

REASY ČR a VSE, ZSE, ČEPs	PŘÍKLADY VÝPOČTŮ ZKRATOVÝCH PROUDŮ VE STŘÍDAVÝCH SÍTÍCH	PNE 33 3042
<p>Odsouhlasení normy</p> <p>Konečný návrh podnikové normy energetiky pro rozvod elektrické energie odsouhlasily tyto organizace: PRE Praha a.s., STE Praha a.s., ZČE Plzeň a.s., JČE České Budějovice a.s., VČE Hradec Králové a.s., SČE Děčín a.s., JME Brno a.s., SME Ostrava a.s., VSE Košice a.s., ZSE Bratislava, a.s., ČEPs Praha, a.s.</p> <p>Předmluva</p> <p>Tato norma PNE zpracovává mezinárodní normu IEC 60909-4: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 4: Příklady výpočtů zkratových proudů. Tato norma IEC je technickou zprávou a nemůže být přímo zapracovaná do soustavy ČSN norem.</p> <p>Souvisící normy ČSN</p> <p>ČSN EN 60909-0 (33 3022) Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 0: Výpočet proudů</p>		
Nahrazuje: -	Účinnost od: 1.1.2003	

Obsah

Strana

Předmluva	1
1 Všeobecně	4
1.1 Rozsah a předmět normy	4
1.2 Normativní odkazy	4
1.3 Definice, symboly, indexy a rovnice	4
2 Sousedná, zpětná a netočivá složka impedancí elektrického zařízení	5
2.1 Venkovní vedení, kabely a omezující tlumivky	5
2.2 Transformátory	6
2.3 Generátory a elektrárenské jednotky	12
3 Výpočet zkratových proudů v soustavě nn - $U_n = 400$ V	17
3.1 Příklad	17
3.2 Určení sousledných impedancí	17
3.2.1 Síťový napáječ	17
3.2.2 Transformátory	19
3.2.3 Vedení (kabely a venkovní vedení)	20
3.3 Určení netočivých impedancí	20
3.3.1 Transformátory	20
3.3.2 Vedení (kabely a venkovní vedení)	20
3.4 Výpočet I_k'' a i_p trojfázových zkratových proudů	21
3.4.1 Zkratové místo F1	21
3.4.2 Zkratové místo F2	22
3.4.3 Zkratové místo F3	23
3.5 Výpočet I_{k1}'' a i_{p1} u jednofázových zkratů	23
3.5.1 Zkratové místo F1	23
3.5.2 Zkratové místo F2	24
3.5.3 Zkratové místo F3	24
3.6 Soubor výsledků	25
4 Výpočet trojfázových zkratových proudů v soustavě vn s vlivem motorů	26
4.1 Příklad	26
4.2 Výpočet s absolutními hodnotami	26
4.3 Výpočet s reaktancemi elektrických zařízení	30
4.4 Výpočet v poměrných jednotkách	32
4.5 Výpočet pomocí superpoziční metody	34
5 Výpočet zkratových proudů pro elektrárenské jednotky a vlastní spotřebu	38
5.1 Příklad	38
5.2 Zkratové impedance elektrického zařízení	40
5.2.1 Síťový napáječ	40
5.2.2 Elektrárenský blok	40
5.2.2.1 Generátor	40
5.2.2.2 Blokovaný transformátor	41
5.2.2.3 Elektrárenský blok (blokovaný transformátor s přepínačem odboček při zatížení)	41
5.2.3 Transformátory vlastní spotřeby	41
5.2.4 Transformátory 2,5 MVA a 1,6 MVA	42
5.2.4.1 Transformátory $S_{rT} = 2,5$ MVA (T15...T19, T21...T25)	42
5.2.4.2 Transformátory $S_{rT} = 1,6$ MVA (T20, T26)	43
5.2.5 Asynchronní motory	46
5.3 Výpočet zkratových proudů	46
5.3.1 Zkratové místo F1	46
5.3.1.1 Počáteční zkratový proud I_k''	46
5.3.1.2 Nárazový zkratový proud i_p	46
5.3.1.3 Souměrný zkratový vypínací proud I_b	46
5.3.1.4 Ustálený zkratový proud I_{kmax}	47
5.3.2 Zkratové místo F2	47
5.3.2.1 Počáteční zkratové proudy I_{kG}'' a I_{kT}''	47
5.3.2.2 Nárazové zkratové proudy i_{pG} a i_{pT}	47

5.3.2.3	Souměrný zkratový vypínací proud I_{bG} a I_{bT}	48
5.3.2.4	Ustálený zkratový proud I_{kGmax} a I_{kTmax}	48
5.3.3	Zkratové místo F3.....	48
5.3.3.1	Počáteční zkratové proudy I''_{krs1} a $I''_{kM,AT}$	48
5.3.3.2	Nárazové zkratové proudy I_{prsl} a $I_{pM,AT}$	50
5.3.3.3	Vypínací proud a ustálený zkratový proud	51
5.3.4	Zkratové místo F4.....	51
5.3.5	Zkratové místo F5.....	54
6	Zkušební příklad pro výpočet zkratových proudů počítačovými programy podle IEC 909 ..	56
6.1	Všeobecně	56
6.2	Zkušební příklad 380 kV/110 kV/30 kV/10 kV	57
6.2.1	Síťová konfigurace a data	57
6.2.2	Zkratové impedance elektrických zařízení.....	59
6.3	Výsledky	61
6.3.1	Trojfázové zkratové proudy.....	61
6.3.2	Jednofázové zkratové proudy.....	63
7.	Příklady výpočtu zkratových poměrů v elektrických sítích	64
	Výsledky	73
	Porovnání výsledků výpočtů zkratů.....	74

Související mezinárodní normy

EN 60909-0 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 0: Výpočet proudů

Vypracování normy

Zpracovatel: Ing. Stanislav Roškota, ÚJV Řež, a.s., divize Energoprojekt Praha a.s.

1 Všeobecně

1.1 Rozsah a předmět normy

Tato část IEC 60909 je technickou zprávou, která je zamýšlena jako pomocná pro použití IEC 60909 pro výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách 50 Hz a 60 Hz.

Tato technická zpráva neobsahuje doplňující požadavky, ale dává podnět pro modelování elektrického zařízení v sousledné, netočivé a nulové soustavě (kapitola 2) a praktické příklady výpočtů v soustavě nn (kapitola 3), v soustavě vn s asynchronními motory (kapitola 4) a elektrárenského bloku s vlastní spotřebou napájející velký počet vn asynchronních motorů a skupiny nn motorů (kapitola 5).

Tyto tři příklady uvedené v kapitolách 3, 4 a 5 jsou podobné těm, které jsou uvedeny v IEC 60909 (1988), ale jsou revidovány podle IEC 60909-0, která ji nahradila.

Dále je doplněn článek k příkladu v kapitole 3, který porovnává výsledky nalezené s použitím ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu podle postupu uvedeného v IEC 60909-0 na jedné straně s výsledky nalezenými pomocí superpoziční metody na straně druhé, která bere v úvahu rozdílné zatěžovací podmínky před zkratem.

