

Příloha č.1

Výpočet poměru a dimenzování při zkratech na TNS Rudoltice

1. ÚVOD

Výpočet je zpracován pro zkratový obvod elektricky vzdálený. Při elektricky vzdáleném zkratu se uvažuje velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu konstantní.

ČSN EN 60909, která obsahuje znění HD 533 S1:1991, který modifikuje IEC 909:1988, oddíl první, kapitola 8 uvažuje při výpočtu trojfázový zkratový proud jako zpravidla největší a počítá pouze se souslednou zkratovou impedancí $Z(1) = Z_k$, jak je viděna z místa zkratu. Dále byla použita ČSN EN 60909, která uvádí některé postupy výpočtu obdobné IEC 909, ČSN 38 1754 a normy související.

Zkratový proud v místě zkratu se určuje pomocí ekvivalentního napěťového zdroje. Napětí tohoto ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě je dáno vztahem

Kde: $U_v = c \cdot U_n / \sqrt{3}$

U_n jmenovité síťové napětí

c napěťový součinitel, který je různý pro výpočet maximálního a minimálního zkratového proudu viz ČSN EN 60909-0 tabulka I

Dle ČSN EN 60909-0, kapitola 2, se určuje:

- maximální zkratový proud, který určuje zkratovou odolnost nebo jmenovité hodnoty elektrického zařízení
- minimální zkratový proud, který je základem (dle oddílu 4.1 může být) např. pro volbu pojistek, nastavení ochran a pro kontrolu rozběhu motorů s přihlédnutím k OEG 38 4065.

2. VÝPOČET DIMENZOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ

Dle ČSN EN 60909, oddíl 4, se pro dimenzování elektrického zařízení a nastavení ochran určuje:

- Počáteční rázový zkratový proud (oddíl 4.2) $I_{k''}$ [kA] (efektivní h.stř.souměrné sl.)
- Nárazový zkratový proud (oddíl 4.3) i_p [kA] (max.možná okamžitá h.)
- Vypínací zkratový proud (oddíl 4.5) i_b [kA] (efektivní h.souměrné sl.)
- Ekvivalentní oteplovací proud (oddíl 4.8) I_{th} [kA] (efektivní h.fiktivního pr.sin.průb.)
- Ustálený zkratový proud (oddíl 4.6) I_k [kA] (efektivní h.)
- Doba trvání zkratu T_k [s]

2.1. DIMENZOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ 110 kV

2.1.1. ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ 110 kV

Elektrický zkratový obvod je napájen transformátorem ze sítě vvn, u které je znám počáteční souměrný zkratový výkon S_{kQ} . Nejvyšší zkratový výkon 3f na vedení 110kV pro připojení TNS Rudoltice je 2288 MVA, tento údaj poskytla energetika ČEZ Distribuce z 2016. Ekvivalentní impedanci Z_Q vztaženou ke straně transformátoru s vyšším napětím lze určit jako:

Impedance soustavy 110 kV na straně 110 kV v místě připojení:

$$Z_Q = Z_k \approx X_Q = \frac{c \times U_{nQ}^2}{S_{kQ}} = \frac{1,1 \times 110^2}{2288} = 5,82 \, \Omega [\Omega; kV, MVA] \quad (1)$$

Kde:

c - napěťový součinitel (ČSN EN 60909, Odd. 2.3.1. Tab.1)

2.1.2. VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ NA STRANĚ 110 kV

Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_{k''}$:

$$I_{k''} = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times Z_k} = 1,0 \times \frac{1,1 \times 110}{\sqrt{3} \times 5,82} = 12,02 \, kA [kA; kV, \Omega] \quad (2)$$

Kde:

Hodnota zkratového výkonu sítě 110 kV vychází z výpočtů obdržených 2016. Hodnoty sdělené ČEZ Distribuce činí pro zařízení 110 kV pro vedení třífázový $I_{k''} = 12,01 \, kA$. Hodnota vypočtená ve vztahu (2)

je srovnatelná s informacemi získanými od ČEZ Distribuce. Dále pro výpočet dimenzování vodičů 110 kV se bude počítat s hodnotou počátečního rázového proudu $I_{k''} = 12,02$ kA.

Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \kappa \times \sqrt{2} \times I_{k''} = 1,7 \times \sqrt{2} \times 12,02 = \mathbf{28,81 \text{ kA}} \quad (3)$$

Kde:

Součinitel κ – součinitel pro poměr R/X nebo X/R, viz ČSN EN 60909 Obr.15

V soustavě vvn a za transformátorem vvn/vn bez asynchronních motorů je obvykle $\kappa = 1,7$

Ekvivalentní oteplovací proud:

Použití ekvivalentního oteplovacího proudu pro dimenzování je uvedeno v ČSN EN 60909 od 4.8, kde je pro něj použit symbol I_{th} .

Při zkratu v soustavě pro $T_k = 0,45$ s (vychází ze stávajícího nastavení ochrany na přívodu):

$$I_{th} = I_{k''} \times \sqrt{m+n} = 12,02 \times \sqrt{1,45+1} = \mathbf{18,811 \text{ kA}} \quad (4)$$

Kde:

součinitel m a n – viz ČSN EN 60909, Obrázek 21, 22 pro $T_k = 0,45$ s

Pro distribuční síť (elektricky vzdálené zkraty) se může obvykle použít $n = 1$.

2.2. DIMENZOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ 23kV

2.2.1. ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ 23kV

Elektrický zkratový obvod je napájen transformátorem ze sítě vvn, u které je znám počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_{k''}$. Ekvivalentní impedanci Z_s vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím lze určit jako:

Impedance soustavy 110kV na straně 23kV:

$$Z_Q \approx X_Q = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times I_{k''}} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \times 110}{\sqrt{3} \times 12,02} \times \frac{1}{(110/23)^2} = \mathbf{0,254 \Omega [\Omega; kV, MVA]} \quad (5)$$

Kde:

c - napěťový součinitel (ČSN EN 60909, Odd. 2.3.1. Tab.1)

p - převod transformátoru

Souslednou zkratovou impedanci transformátoru je možné vypočítat ze jmenovitých údajů

Transformátor T101, T102 110/23 kV :

Jmenovitý výkon

S_{rT} 12,5 MVA

Napětí nakrátko

u_{kr} 13,6 % pro odbočku č.9 pro napětí 110kV

potom

Impedance transformátoru 110/23 kV (ČSN EN 60909-0, Odd. 3.3.1):

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{13,6}{100} \times \frac{23^2}{12,5} = \mathbf{5,76 \Omega [\Omega; \%, kV, MVA]} \quad (6)$$

$$Z_T \approx X_T$$

Korekční součinitel pro impedanci síťového transformátoru (ČSN EN 60909-0, Odd. 3.3.3)

$$K_T = 0,95 \times \frac{c_{max}}{1+0,6 \times x_T} = 0,95 \times \frac{1,1}{1+0,6 \times 0,1361} = \mathbf{0,966108} \quad (7)$$

Poměrná reaktance transformátoru x_T

$$x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT}) = \mathbf{5,76 / (23^2 / 12,5) = 0,1361 [\Omega; \%, kV, MVA]} \quad (8)$$

Celková sousledná impedance transformátoru

$$Z_{TK} = Z_T \times K_T = 5,76 \times 0,966108 = 5,564782 \, \Omega \quad (9)$$

Celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_k = Z_Q + Z_{TK} = 0,254 + 5,565 = 5,819 \, \Omega \quad (10)$$

2.2.2. VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ NA STRANĚ 23kV

Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_{k''}$:

$$I_{k''} = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times Z_k} = \frac{1,1 \times 23}{\sqrt{3} \times 5,819} = 2,513 \, \text{kA [kA; kV, } \Omega] \quad (11)$$

Kde:

c - napěťový součinitel (ČSN EN 60909-0, Odd. 2.3.1. Tab.1)

Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \kappa \times \sqrt{2} \times I_{k''} = 1,7 \times \sqrt{2} \times 2,513 = 6,024 \, \text{kA} \quad (12)$$

Kde:

Součinitel κ – součinitel pro poměr R/X nebo X/R, viz ČSN EN 60909 Obr.15

Za transformátorem vvn/vn bez asynchronních motorů je obvykle $\kappa = 1,7$

Ekvivalentní oteplovací proud:

Použití ekvivalentního oteplovacího proudu pro dimenzování je uvedeno v ČSN EN 60909-0, kde je pro něj použit symbol I_{th} .

Při zkratu v soustavě pro $T_k = 0,25 \, \text{s}$:

$$I_{th} = I_{k''} \times \sqrt{m+n} = 2,513 \times \sqrt{0,1+1} = 2,634 \, \text{kA} \quad (13)$$

Kde:

součinitel m a n – viz ČSN EN 60909-0, Obrázek 21, 22 pro $T_k = 0,25 \, \text{s}$, $f = 50 \, \text{Hz}$

Pro distribuční síť (elektricky vzdálené zkraty) se může obvykle použít $n = 1$.

