} \right) = 18,9 \text{ kN} \times \left(1 + \frac{1,15}{1,13} \times 2,85 \right) = 73,7 \text{ kN} \quad (51)$$

Kontrakční síla F_{pi} je maximální hodnota z $F_{pi,-20}$ a $F_{pi,60}$:

$$F_{pi} = \max \{ F_{pi,-20}, F_{pi,60} \} = \max \{ 79,0 \text{ kN}, 73,7 \text{ kN} \} = 79,0 \text{ kN}$$

8.4 Vyhodnocení

Pro konstrukce, izolátory a spojovací armatury se musí počítat s maximální hodnotou z F_t , F_f a F_{pi} jako statickým zatížením:

$$\max \{ F_t, F_f, F_{pi} \} = \max \{ 44,6 \text{ kN}, 68,7 \text{ kN}, 79,0 \text{ kN} \} = 79,0 \text{ kN}$$

Horizontální výchylka je 1,33 m a minimální vzdušná vzdálenost je 2,34 m.

Ostatní hodnoty sil a výchylek jsou shodné s výpočtem podle 8.2.

9 Příklad 6 - Tepelné účinky na holé vodiče

Výpočet je proveden pro trojfázové 10 kV přípojnice s jedním vodičem na fázi.

9.1 Vstupní údaje

Počáteční rázový zkratový proud
(efektivní hodnota) $I''_{k3} = 24,0 \text{ kA}$

Trojfázový ustálený zkratový proud
(efektivní hodnota) $I_{k3} = 19,2 \text{ kA}$

Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu $\kappa = 1,8$

Doba trvání zkratového proudu $T_k = 0,8 \text{ s}$

Kmitočet sítě $f = 50 \text{ Hz}$

Obdélníkový vodič z Al-Mg-Si slitiny s průřezem $A = 600 \text{ mm}^2$

Počáteční teplota vodiče před zkratem $\theta_b = 65 \text{ }^\circ\text{C}$

Teplota vodiče po zkratu $\theta_e = 170 \text{ }^\circ\text{C}$

9.2 Výpočty

Pro $\theta_b = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ a $\theta_e = 170 \text{ }^\circ\text{C}$, je S_{thr} podle IEC 865-1, obrázek 13 b):

$$S_{thr} = 80 \text{ A/mm}^2$$

Ekvivalentní oteplovací proud je:

$$I_{th} = I''_{k3} \sqrt{m+n} = 24,0 \text{ kA} \times \sqrt{0,05 + 0,85} = 22,8 \text{ kA} \quad (63)$$

kde součinitelé m a n jsou určeny z obrázků 12 a) a 12 b) IEC 865-1 pro $fT_k = 50 \text{ 1/s} \times 0,8 \text{ s} = 40$, $\kappa = 1,8$ a $I_{k3}/I_{k3} = 24,0 \text{ kA}/19,2 \text{ kA} = 1,25$.

Pro průřez vodiče $A = 600 \text{ mm}^2$:

$$s_{th} = \frac{I_{th}}{A} = \frac{22,8 \cdot 10^3 \text{ A}}{600 \text{ mm}^2} = 38,0 \text{ A/mm}^2$$

Přípojnice jsou odolné vůči tepelnému namáhání zkratovým proudem, jestliže platí, že:

$$s_{th} = 38,0 \text{ A/mm}^2 \text{ je menší než } s_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} = 80 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \times \sqrt{\frac{1 \text{ s}}{0,8 \text{ s}}} = 89,4 \text{ A/mm}^2 \quad (67)$$

9.3 Vyhodnocení

Přípojnice vyhovují tepelnému namáhání při průchodu zkratového proudu.