Kapitola 6 této technické zprávy udává schéma obvodu a údaje zkušební sítě a výsledky pro výpočet, který je proveden v souladu s IEC 60909-0, nabízí možnost porovnání mezi výsledky získané pomocí počítačového programu pro výpočet zkratových proudů a dává výsledky pro I_k'' , I_p , I_b , I_k , I_{k1}'' a I_{p1} v síti zvn s elektrárenskými bloky, generátory, asynchronními motory a vedeními ve čtyřech různých napěťových úrovních 380 kV, 110 kV, 30 kV a 10 kV.

1.2 Normativní odkazy

IEC 60038:1983 Jmenovitá napětí IEC

IEC 60909-0:2000 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 0: Výpočet proudů

IEC 60909-1:1991 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 1: Součinitele pro výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách podle IEC 60909

IEC 60909-2:1992 Data pro výpočty zkratových proudů v souladu s IEC 60909

IEC 60909-3:1995 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 3: Proudů procházející během dvou samostatných jednofázových zkratech v jednom okamžiku a dílčí zkratové proudy protékající zemí

IEC 60865-1:1993 Zkratové proudy. Část 1: Výpočet účinků. Část 1: Definice a výpočetní metody

1.3 Definice, symboly, indexy a rovnice

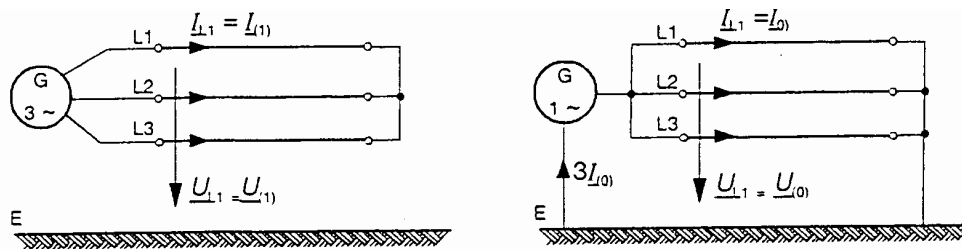
Definice, symboly, indexy a rovnice jsou stejné jako v IEC 60909-0.

2 Sousedná, zpětná a netočivá složka impedancí elektrického zařízení

V kapitole 3 IEC 60909-0 jsou modelovány a počítány sousledné a netočivé impedance elektrických zařízení. Ve většině případů jsou zpětné impedance rovny sousledným impedancím, pokud se počítají počáteční zkratové proudy, podle 3.6.1 IEC 60909-0 a IEC 60909-2.

2.1 Venkovní vedení, kabely a omezující tlumivky

Obrázek 1 znázorňuje význam a základní měření sousledných a netočivých impedancí venkovních vedení s jedním obvodem L1, L2, L3.



a) sousledná impedance

$$\underline{Z}_{(1)L} = \underline{U}_{L1} / \underline{I}_{L1} = \underline{U}_{(1)} / \underline{I}_{(1)}$$

$$\text{s } \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3} = 0$$

$$\text{a } U_{L1} = U_{L2} = U_{L3}$$

b) netočivá impedance

$$\underline{Z}_{(0)L} = \underline{U}_{L1} / \underline{I}_{L1} = \underline{U}_{(0)} / \underline{I}_{(0)}$$

$$\text{s } \underline{U}_{L1} = \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L3} = \underline{U}_{(0)}$$

$$\text{a } \underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L2} = \underline{I}_{L3} = \underline{I}_{(0)}$$

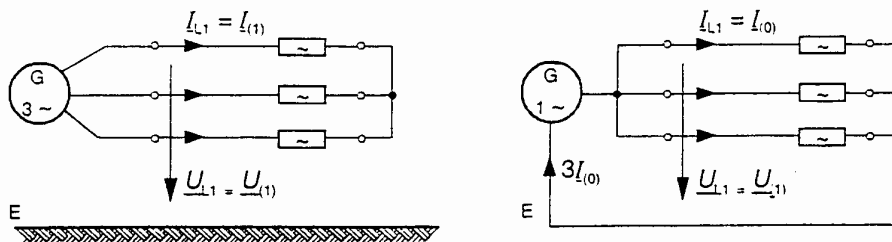
Obrázek 1 – Sousedné a netočivé impedance venkovního vedení (jednoduché vedení)

Ve skutečnosti změření napětí U_{L1} a proudu I_{L1} vede k absolutní hodnotě impedance Z . Společně s měřením celkových ztrát P_V při proudu I_{L1} je možné získat komplexní hodnotu impedance \underline{Z} :

$$Z = \frac{U_{L1}}{I_{L1}}; \quad R = \frac{P_V}{3I_{L1}^2}; \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}; \quad \underline{Z} = R + jX$$

Rovnice pro výpočet sousledných a netočivých impedancí venkovních vedení s jedním nebo dvěma paralelními obvody (dvojitě vedení) a bez nebo s jedním nebo dvěma zemnicemi vedeními jsou uvedeny v IEC 60909-2. Zpětná impedance je rovna sousledné impedanci. Měření pro nalezení sousledných a netočivých impedancí kabelů s pláštěm, stíněním a pancéřováním jsou podobné jako na obrázku 1. Příklady jsou uvedeny v IEC 60909-2. V případě netočivé impedance je důležité uzemnění pláště nebo stínění nebo pancéřování právě tak jako počet paralelních kabelů. V případě čtyřžilových nn kabelů má průřez uzemněné žíly vliv na netočivou impedanci.

Obrázek 2 znázorňuje způsob a základní měření sousledné a netočivé složky trojfázovým reaktorem omezujícím zkratový proud.



a) sousledná impedance

$$\underline{Z}_{(1)R} = \underline{U}_{L1}/\underline{I}_{L1} = \underline{U}_{(1)}/\underline{I}_{(1)}$$

s $\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3} = 0$

a $\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L3}$

b) netočivá impedance

$$\underline{Z}_{(0)R} = \underline{U}_{L1}/\underline{I}_{L1} = \underline{U}_{(0)}/\underline{I}_{(0)}$$

s $\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L3} = \underline{U}_{(0)}$

a $\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L2} = \underline{I}_{L3} = \underline{I}_{(0)}$

Obrázek 2 – Sousledná a netočivá impedance reaktoru omezující zkratový proud, všeobecně $R_R \ll X_R$

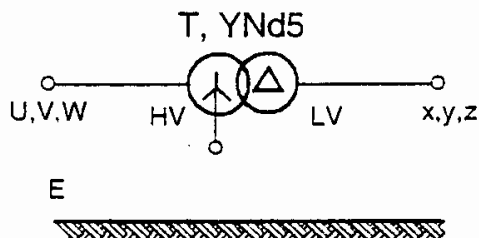
Pokud je magnetická vazba mezi třemi cívkami bez nebo se železným jádrem malá je netočivá impedance $\underline{Z}_{(0)R}$ přibližně stejná jako sousledná impedance $\underline{Z}_{(1)R}$. Při výpočtu zkratových proudů ve vvn soustavě je vhodné použít pouze reaktanci.