2. 2. 3. KONTROLA ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ 23 kV PODLE ÚČINKŮ

Volba všech součástí elektrického zařízení se provádí porovnáním hodnot udávaných výrobcí. Zkratová odolnost zvoleného zařízení musí být alespoň rovna nebo větší než výpočtové hodnoty parametrů určujících zkratové poměry. Pro rozvodná zařízení vn a vvn je doporučeno ČSN 38 1754 volit parametry zkratové odolnosti dle tabulky (v obvodech nn dimenzovaných na dynamický proud do 10 kA se kontrola neprovádí):

Jm.vypínací proud [I_{vyp}]	Krátkodobý proud [I_{th}]	Jm.dynamický proud [I_{dyn}]
6,3	6,3	16
8	8	20
12,5	12,5	31,5
16	16	40
20	20	50
25	25	63
31,5	31,5	80
40	40	100
50	50	125
63	63	160

- Krátkodobý proud zařízení I_{th} , nesmí být menší než vypočtený ekvivalentní oteplovací proud I_{th} přičemž obě porovnávané hodnoty musí být vztaženy na stejnou dobu trvání zkratu
- Jmenovitý dynamický proud zařízení I_{dyn} , nesmí být menší než vypočtený nárazový zkratový proud i_p v místě použití zařízení

2.2.4. DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ 23 kV

2.2.4.1. Kabelová vedení

Kabelová vedení použita v těchto místech:

- vývody U1, U2 R22 kV 3x kabelem 22-AXEKVCEY 1x150/25 mm²

Minimální průřez kabelových vedení vývodů U1, U2

$$S_{\min} = \frac{I_{\text{th}} \times \sqrt{T_k}}{k} = \frac{2634 \times \sqrt{0,05}}{72} = 8,158 \text{ mm}^2 [\text{mm}^2; \text{A}, \text{s}] \quad (14)$$

k – koeficient [$\text{As}^{1/2} \text{ mm}^{-2}$] dle ČSN 38 1754 Tab.12, kde k=72 pro Al kabel a dovolená teplota při zkratu je 150°C.

Primární proud transformátoru, který pracuje ve třídě zatížení V., je 133 A, což umožňuje při 150% zatížení $I_{150} = 199,5 \text{ A}$. Použitý kabel 22-AXEKVCEY 1x150/25 mm², jehož zatěžovací proud při uložení ve vzduchu, svazkování do trojúhelníka a teplotě jádra 90°C je 359 A, vyhovuje oběma podmínkám ($S_{\text{skut}} > S_{\min}$; $I_{\text{dov}} > I_{150}$).

2.3. DIMENZOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ 2,5 kV

2.3.1. ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ 2,5 kV

Elektrický zkratový obvod je napájen trakčním transformátorem usměrňovacího soustrojí, který je konstruován jako třívínutový s jedním vinutím sekundáru v zapojení do hvězdy a s jedním vinutím sekundáru do trojúhelníku. Ekvivalentní impedanci sítě vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím lze určit přepočítáním dle ČSN EN 60909:

Impedance soustavy 23kV na straně 2,5kV:

$$Z_Q \approx X_Q = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times I_{k''}} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \times 23}{\sqrt{3} \times 2,513} \times \frac{1}{(23/2,5)^2} = 0,0688 \Omega [\Omega; \text{kV}, \text{MVA}] \quad (15)$$

Kde:

I_k – Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_{k''}$ na straně 23 kV

t_r – převod transformátoru

c - napěťový součinitel (ČSN EN 60909, Odd. 2.3.1. Tab.1)

Při výpočtu zkratu mezi sekundárem trakčního transformátoru a usměrňovačem se sousledná zkratová impedance transformátoru vypočítá ze jmenovitých údajů jednoho sekundárního vinutí.

