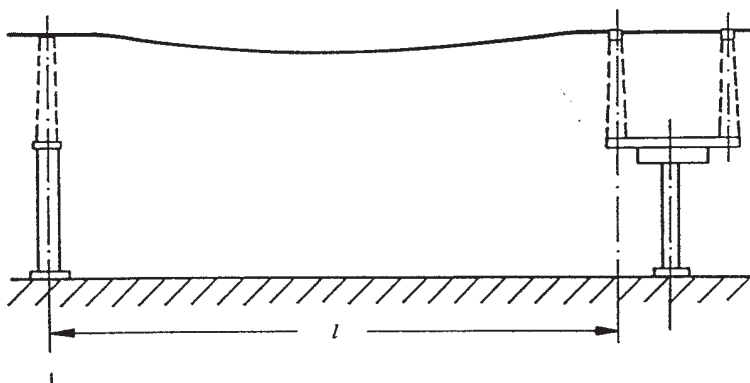


10. Veza između dva elementa postrojenja 110kV sa potpornim izolatorima na nosačima izvedena je užadima Al/Fe 240/40mm² (slika 2). Odrediti sile koje djeluju na ove potporne izolatore. Potrebni podaci za proračun su sljedeći:

Oznaka	Naziv	Vrijednost
$\sigma_{nd,-20^{\circ}C}$	statičko naprezanje užeta pri temperaturi -20 °C	1.428 N/mm ²
$\sigma_{nd,60^{\circ}C}$	statičko naprezanje užeta pri temperaturi 60 °C	0.975 N/mm ²
I_k''	Efektivna vrijednost naizmjenične komponente struje KS u subtranzijentnom periodu	19 kA
a	Razmak između centara provodnika	2 m
l	Rastojanje između nosača	8 m
T_k	Vrijeme trajanja kratkog spoja	0.5 s
m'	Masa provodnika po jedinici dužine	0.985 kg/m
E	Jungov moduo elastičnosti	$75 \cdot 10^9$ N/m ²



Slika 2. Veza između dva elementa u postrojenju ostvarena Al/Fe užetom

Rješenje:

Za vrijeme trajanja i nakon završetka kratkog spoja na provodnike od Al/Fe užadi (bez provodnika u snopu) djeluju dvije vrste sile:

- sila zatezanja provodnika u smjeru otklona provodnika F_t
- sila usljed pada provodnika nakon kratkog spoja F_f

Kao mjerodavna sila za nosače sa potpornim izolatorima bira se veća sila od vrijednosti $1.5 \cdot F_t$ i F_f tj.

$$F = \max\{1.5 \cdot F_t, F_f\}$$

Postupak proračuna ide sljedećim tokom:

→ **Sila po jedinici dužine užastog provodnika** računa se po relaciji:

$$F' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot 0.75 \cdot \frac{I_k''^2}{a} \cdot \frac{l_c}{l}$$

gdje je:

I_k'' - efektivna vrijednost naizmjenične komponente ukupne struje KS u subtranzijentnom periodu;

a - razmak između centara provodnika;
 $lc = l$ – za nosače sa potpornim izolatorima

Zamjenom brojnih podataka dobija se:

$$F' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot 0.75 \cdot \frac{I_k^2}{a} \cdot \frac{l_c}{l} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot 0.75 \cdot \frac{(19000)^2}{2} = 27.075 \text{ N/m}$$

Važan parametar za dalji proračun sila na nosače je odnos elektromagnetne sile u uslovima kratkog spoja i gravitacione sile na provodnik dat kao:

$$r = \frac{F'}{m' \cdot g}$$

gdje je:

g – ubrzanje Zemljine teže

m' – masa provodnika po jedinici dužine

Zamjenom brojnih podataka dobija se:

$$r = \frac{F'}{m' \cdot g} = \frac{27.075}{0.985 \cdot 9.81} = 2.802$$

- Pravac rezultujuće sile na provodnik određen je uglom:

$$\delta_1 = \arctg(r) = \arctg(2.802) = 70.4^\circ$$

- Ekvivalentni statički ugib provodnika u sredini raspona je:

$$b_c = \frac{m' \cdot g \cdot l^2}{8 \cdot F_{st}}$$

gdje je:

F_{st} – statička sila zatezanja provodnika

Odavde proračun treba sprovesti za dvije sile zatezanja, i to pri temperaturi -20°C i pri temperaturi 60°C . Pošto su data statička naprezanja provodnika pri ovim temperaturama ima se:

$$F_{st,-20^\circ\text{C}} = \sigma_{st,-20^\circ\text{C}} \cdot A_s = 1.428 \cdot (240 + 40) = 400 \text{ N}$$

$$F_{st,60^\circ\text{C}} = \sigma_{st,60^\circ\text{C}} \cdot A_s = 0.975 \cdot (240 + 40) = 273 \text{ N}$$

gdje je:

A_s – ukupni presjek užeta Al/Fe $240/40\text{mm}^2$

Sada se dobija:

$$b_{c,-20^\circ} = \frac{m' \cdot g \cdot l^2}{8 \cdot F_{st}} = \frac{0.985 \cdot 9.81 \cdot 8^2}{8 \cdot 400} = 0.1933\text{m}$$

$$b_{c,60^\circ} = \frac{m' \cdot g \cdot l^2}{8 \cdot F_{st}} = \frac{0.985 \cdot 9.81 \cdot 8^2}{8 \cdot 273} = 0.2832\text{m}$$

- Period oscilacija provodnika T je:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0.8 \cdot \frac{b_c}{g}}$$

Zamjenom brojnih podataka se dobija:

$$T_{-20^\circ} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0.8 \cdot \frac{b_{c,-20^\circ}}{g}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0.8 \cdot \frac{0.1933}{9.81}} = 0.7889\text{s}$$

$$T_{60^\circ} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0.8 \cdot \frac{b_{c,-20^\circ}}{g}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0.8 \cdot \frac{0.2832}{9.81}} = 0.9549\text{s}$$

- Rezultujući period oscilacije provodnika T_{res} tokom proticanja struje kratkog spoja je dat kao:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_1}{90^\circ}\right)^2\right]} \text{ [s]}$$

Zamjenom brojnih podataka dobija se:

$$T_{res,-20^\circ} = \frac{T_{-20^\circ}}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_1}{90^\circ}\right)^2\right]} = \frac{0.7889}{\sqrt[4]{1+2.802^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{70.4^\circ}{90^\circ}\right)^2\right]} = 0.52\text{s}$$

$$T_{res,60^\circ} = \frac{T_{60^\circ}}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_1}{90^\circ}\right)^2\right]} = \frac{0.9549}{\sqrt[4]{1+2.802^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{70.4^\circ}{90^\circ}\right)^2\right]} = 0.63\text{s}$$

- Norma krutosti je data formulom:

$$N = \frac{1}{S \cdot l} + \frac{1}{E_s \cdot A_s}$$

gdje je:

A_s – poprečni presjek provodnika

S – rezultatna opružna konstanta za oba nosača u rasponu:

– za provodnike koji ispoljavaju silu na potpornim izolatorima koji se nalaze na nosačima $S=100 \cdot 10^3 \text{ N/m}$

– Za provodnike na izolatorskim lancima:

$S=150 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ do $1.300 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ za nazivni napon 110 kV;

$S=400 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ do $2.000 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ za nazivni napon 220 kV;

$S=600 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ do $3.000 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ za nazivni napon 400 kV.

U zadatku su u pitanju provodnici postavljeni na potpornim izolatorima pa se uzima $S=100 \cdot 10^3 \text{ N/m}$.

E_s – stvarni Jungov moduo elastičnosti koji se računa prema relaciji:

$$E_s = \begin{cases} E \cdot \left[0.3 + 0.7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st}}{A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] & \text{za } \frac{F_{st}}{A_s} \leq \delta_{fin} \\ E & \text{za } \frac{F_{st}}{A_s} > \delta_{fin} \end{cases}$$

gdje je: $\delta_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Zamjenom brojnih podataka ima se:

- za temperaturu -20°C :

$$\frac{F_{st,-20^\circ}}{A_s} = \frac{400\text{N}}{(240+40) \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 1.4286 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \leq \delta_{fin}$$

$$\frac{F_{st,60^\circ}}{A_s} = \frac{273\text{N}}{(240+40) \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 0.975 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \leq \delta_{fin}$$

Sada je:

$$\begin{aligned} E_{s,-20^\circ} &= E \cdot \left[0.3 + 0.7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,-20^\circ}}{A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] = \\ &= 75 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \left[0.3 + 0.7 \cdot \sin \left(\frac{400\text{N}}{280 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \cdot 90^\circ \right) \right] = 2.4855 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{s,60^\circ} &= E \cdot \left[0.3 + 0.7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,60^\circ}}{A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] = \\ &= 75 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \left[0.3 + 0.7 \cdot \sin \left(\frac{273}{280 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \cdot 90^\circ \right) \right] = 2.412 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Zamjenom u normu krutosti dobija se:

$$N_{-20^\circ} = \frac{1}{S \cdot l} + \frac{1}{E_{s,-20^\circ} \cdot A_s} = \frac{1}{100 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 8\text{m}} + \frac{1}{2.4855 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 280 \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 1.3937 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}}$$

$$N_{60^\circ} = \frac{1}{S \cdot l} + \frac{1}{E_{s,60^\circ} \cdot A_s} = \frac{1}{100 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 8\text{m}} + \frac{1}{2.412 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 280 \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 1.3981 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}}$$