2.2 Transformátory

Blokové transformátory elektrárenského bloku jsou též řešeny ve 2.3.

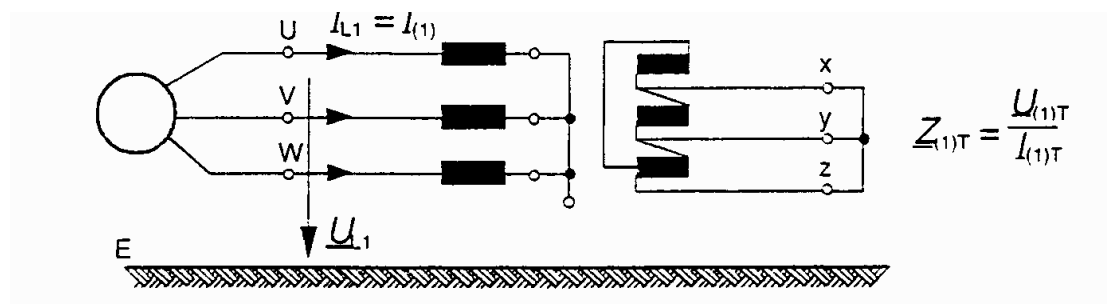
Síťové transformátory mají dvě nebo tři nebo i více trojfázových vinutí. Obrázek 3 znázorňuje případ pro sousledné a netočivé impedance dvouvinutového transformátoru v zapojení Ynd5. V případě trojvinutových transformátorů (příklady jsou uvedeny v tabulce 3b IEC 60909-2), je nutné změřit tři různé impedance a pak vypočítat tři impedance ekvivalentního obvodu v sousledné nebo netočivé soustavě transformátoru, viz 3.3.2 IEC 60909-0 a příklad na konci této kapitoly.

Tabulka 1 udává příklady pro ekvivalentní obvody v sousledné a netočivé soustavě dvouvinutových a trojvinutových transformátorů s odlišnými uzemňovacími podmínkami na straně zvn, vvn a vn¹⁾. Impedance v tabulce 1 jsou vztaženy na stranu A, kterou může být zvn, vvn strana nebo vn strana transformátoru.

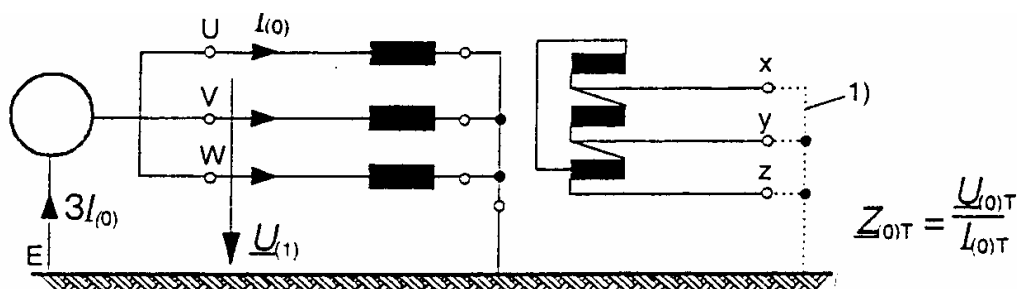


¹⁾ POZNÁMKA – Místo IEC termínu „medium-voltage (MV)“ se pro tuto napěťovou úroveň používá v ČR termín „vysoké napětí (vn)“. Napěťová úroveň označovaná IEC jako „high-voltage (HV)“ odpovídá v ČR napěťové úrovni „velmi/zvláště vysokého napětí (vvn/zvn)“.

a) Dvouvinuťový transformátor se svorkami U, V, W na straně vysokého napětí a x, y, z na straně nízkého napětí



b) Sousedná impedance $Z_{(1)} = Z_{(2)}$. $Z_{(2)}$ je zpětná impedance.



c) Netočivá impedance $Z_{(0)}$

POZNÁMKA Při zapojení vinutí do trojúhelníku se jednofázový zkrat a zemní spojení neuvádí.

Obrázek 3 – Sousedná a netočivá soustava impedancí dvouvinuťového transformátoru

Ynd5

Jak je ukázáno v tabulce 2, transformátory skupiny Yy se nesmí používat v nn soustavě s nízkou impedancí uzemnění na straně nízkého napětí (sítě TN), protože $Z_{(0)}$ může být velmi veliká a to tak, že by nezafungovala zkratová ochrana. Pro napájení sítě TN se mohou použít transformátory skupiny 2 nebo 3 z tabulky 1.

Transformátory skupiny YNyn,d jsou typické pro sítě vvn s uzemněným neutrálním uzlem pouze na jedné straně (A nebo B). Příklady číslo 4b a 6 z tabulky 1 ukazují, že netočivé soustavy v obou sítích jsou spojeny, jestliže jsou oba neutrální body (uzly) uzemněny (zemnicí spínač ES je v případě 4b zapnut). V těchto případech jsou nutné doplňující úvahy zvláště pokud je převod transformátoru velký k zjištění zda tato vazba je přijatelná. Případ č. 5 v tabulce 1 udává příklad jak se vyhnout této vazbě v netočivé soustavě. Případ č. 9 v tabulce 1 udává další příklad jak se vyvarovat této vazbě v netočivé soustavě, pokud jsou dva paralelní transformátory ve stejném nebo různém místě.

Tabulka 1 – Příkladů ekvivalentních obvodů transformátorů v sousledné a netočivé soustavě

No.	Transformátor	Sousledná soustava	Netočivá soustava
1a			
1b			
2			
3			
4a			
4b			
5			

1) $Z_{(1)K} = K_T Z_{(1)}$; K_T z rovnice (12a) nebo (12b) z IEC 60909-0.
 2) $Z_{(0)K} = K_T Z_{(0)}$; K_T z rovnice (12a) nebo (12b) z IEC 60909-0; Z_N bez korekčního součinitele.
 3) K_{TAB} , K_{TAC} , K_{TBC} z rovnice (13) IEC 60909-0.
 4) Korekční součinitelé jak jsou označeny v 3); Z_N a X_S bez korekčního součinitele.
 5) Zemní spínač

Tabulka 1 – Příklady ekvivalentních obvodů transformátorů v sousledné a netočivé soustavě (dokončení)

No.	Transformátor	Sousledná soustava	Netočivá soustava
6			<p> $*Z_1 = -3Z_N(t-1);$ $*Z_2 = 3Z_N(t-1)$ $*Z_3 = 3Z_N t;$ $t = U_A / U_B$ </p>
7			<p> $3Z_{01B} \left(\frac{U_A}{U_B} \right)^2$ </p>
8	<p>Autotransfórátor se třemi jednofázovými jednotkami</p> <p>propojení jednotek vně transformátoru</p>		<p> $*Z_1, *Z_2, *Z_3$ jako v případě No. 6 $Z_{01A} = Z_{11A}; Z_{01B} = Z_{11B}; Z_{01C} = Z_{11C}$ </p>
9			<p> $3Z_N \left(\frac{U_A}{U_B} \right)^2$ </p>

6) $K_{TAB}, K_{TAC}, K_{TBC}$ z rovnice (13) IEC 60909-0.