Transformátor 23/2,5 kV (TU1, TU2):

Jmenovitý výkon	S_{ts}	2,65	MVA
Napětí nakrátko	U_{ks}	6,9	%

Impedance transformátoru 23/2,5 kV:

$$Z_T = \frac{u_{\text{kr}}}{100\%} \times \frac{U_{\text{rT}}^2}{S_{\text{rT}}} = \frac{6,9}{100} \times \frac{2,5^2}{2,65} = 0,163 \Omega [\Omega; \%, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (16)$$

$$Z_T \approx X_T$$

Korekční součinitel pro impedanci síťového transformátoru

$$K_T = 0,95 \times \frac{c_{\max}}{1+0,6 \times X_T} = 0,95 \times \frac{1,1}{1+0,6 \times 0,069112} = 1,00339214 \quad (17)$$

Poměrná reaktance transformátoru x_T

$$x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT}) = \mathbf{0,163} / (2,5^2 / 2,65) = \mathbf{0,069112} \quad [\Omega; \%, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (18)$$

Celková sousledná impedance transformátoru

$$Z_{TK} = Z_T \times K_T = \mathbf{0,163} \times \mathbf{1,00339214} = \mathbf{0,16355292} \quad \Omega \quad (19)$$

Celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_k = Z_Q + Z_{TK} = \mathbf{0,0688} + \mathbf{0,16355292} = \mathbf{0,23235292} \quad \Omega \quad (20)$$

2.3.2. VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ NA STRANĚ 2,5 kV

Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_{k''}$:

$$I_{k''} = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times Z_k} = 1,0 \times \frac{1,1 \times 2,5}{\sqrt{3} \times 0,2324} = \mathbf{6,8399} \quad \text{kA} \quad [\text{kA}; \text{kV}, \Omega] \quad (21)$$

Kde:

c – napěťový součinitel (ČSN EN 60909, Odd. 2.3.1. Tab.1)

Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \kappa \times \sqrt{2} \times I_{k''} = 1,6 \times \sqrt{2} \times \mathbf{6,8399} = \mathbf{15,4308} \quad \text{kA} \quad (22)$$

Kde:

Součinitel κ – součinitel pro poměr R/X nebo X/R , viz ČSN EN 60909 Obr.15

V soustavě vn bez asynchronních motorů je obvykle $\kappa = 1,6$

Ekvivalentní oteplovací proud:

Použití ekvivalentního oteplovacího proudu pro dimenzování je uvedeno v ČSN EN 60909-0, kde je pro něj použit symbol I_{th} .

Při zkratu v soustavě pro $T_k = 0,05$ s:

$$I_{th} = I_{k''} \times \sqrt{m+n} = \mathbf{6,8399} \times \sqrt{0,4+1} = \mathbf{8,059} \quad \text{kA} \quad (23)$$

Kde:

součinitel m a n – viz ČSN EN 60909, Obrázek 21, 22 pro $T_k = 0,05$ s, $f = 50$ Hz

Pro distribuční sítě (elektricky vzdálené zkraty) se může obvykle použít $n = 1$.

2. 3. 3. KONTROLA ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ 2,5 kV PODLE ÚČINKŮ

2.3.3.1. Kabelový spoj transformátor usměrňovače – usměrňovač

Minimální průřez kabelu:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \times \sqrt{T_k}}{k} = \frac{\mathbf{8059} \times \sqrt{0,05}}{115} = \mathbf{15,627} \quad \text{mm}^2 \quad [\text{mm}^2; \text{A}, \text{s}] \quad (24)$$

k – koeficient [$\text{As}^{1/2} \text{mm}^{-2}$] dle ČSN 38 1754 Tab.12, kde $k = 115$ pro pryžovou izolaci při dovolené teplotě při zkratu 150°C .

Jako spoj pro jednu fázi je použit jeden vodič 6-CHBU $4 \times 1 \times 185 \text{ mm}^2$. Jmenovité proudové zatížení jednoho vodiče paralelně uloženého ve vzduchu je ($I_{dov} = 725 \text{ A}$ pro jeden kabel uváděné dle DS 069-2004 pro teplotu okolí 90°C).

Výkon 5,3 MVA		
Primár 22 kV	Zatížení [%]	Proud 1f [A]
PTP 150	100	133
	150	199,5
	200	266

Sok. 2,46 kV	Zatížení [%]	Proud If [A]
	100	612
	150	918
	200	1224

$$I_N = \text{počet}k_{ab} \times k_{hor} \times k_{ver} \times I_{dov} = 2 \times 1 \times 0,912 \times 725 = \mathbf{1322,4 \text{ A}} \quad (25)$$

Uvedené vodiče vyhovují při zatížení 150% výkonu 5,3 MVA podmínkám ($S_{skut} > S_{min}$, $I_{dov} > I$).

3. DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ A NASTAVENÍ OCHRAN 3 kV DC

Proudové hodnoty stejnosměrného obvodu za usměrňovačem

Výkon 5,0 MVA	
Zatížení [%]	Proud [A]
100	1500
150	2250
200	3000

Pro propojení usměrňovací jednotky U_x , – tlumivka TL_x a odpojovač SU_x -Q33 v kobkové rozvodně 3 kV DC a U_x – a odpojovač MU_x -Q34 v kobkové rozvodně 3 kV DC bude použito čtveřice paralelních kabelů 6-CHBU 1x185 mm² ($I_{dov} = 725 \text{ A}$ pro jeden kabel uváděné dle DS 069-2004 výrobce pro teplotu okolí 90°C, časová oteplovací konstanta je 592s), kde je dle ČSN 33 2000-5-52 ed.2 tab. B52.21 Přepočítací součinitele pro seskupení více než jednoho obvodu z jednožilových kabelů Způsob uložení F pro uložení na kabelové žebříky, rošty, háky apod. pro těsně seskupené ve vodorovné vrstvě v příchýtkách součinitel 0,89 pro 2 lávky pod sebou.

Potom dovolené zatížení :

$$I_N = \text{počet}k_{ab} \times k_u \times I_{dov} = 4 \times 0,89 \times 725 = \mathbf{2581 \text{ A}} \quad (26)$$

Pro usměrňovací soustrojí 5,0 MVA a použité vodiče:

Místo	Vodič	Dovolený proud [A]	Hodnocení
Propoj. usměrňovací jednotky U_x – Tlumivka TL_x - odpojovač SU_x -Q33	4 x 6-CHBU 1x185 mm ²	2581	$I_{dov} > I_{150}$
Propoj usměrňovací jednotky U_x – odpojovač MU_x -Q34	4 x 6-CHBU 1x185 mm ²	2581	$I_{dov} > I_{150}$
Tlumivka 1750 A, třída zatížení V		1750	$I_{dov} > I_{150}$

Připojení zpětného vedení ke sběrně mínus pólu

Provoz usměrňovacích jednotek paralelně není vyloučen. Proudové zatížení stejnosměrné části měnirny je omezeno nastavením ochran přívodu do R22 kV na hodnoty nastavení ochran funkcí NOC3Low, $3I >$ - Třífázová nadproudová nesměrová ochrana na hladině R22kV $I_n = 400 \text{ A}$; $t = 167 \text{ s}$ transformátoru T101, T102 tj. 12,5 MVA

Proudové zatížení stejnosměrného obvodu musí být dimenzováno zatížení výkonem 12,5 MVA přepočítaným na stranu stejnosměrného napětí 3000V:

$$I = \mathbf{4166,67 \text{ A}} \quad (27)$$

Tomuto proudu odpovídá například provedení přípojnic 2 || 160/10 Cu.

4. NASTAVENÍ OCHRAN

Ochrany elektrického zařízení 110 kV, 22 kV a 3 kV vychází selektivně z nastavení ochran transformátorů T101, T102 jmenovitěho výkonu 12,5 MVA.

5. ZÁVĚR

Hodnota zkratového výkonu sítě 110 kV vychází z výpočtů obdržených od firmy ČEZ Distribuce z 2016. Hodnoty sdělené ČEZ Distribuce činí pro zařízení 110 kV pro vedení třífázový $I_{k''} = 12,01$ kA, zkratový výkon 2288MVA. Hodnota vypočtená ve vztahu (2) je srovnatelná s informacemi získanými od ČEZ Distribuce. Dále pro výpočet dimenzování vodičů 110 kV se bude počítat s hodnotou počátečního rázového proudu $I_{k''} = 12,02$ kA. Výpočtem byly ověřeny stávající instalované vývodové kabely na hladině 22kV a nově navržené kabely na hladině 2,5kV AC a 3kV DC. Tyto kabely jsou v souladu s daným výpočtem.

7. POUŽITÉ PODKLADY

1. ČEZ: Výpočet zkratových proudů 110 kV sítě ČEZ, 2016
2. ČSN 33 2000-4-41 ed.2
3. ČSN 33 2000-4-43 ed. 2
4. ČSN 33 2000-4-473
5. ČSN 33 2000-5-52 ed. 2
6. ČSN 33 2000-5-54 ed. 3
7. ČSN 38 1754
8. ČSN EN 60909-0
9. ČSN EN 60865-1 ed. 2
10. ČSN 33 3022-1 HD 533 S1

V Července 11/2017

vypracoval Ing. Svoboda Jiří.