- Faktor naprezanja provodnika ξ je dat relacijom:

$$\xi = \frac{(g \cdot m \cdot l)^2}{24 \cdot F_{st}^3 \cdot N}$$

Zamjenom brojnih podataka dobija se:

$$\xi_{-20^\circ} = \frac{(g \cdot m \cdot l)^2}{24 \cdot F_{st,-20^\circ}^3 \cdot N_{-20^\circ}} = \frac{(9.81 \cdot 0.985 \cdot 8)^2}{24 \cdot 400^3 \cdot 1.3937 \cdot 10^{-6}} = 2.7915$$

$$\xi_{60^\circ} = \frac{(g \cdot m \cdot l)^2}{24 \cdot F_{st,60^\circ}^3 \cdot N_{60^\circ}} = \frac{(9.81 \cdot 0.985 \cdot 8)^2}{24 \cdot 273^3 \cdot 1.3981 \cdot 10^{-6}} = 8.7529$$

- Tokom ili na kraju djelovanja struje kratkog spoja provodnici u rasponu će oscilovati u odnosu na početni položaj za ugao:

$$\delta_k = \begin{cases} \delta_1 \cdot \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{kl}}{T_{res}} \right) \right] & \text{za } 0 \leq \frac{T_{kl}}{T_{res}} \leq 0.5 \\ 2 \cdot \delta_1 & \text{za } \frac{T_{kl}}{T_{res}} > 0.5 \end{cases}$$

U zadatku je:

$$\frac{T_{kl}}{T_{res,-20^\circ}} = \frac{0.5}{0.52} = 0.9615 > 0.5$$

$$\frac{T_{kl}}{T_{res,60^\circ}} = \frac{0.5}{0.63} = 0.7937 > 0.5$$

Zamjenom brojnih podataka ima se:

$$\delta_{k,-20^\circ} = \delta_{k,60^\circ} = 2 \cdot \delta_1 = 2 \cdot 70.4^\circ = 140.8^\circ$$

- Maksimalni ugao otklona provodnika δ_m u rasponu u odnosu na početni položaj tokom ili nakon djelovanja struje kratkog spoja se računa na sledeći način:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \cdot \sin(\delta_k) & \text{za } 0 \leq \delta_k \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{za } \delta_k > 90^\circ \end{cases}$$

Zamjenom brojnih podataka ima se:

$$\chi_{-20^\circ} = \chi_{60^\circ} = 1 - r = 1 - 2.802 = -1.802$$

Sada je δ_m :

$$\delta_m = \begin{cases} 1.25 \cdot \arccos(\chi) & \text{za } 0.766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos(\chi) & \text{za } -0.985 \leq \chi < 0.766 \\ 180^\circ & \text{za } \chi < -0.985 \end{cases}$$

Zamjenom brojnih podataka dobija se:

$$\delta_{m,-20^\circ} = \delta_{m,60^\circ} = 180^\circ$$

Sada se računaju potrebne sile na sljedeći način:

- **Proračun sile zatezanja F_t usljed otklona provodnika:**

Za proračun ove sile računa se prvo parametar:

$$\varphi = \begin{cases} 3 \cdot (\sqrt{1+r^2} - 1) & \text{za } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ 3 \cdot (r \cdot \sin\delta_k + \cos\delta_k - 1) & \text{za } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases}$$

Odnos:

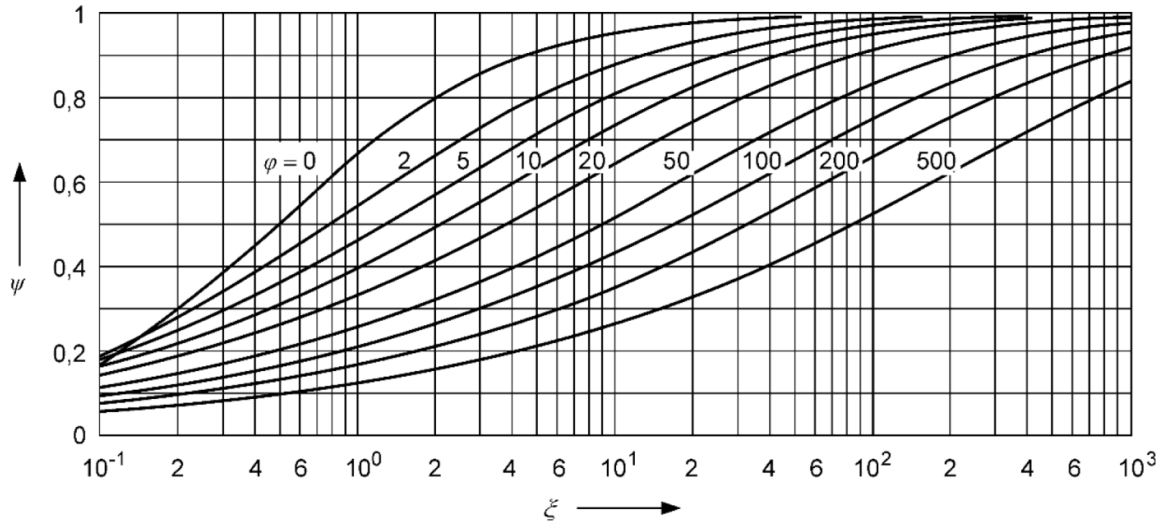
$$T_{k1} = 0.5 \geq \frac{T_{res,-20^\circ}}{4} = \frac{0.52}{4} = 0.13$$