7) Korekční součinitelé jak jsou označeny v 3); Z_N bez korekčního součinitele.

8) Zobrazení možnosti oddělení netočivé složky sítě A a B u dvou paralelních trojvlnových transformátorů.

V příkladu č. 8 pro autotransformátory s uzemněným neutrálním uzlem přes $Z_N \neq \infty$, pro tři konstrukčně oddělené jednotky a vinutí v zapojení do trojúhelníku, se nemůže vyskytnout vazba mezi netočivými soustavami sítě na obou stranách transformátoru. Pro určení impedancí $*Z_1$, $*Z_2$ a $*Z_3$ jako funkce $Z_N \neq \infty$, jsou nezbytné zvláštní výpočty jak jsou uvedeny v příkladu č. 6 v tabulce 1.

Přídavné transformátory (nebo regulační transformátory napětí a/nebo transformátory pro ovládání fázového úhlu) jsou reprezentovány jako síťové transformátory se zapojením v příkladu č. 6 v tabulce 1. Konstrukce a zapojení transformátoru natáčejícího fázi bude určovat zda $Z_{(0)C}$ bude mít nízkou hodnotu, a v tomto případě bude nutné změřit tři odlišné impedance jako u trojvinut'ových transformátorů, aby se mohla vypočítat impedance ekvivalentního obvodu.

Tabulka 2 udává některé směrné hodnoty pro poměry $X_{(0)T}/X_T$ transformátorů, pokud je neutrální bod transformátoru uzemněn. V případě trojvinut'ových transformátorů (případy č. 4 až 7 a 9 v tabulce 1), reaktance $X_T = X_{(1)T}$ je uvedena $X_{(1)T} = X_{(1)A} + X_{(1)B}$.

Tabulka 2 – Směrné hodnoty poměrů $X_{(0)T}/X_T$ dvouvinut'ových a trojvinut'ových transformátorů

Konstrukce Transformátoru	Zapojení			
	YNd nebo Dyn	Yzn	YNyn,d	YNy ³⁾ nebo YNz
Tři jádra	0,7 ... 1,0 ¹⁾			3 ... 10
Pět jader	1,0	0,1 ... 0,15	1 ... 3,5 ²⁾	10 ... 100
Tři jednojádrové transformátory	1,0			10 ... 100

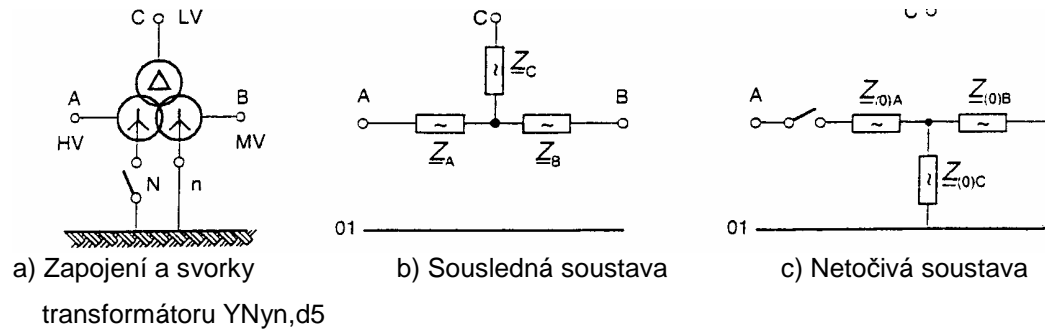
¹⁾ Transformátory s malým zdánlivým výkonem: $X_{(0)T}/X_T \approx 1,0$ (například nn transformátory Dyn5 s $S_{rT} = 400$ kVA, $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10$ kV/0,4 kV).

²⁾ Poměr $X_{(0)T}/X_T$ závisí na konstrukci transformátoru, viz IEC 60909-2.

³⁾ Transformátory Yy se nemusí používat v sítích s nízkou impedancí uzemnění, například v TN-sítích (viz IEC 61200-413)

Příklad impedancí a ekvivalentních obvodů trojvinut'ového síťového transformátoru Ynyn,d5, $S_{rTHVMV} = 350$ MVA

Obrázek 4 znázorňuje ekvivalentní obvody trojvinut'ového transformátoru v sousledné a netočivé soustavě. Zpětná soustava je totožná se souslednou soustavou (viz č. 4 v tabulce 1).



Obrázek 4 – Náhradní schémata trojfázového síťového transformátoru

Následující údaje jsou stanovena nebo zjištěna pomocí výpočtů:

$$\begin{aligned}
 U_{rTHV} &= 400 \text{ kV}; & U_{rTMV} &= 120 \text{ kV}; & U_{rTLV} &= 30 \text{ kV}; \\
 S_{rTHV} &= 350 \text{ MVA}; & S_{rTMV} &= 350 \text{ MVA}; & S_{rTLV} &= 50 \text{ MVA}; \\
 u_{krHVMV} &= 21 \% ; u_{RrHVMV} = 0,26 \% ; \text{vztažené k } S_{rTHVMV} = 350 \text{ MVA}, U_{rTHV} = 400 \text{ kV}; \\
 u_{krHVLV} &= 10 \% ; u_{RrHVLV} = 0,16 \% ; \text{vztažené k } S_{rTHVLV} = 50 \text{ MVA}, U_{rTHV} = 400 \text{ kV}; \\
 u_{krMVLV} &= 7 \% ; u_{RrHVLV} = 16 \% ; \text{vztažené k } S_{rTHVLV} = 50 \text{ MVA}, U_{rTMV} = 120 \text{ kV};
 \end{aligned}$$

Z rovnic (10) v IEC 60909-0 jsou vypočítány následující impedance sousledné soustavy vztažené na stranu B:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{AB} &= \left(\frac{u_{RrHVMV}}{100 \%} + j \frac{u_{XrHVMV}}{100 \%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTHVMV}} = (0,106971 + j 8,639338) \Omega \\
 \underline{Z}_{AC} &= \left(\frac{u_{RrHVLV}}{100 \%} + j \frac{u_{XrHVLV}}{100 \%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTHVLV}} = (0,460800 + j 28,796313) \Omega \\
 \underline{Z}_{BC} &= \left(\frac{u_{RrMVLV}}{100 \%} + j \frac{u_{XrMVLV}}{100 \%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTMVLV}} = (0,460800 + j 20,154733) \Omega
 \end{aligned}$$

Výpočty jsou zde provedeny s přesností na šest desetinných míst, protože je tento příklad použit též pro zkušební síť v kapitole 6 (transformátory T3 = T4).