$$T_{k1} = 0.5 \geq \frac{T_{res,60^\circ}}{4} = \frac{0.63}{4} = 0.1575$$

odakle se dobija:

$$\varphi_{-20^\circ} = \varphi_{60^\circ} = 3 \cdot (\sqrt{1+r^2} - 1) = 3 \cdot (\sqrt{1+2.802^2} - 1) = 5.9253$$

Faktor ψ koji je potreban za proračun sile zatezanja usljed otklona provodnika dobija se sa grafika na slici kao funkcija parametara φ i ξ . U našem slučaju se dobija:



$$\psi_{-20^\circ} = \psi(\varphi_{-20^\circ}, \xi_{-20^\circ}) = \psi(5.9253, 2.7915) = 0.6$$

$$\psi_{60^\circ} = \psi(\varphi_{60^\circ}, \xi_{60^\circ}) = \psi(5.9253, 8.7529) = 0.75$$

- Sada se sila zatezanja usljed otklona provodnika F_t može izračunati po relaciji:

$$F_t = F_{st} \cdot (1 + \varphi \cdot \psi)$$

Zamjenom brojnih podataka dobija se:

$$F_{t,-20^\circ} = F_{st,-20^\circ} \cdot (1 + \varphi_{-20^\circ} \cdot \psi_{-20^\circ}) = 400 \cdot (1 + 5.9253 \cdot 0.6) = 1822.1N$$

$$F_{t,60^\circ} = F_{st,60^\circ} \cdot (1 + \varphi_{60^\circ} \cdot \psi_{60^\circ}) = 273 \cdot (1 + 5.9253 \cdot 0.75) = 1486.2N$$

Veća od ovih sila uzima se kao mjerodavna za silu zatezanja usljed otklona provodnika, tj.

$$F_t = 1822.1N$$

- Proračun sile usljed pada provodnika nakon kratkog spoja F_f :**
- Poslije kratkog spoja provodnik osciluje ili pada iz maksimalnog otklona prema zemlji. Ova sila se razmatra u samo u slučaju kad je $r > 0.6$ ako je $\delta_m > 70^\circ$. U ovom slučaju ova sila se računa po relaciji:

$$F_f = 1.2 \cdot F_{st} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \xi \cdot \frac{\delta_m}{180^\circ}}$$

U našem slučaju je $r=2.802$ i ugao $\delta_{m,-20^\circ} = \delta_{m,60^\circ} = 180^\circ$ što znači da je potrebno izračunati ovu silu:

$$F_{f,-20^\circ} = 1.2 \cdot F_{st,-20^\circ} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \xi_{-20^\circ} \cdot \frac{\delta_{m,-20^\circ}}{180^\circ}} = 1.2 \cdot 400 \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot 2.7915 \cdot \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 2318.6N$$

$$F_{f,60^\circ} = 1.2 \cdot F_{st,60^\circ} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \xi_{60^\circ} \cdot \frac{\delta_{m,60^\circ}}{180^\circ}} = 1.2 \cdot 273 \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot 8.7529 \cdot \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 2760.9N$$

Veća od ovih sila uzima se kao mjerodavna za silu usljed pada provodnika nakon kratkog spoja, tj.

$$F_f = 2760.9\text{N}$$

Konačno, kao mjerodavna sila za nosače sa potpornim izolatorima bira se veća sila od vrijednosti $1.5 \cdot F_t$ i F_f tj.

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \max\{1.5 \cdot F_t, F_f\} = \max\{1.5 \cdot 1822.1, 2760.9\} = \\ &= \max\{2733.1, 2760.9\} = \mathbf{2760.9\text{N}} \end{aligned}$$