S pomocí jmenovitých vztážných reaktancí X_T určených z napětí $u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2}$ podle rovnice (10d) IEC 60909-0 jsou určeny následující korekční součinitelé:

$$\begin{aligned}
 K_{TAB} &= 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_{TAB}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \times 0,209984} = 0,928072 \\
 K_{TAC} &= 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_{TAC}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \times 0,099987} = 0,985856 \\
 K_{TBC} &= 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_{TBC}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \times 0,069982} = 1,002890
 \end{aligned}$$

Společně s těmito korekčními součiniteli, například $\underline{Z}_{ABK} = K_{TAB}\underline{Z}_{AB}$ jsou určeny následující korigované impedance (index K):

$$\underline{Z}_{ABK} = (0,099277 + j 8,017927) \Omega$$

$$\underline{Z}_{ACK} = (0,454283 + j 28,389024) \Omega$$

$$\underline{Z}_{BCK} = (0,462132 + j 20,212973) \Omega$$

Korigované ekvivalentní sousledné impedance na obrázku 4b, vztažené na stranu vn (v obrázku označeno MV), jsou vypočítané pomocí rovnice (11) z IEC 60909-0.

$$\underline{Z}_{AK} = (0,045714 + j 8,096989) \Omega$$

$$\underline{Z}_{BK} = (0,053563 + j 0,079062) \Omega$$

$$\underline{Z}_{CK} = (0,408568 + j 20,292035) \Omega$$

Pro ekvivalentní model transformátoru v netočivé soustavě (obrázek 4c) jsou známy následující reaktance vztažené na vn stranu (v obrázku MV) B:

$$X_{(0)A} = 8,5551 \Omega; \quad X_{(0)B} = -0,6881 \Omega; \quad X_{(0)C} = 18,8307 \Omega$$

Pokud je neutrální bod transformátoru uzemněn účinná netočivá reaktance součet $X_{(0)B}$ a $X_{(0)C}$ vede k $X_{(0)MVK}$ pokud se zavede impedanční korekční součinitel K_{TBC} :

$$X_{(0)MVK} = K_{TBC} (X_{(0)B} + X_{(0)C}) = 18,195032 \Omega$$

To vede k poměru $X_{(0)T}/X_T = (X_{(0)B} + X_{(0)C})/X_{AB} = 18,1426 \Omega/8,639338 \Omega = 2,0999 \approx 2,1$ bez korekčního součinitele.

V mnoha případech se trojvínutové síťové transformátory s pomocným vinutím do trojúhelníka (například Y_{nyn}, d5) mohou uvažovat jako dvouvinutové (viz například transformátor T4, T5 a T6 na obrázku 16).

Například (transformátor T4 na obrázku 16) výpočet může být mnohem snazší, zvláště pokud jsou odpory zanedbány ($R_T/X_T \approx 0,012$):

$$X_T = X_{AB} = 8,639338 \Omega; \quad K_T = K_{TAB} = 0,928072; \quad X_{TK} = K_T/X_T = 8,017927 \Omega; \quad X_{(0)T} = 2,1 \times X_T = 18,1426 \Omega$$

a společně s $K_T = K_{TAB}$: $X_{(0)T} = 16,838 \Omega$ na straně bezpečnosti v porovnání s $X_{(0)T} = K_{TBC}X_{(0)T} = 18,195 \Omega$ jak je určeno při výpočtu s komplexními veličinami.

2.3 Generátory a elektrárenské jednotky

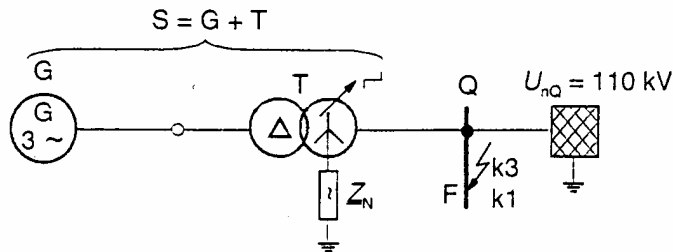
2.3.1 Pro synchronní generátory bez blokových transformátorů v nn a vn sítích jsou dány sousledné reaktance X_d'' , X_d' a X_d (viz IEC 60909-2). V prvním momentu zkratu rázová reaktance X_d'' vede k I_k'' .

Reaktance zpětné soustavy je přibližně stejná jako rázová reaktance: $X_{(2)} = X_d''$. Pokud je X_q'' značně odlišná od X_d'' pak se musí použít $X_{(2)} = 0,5 (X_d'' + X_q'')$ (viz IEC 60909-0).

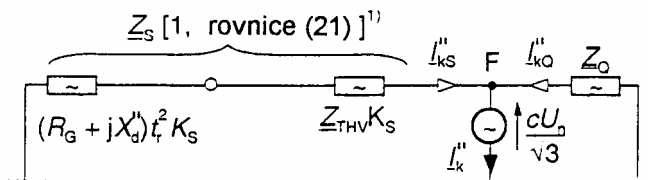
Netočivá reaktance $X_{(0)}$ je menší než přechodná reaktance, závisí na konstrukčním uspořádání vinutí synchronního stroje (viz 60909-2). Pokud musí být uzel generátoru uzemněn přes přidavnou impedanci, raději reaktanci, která je mezi uzlem generátoru a zemí, k omezení jednofázového zkratového proudu ($I_{k1}'' \leq I_k''$) a/nebo k potlačení tří složkových proudů v případě paralelních generátorů nebo paralelních transformátorů s uzlem

uzemněným ve stejné části sítě, pak se musí použít impedanční korekční součinitel K_G v sousledné, zpětné a netočivé soustavě, ale K_G se nesmí použít pro přídavnou impedanci uzlu (viz 3.6.1 IEC 60909-0).

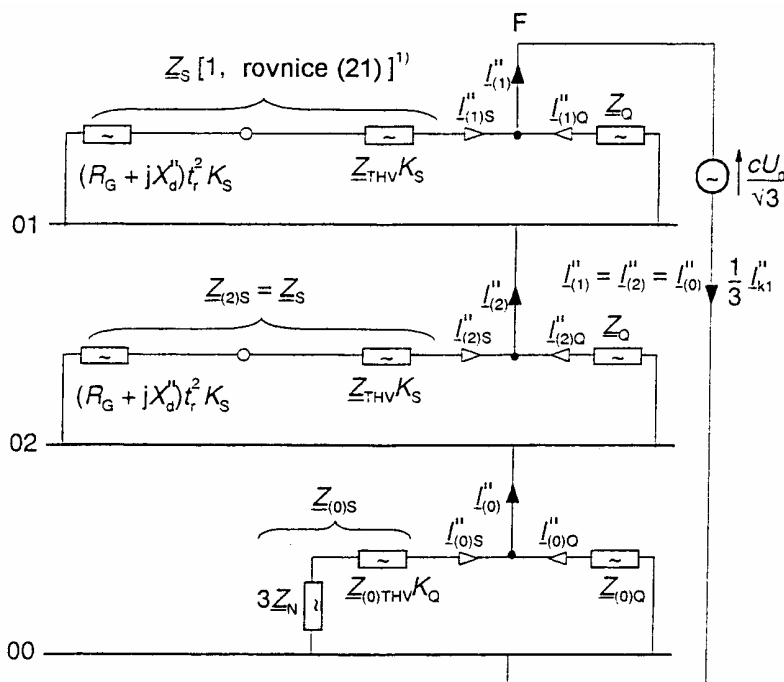
a) Schéma



b) Sousledná soustava pro výpočet I_k''



c) Sousledná soustava pro výpočet I_k'' . Sousledná, zpětná a netočivá soustava pro výpočet I_{k1}'' a dílčích zkratových proudů $I_{(1)S}''$, $I_{(2)S}''$ a $I_{(0)S}''$, $X_{(2)G} \approx X_d'$ jsou znázorněna na obrázku 5c).



Obrázek 5 – Schéma složkových soustav při zkratu na straně vyššího napětí elektrárenského bloku

¹⁾ Rovnice (21) je z IEC 60909-0.

V případě elektrárenského bloku (S) s přepínačem odboček při zatížení (viz 3.7.1 IEC 60909-0) nebo s přepínačem odboček bez zatížení (viz 3.7.2 IEC 60909-0) je netočivá impedance na straně vyššího napětí elektrárenského bloku udána netočivou impedancí blokového transformátoru a trojnásobnou hodnotou impedance \underline{Z}_N mezi středním uzlem transformátoru (HV- strana) a zemí. Na obrázku 5 je uveden příklad. Sousedná a zpětná impedance elektrárenského bloku se musí vypočítat pomocí rovnice (21) nebo rovnice (23) z IEC 60909-0 společně s impedančním korekčním součinitelem K_S z rovnice (22) nebo rovnice (24) z IEC 60909-0. Netočivá impedance elektrárenského bloku se určí z $\underline{Z}_{(0)S} = \underline{Z}_{(0)THV} K_S + 3 \underline{Z}_N$. Impedanční korekční součinitel se musí pak použít následovně:

a) pro souslednou impedanci:

$$\underline{Z}_S = [(R_G + j X_d'') t_r^2 + \underline{Z}_{THV}] K_S,$$

b) pro zpětnou impedanci:

$$\underline{Z}_{(2)S} = [(R_G + j X_{(2)}) t_r^2 + \underline{Z}_{THV}] K_S,$$

c) pro netočivou impedanci:

$$\underline{Z}_{(0)S} = \underline{Z}_{(0)THV} K_S + 3 \underline{Z}_N.$$

Proud $3 I_{(0)S}$ procházející ze středního uzlu blokového transformátoru na impedanci uzemnění elektrárny, pokud existuje, proto vede k nárůstu potenciálu, dotykového a krokového napětí.

Pokud jsou vypočítány dílčí zkratové proudy $I_{(1)S}$, $I_{(2)S}$ a $I_{(0)S}$ musí se zavést impedanční korekční součinitel podle rovnice (22) z IEC 60909-0 pro elektrárenskou jednotku s přepínačem odboček při zatížení, která je závislá na provozním rozsahu generátoru (viz IEC 60909-0). V případě elektrárenských bloků s přepínačem odboček bez zatížení se může použít korekční součinitel K_{S0} z rovnice (24) z IEC 60909-0 pro výpočet proudů $I_{(1)S}$, $I_{(2)S}$ a $I_{(0)S}$.

2.3.2 Příklad pro výpočet impedancí a zkratových proudů při zkratu na straně vyššího napětí elektrárenského bloku s přepínačem odboček při zatížení.

Pro tento příklad se mohou použít údaje elektrárenského bloku S1 = G1 + T1 na obrázku 16. Neutrální uzel blokového transformátoru je uzemněn přes reaktanci $X_{R1} = 22 \Omega$ ($R_{R1} \ll X_{R1}$) pro omezení zemní poruchy při odlehčení (odepnutí zatížení) a současného jednofázového zkratu na straně vyššího napětí blokového transformátoru (viz 6.2.1).

- Generátor:

$S_{rG} = 150 \text{ MVA}$; $U_{rG} = 21 \text{ kV}$; $x_d'' = 0,14 \text{ p.j.}$; $x_d' = 1,8 \text{ p.j.}$; $\cos \varphi_{rG} = 0,85$; $R_G = 0,002 \Omega$
(Válcový rotor generátoru, který pracuje pouze v oblasti přebuzení.)

- Blokový transformátor:

$$S_{rT} = 150 \text{ MVA}; U_{rTHV}/U_{rTLV} = 115 \text{ kV}/21 \text{ kV}; u_{kr} = 16 \% ; u_{Rr} = 0,5 \% ; p_T = \pm 12 \% ;$$

$$X_{(0)T}/X_T = 0,95; R_{0T}/R_T = 1,0; \underline{Z}_N = j X_{R1} = j 22 \Omega$$

- Síťový napáječ (určen z náhradního schématu sítě):

$$U_{nQ} = 110 \text{ kV}; c_{Qmax} = 1,1; I_{kQ}'' = 13,61213 \text{ kA}; R_Q/X_Q = 0,20328; X_{(0)Q}/X_Q = 3,47927;$$

$$R_{(0)Q}/R_Q = 3,47927.$$

Následující výsledky jsou určeny pro tento příklad (viz obrázek 5):

$$\underline{Z}_G = R_G + j X_d'' = (0,002 \Omega + j 0,14 \frac{(21 \text{ kV})^2}{150 \text{ MVA}}) = (0,002 + j 0,4116) \Omega$$

$$\underline{Z}_{Gt} = \underline{Z}_G \quad t_r^2 = (0,05998 + j 12,34333) \Omega \quad s \quad t_r = 115 / \text{kV} 21 \text{ kV}$$

$$\underline{Z}_{THV} = \left(\frac{u_{Rr}}{100 \%} + j \frac{u_{Xr}}{100 \%} \right) \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = (0,44083 + j 14,09978) \Omega$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{rR}^2} = 15,99219 \% \quad (x_T = 0,1599219 \text{ p.j.})$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{rG}} = 0,99597$$

$$\underline{Z}_S = (\underline{Z}_G \quad t_r^2 + \underline{Z}_{THV}) K_S = (0,49879 + j 26,33668) \Omega$$

V případě trojfázového zkratu (obrázek 5) s $U_n = U_{nQ}$:

$$I_{kS}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} \underline{Z}_S} = (0,05022 - j 2,65160) \text{ kA}; \quad I_{kS}'' = 2,65208 \text{ kA}$$

$$I_{kQ}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} \underline{Z}_Q} = (2,71161 - j 13,33931) \text{ kA}; \quad I_{kQ}'' = 13,61213 \text{ kA}$$

$$Z_Q = \frac{1,1 U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} \quad \text{a} \quad X_Q = \frac{1,1 U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} = 0,97996 Z_Q$$

$$I_k'' = I_{kS}'' + I_{kQ}'' = (2,76183 - j 15,99091) \text{ kA}; \quad I_k'' = 16,22766 \text{ kA.}$$

Tento výsledek je též uveden v tabulce 11 pro zkušební síť.

Jednofázový zkratový proud I_{k1}'' (viz rovnice (52) IEC 60909-0):

$$\underline{Z}_{(1)} = \frac{\underline{Z}_S \times \underline{Z}_Q}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_Q} = (0,73267 + j 4,24215) \Omega; \quad \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)S} \times \underline{Z}_{(0)Q}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (2,09396 + j 14,39889) \Omega$$

$$\begin{aligned} s \underline{Z}_{(0)S} &= \underline{Z}_{(0)THV} K_S + 3 \underline{Z}_N = \\ &= (0,44083 + j 0,95 \times 14,09978) \Omega \times 0,99597 + j 66 \Omega = (0,43906 + j 79,34081) \Omega \end{aligned}$$

$$a \underline{Z}_{(0)Q} = (3,10149 + j 17,49822) \Omega$$

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = (1,3909 - j 8,94226) \text{ kA}; \quad I_{k1}'' = 9,04979 \text{ kA}$$

Tento výsledek je též uveden v tabulce 12 pro zkušební síť. Dílčí zkratové proudy na obrázku 5:

$$I_{(1)S}'' = I_{(2)S}'' = \frac{I_{k1}''}{3} \times \frac{\underline{Z}_Q}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_Q} = (0,00109 - j 0,49300) \text{ kA}$$

$$I_{(1)Q}'' = I_{(2)Q}'' = \frac{I_{k1}''}{3} \times \frac{\underline{Z}_S}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_Q} = (0,46255 - j 2,48775) \text{ kA}$$

$$I_{(0)S}'' = \frac{I_{k1}''}{3} \times \frac{\underline{Z}_{(0)Q}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (0,00853 - j 0,55314) \text{ kA}$$

$$I_{(0)Q}'' = \frac{I_{k1}''}{3} \times \frac{\underline{Z}_{(0)S}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (0,45510 - j 2,42761) \text{ kA}$$

Z těchto výsledků, které jsou platné tehdy, pokud je předvídaný přebuzený provoz generátoru se mohou určit následující proudy vedením na straně elektrárenského bloku:

$$I_{L1S}'' = I_{(0)S}'' + I_{(1)S}'' + I_{(2)S}'' = (0,01072 - j 1,53914) \text{ kA}$$

$$I_{L2S}'' = I_{(0)S}'' + \underline{a}^2 I_{(1)S}'' + \underline{a} I_{(2)S}'' = (0,00744 - j 0,06014) \text{ kA}$$

$$I_{L3S}'' = I_{(0)S}'' + \underline{a} I_{(1)S}'' + \underline{a}^2 I_{(2)S}'' = (0,00744 - j 0,06014) \text{ kA}$$

Proud z uzlu transformátoru do zemnicí soustavy:

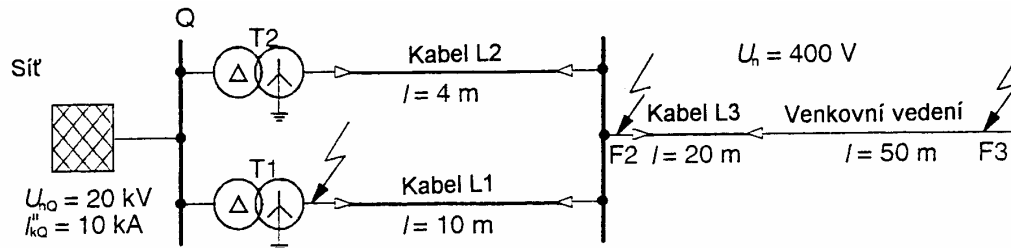
$$I_{L1S}'' + I_{L2S}'' + I_{L3S}'' = 3 I_{(0)S}'' = (0,02560 - j 1,65942) \text{ kA}$$

3 Výpočet zkratových proudů v soustavě nn - $U_n = 400 \text{ V}$

3.1 Příklad

Soustava nn s $U_n = 400 \text{ V}$ a $f = 50 \text{ Hz}$ je uvedena na obrázku 6. Ve zkratových místech F1 až F3 se musí určit zkratové proudy I_k'' a I_p . Lze předpokládat, že zkratové proudy ve zkratových místech F1 až F3 jsou elektrické vzdálené zkraty (viz 1.3.17 IEC 60909-0).

Údaje zařízení pro souslednou, zpětnou a netočivou soustavu jsou uvedeny v tabulce 3.



Obrázek 6 – Soustava $U_n = 400 \text{ V}$ se zkratovými místy F1, F2 a F3

3.2 Určení sousledných impedancí

3.2.1 Síťový napáječ

Podle rovnice (6) IEC 60909-0 s $c_Q = c_{Q_{\max}} = 1,1$ (viz tabulka 1 IEC 60909-0):

$$Z_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \times 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} 10 \text{ kA}} \left(\frac{0,41 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 = 0,534 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Qt} = 0,995 Z_{Qt} = 0,531 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0,1 X_{Qt} = 0,053 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{Qt} = (0,053 + j 0,531) \text{ m}\Omega$$

Tabulka 3 – Údaje elektrického zařízení pro příklad na obrázku 6
Sousledné a netočivé impedance ($\underline{Z}_2 = \underline{Z}_1$)

Zařízení	Údaje zařízení	Rovnice (IEC 60909-0)	$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ mΩ	$\underline{Z}_{(0)}$ mΩ
Síťový napáječ Q	$U_{nQ} = 20 \text{ kV}$; $I_{kQ}'' = 10 \text{ kA}$ $C_Q = C_{Q\max} = 1,1$ (tabulka 1 IEC 60909-0) $R_Q = 0,1 \text{ } \Omega$; $X_Q = 0,995 \text{ } \Omega$	(6)	$Z_{Qt} = 0,053$ $+ j 0,531$	-
Transformátory T1 (Dyn)	$S_{rT} = 630 \text{ kVA}$; $U_{rTHV} = 20 \text{ kV}$ $U_{rTLV} = 410 \text{ V}$; $u_{kr} = 4 \%$; $P_{krT} = 6,5 \text{ kW}$; $R_{(0)T}/R_T = 1,0$ $X_{(0)T}/X_T = 0,95$.	(7) až (9) K_T z (12a)	$\underline{Z}_{T1K} = 2,68$ $+ j 10,054$	$\underline{Z}_{(0)T1K} = 2,68$ $+ j 9,551$
T2 (Dyn)	$S_{rT} = 400 \text{ kVA}$; $U_{rTHV} = 20 \text{ kV}$ $U_{rTLV} = 410 \text{ V}$; $u_{kr} = 4 \%$; $P_{krT} = 4,6 \text{ kW}$; $R_{(0)T}/R_T = 1,0$ $X_{(0)T}/X_T = 0,95$.		$\underline{Z}_{T2K} = 4,712$ $+ j 15,698$	$\underline{Z}_{(0)T2K} = 4,712$ $+ j 14,913$
Vedení L1	Dva paralelní čtyřžilové kabely; $l = 10 \text{ m}$; $4 \times 240 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ $\underline{Z}' = (0,077 + j 0,079) \text{ } \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 3,7 \text{ } \Omega$; $X_{(0)L} = 1,81 \text{ } \Omega$.	Údaje a poměry $R_{(0)L}/R_L$; $X_{(0)L}/X_L$ udává výrobce	$\underline{Z}_{L1} = 0,385$ $+ j 0,395$	$\underline{Z}_{(0)L1} = 1,425$ $+ j 0,715$
L2	Dva paralelní třížilové kabely; $l = 4 \text{ m}$; $3 \times 185 \text{ mm}^2 \text{ Al}$ $\underline{Z}' = (0,208 + j 0,068) \text{ } \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 4,23 \text{ } \Omega$; $X_{(0)L} = 1,21 \text{ } \Omega$.		$\underline{Z}_{L2} = 0,416$ $+ j 0,136$	$\underline{Z}_{(0)L2} = 1,760$ $+ j 0,165$
L3	Čtyřžilový kabel $l = 20 \text{ m}$; $4 \times 70 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ $\underline{Z}' = (0,271 + j 0,087) \text{ } \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 3 \text{ } \Omega$; $X_{(0)L} = 4,46 \text{ } \Omega$.		$\underline{Z}_{L3} = 5,420$ $+ j 1,740$	$\underline{Z}_{(0)L3} = 16,26$ $+ j 7,760$
L4	Venkovní vedení; $l = 50 \text{ m}$; $q_n = 50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$; $d = 0,4 \text{ m}$; $\underline{Z}' = (0,3704 + j 0,297) \text{ } \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 2 \text{ } \Omega$; $X_{(0)L} = 3 \text{ } \Omega$.	(14), (15)	$\underline{Z}_{L4} = 18,50$ $+ j 14,85$	$\underline{Z}_{(0)L4} = 37,04$ $+ j 44,55$

POZNÁMKA: $\Omega/\text{km} = \text{m}\Omega/\text{m}$

3.2.2 Transformátory

Podle rovnic (7) až (9) a (12a) IEC 60909-0 je následující:

a) Transformátor T1:

$$Z_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \times \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = \frac{4\%}{100\%} \times \frac{(410\text{ V})^2}{630\text{ kVA}} = 10,673\text{ m}\Omega$$

$$R_{T1} = \frac{P_{krT1}}{3 I_{rT1LV}^2} = \frac{P_{krT1} \times U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}^2} = \frac{6,5\text{ kW} \times (410\text{ V})^2}{(630\text{ kVA})^2} = 2,753\text{ m}\Omega$$

$$u_{Rr} = (P_{krT1}/S_{rT1}) \times 100\% = 1,032\%; \quad u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{rR}^2} = 3,865\%$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 10,312\text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{T1} = (2,753 + j 10,312)\text{ m}\Omega$$

$$K_{T1} = 0,95 \times \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_{T1}} = 0,95 \times \frac{1,05}{1 + 0,6 \times 0,03865} = 0,975$$

$$\underline{Z}_{T1K} = \underline{Z}_{T1} K_{T1} = (2,684 + j 10,054)\text{ m}\Omega$$

b) Transformátor T2:

$$Z_{T2} = \frac{u_{krT2}}{100\%} \times \frac{U_{rT2LV}^2}{S_{rT2}} = \frac{4\%}{100\%} \times \frac{(410\text{ V})^2}{400\text{ kVA}} = 16,810\text{ m}\Omega$$

$$R_{T2} = \frac{P_{krT2} \times U_{rT2LV}^2}{S_{rT2}^2} = \frac{4,6\text{ kW} \times (410\text{ V})^2}{(400\text{ kVA})^2} = 4,833\text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{T2} = (4,833 + j 16,100)\text{ m}\Omega$$

$$K_{T2} = 0,95 \times \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_{T2}} = 0,95 \times \frac{1,05}{1 + 0,6 \times 0,03831} = 0,975$$

$$\underline{Z}_{T2K} = \underline{Z}_{T2} K_{T2} = (4,712 + j 15,698)\text{ m}\Omega$$

3.2.3 Vedení (kabely a venkovní vedení)

a) Vedení L1 (dva paralelní kabely):

$$\underline{Z}_{L1} = 0,5 (0,077 + j 0,079) \text{ m}\Omega/\text{m} \times 10 \text{ m} = (0,385 + j 0,395) \text{ m}\Omega$$

b) Vedení L2 (dva paralelní kabely):

$$\underline{Z}_{L2} = 0,5 (0,208 + j 0,068) \text{ m}\Omega/\text{m} \times 4 \text{ m} = (0,416 + j 0,136) \text{ m}\Omega$$

c) Vedení L3 (kabel):

$$\underline{Z}_{L3} = (0,271 + j 0,087) \text{ m}\Omega/\text{m} \times 20 \text{ m} = (5,420 + j 1,740) \text{ m}\Omega$$

d) Vedení L4 (venkovní vedení):

$$R'_{L4} = \frac{\rho}{q_n} = \frac{\Omega \text{ mm}^2}{54 \text{ m} \times 50 \text{ mm}^2} = 0,3704 \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,37 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} ; r = 1,14 \sqrt{\frac{q_n}{\pi}} = 4,55 \text{ mm} = 4,55 \cdot 10^{-3} \text{ m};$$

$$X'_{L4} = 2 \pi f \frac{\mu_0}{2 \pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r} \right) = 2 \pi \times 50 \text{ s}^{-1} \frac{4 \pi \times 10^{-4} \text{ H}}{2 \pi \text{ km}} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{0,4 \text{ m}}{4,55 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) = 0,297 \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,297 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\underline{Z}_{L4} = (R'_{L4} + j X'_{L4}) l = (0,370 + j 0,297) \times \text{m}\Omega/\text{m} \times 50 \text{ m} = (18,50 + j 14,85) \text{ m}\Omega$$

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m} = 4 \pi \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

3.3 Určení netočivých impedancí**3.3.1 Transformátory**

Pro transformátory T1 a T2 se zapojením Dyn5 jsou následující vztahy určeny výrobcem:

$$R_{(0)T} = R_T \text{ a } X_{(0)T} = 0,95 X_T \text{ (viz tabulka 3)}$$

Společně s korekčními součiniteli impedancí K_T z 3.2.2 se určí následující netočivé impedance:

$$Z_{(0)T1K} = (R_{T1} + j 0,95 X_{T1}) K_{T1} = (2,684 + j 9,551) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{(0)T2K} = (R_{T2} + j 0,95 X_{T2}) K_{T2} = (4,712 + j 14,913) \text{ m}\Omega$$

3.3.2 Vedení (kabely a venkovní vedení)

a) Vedení L1:

 $R_{(0)L} = 3,7 R_L$; $X_{(0)L} = 1,81 X_L$ se zpětnou cestou čtvrtým vodičem a pláštěm kabelu:

$$Z_{(0)L1} = (3,7 R_{L1} + j 1,81 X_{L1}) = (1,425 + j 0,715) \text{ m}\Omega$$

b) Vedení L2:

 $R_{(0)L} = 4,23 R_L$; $X_{(0)L} = 1,21 X_L$ se zpětnou cestou pomocí pláště kabelu:

$$Z_{(0)L2} = (4,23 R_{L2} + j 1,21 X_{L2}) = (1,760 + j 0,165) \text{ m}\Omega$$

c) Vedení L3:

$R_{(0)L} = 3 R_L$; $X_{(0)L} = 4,46 X_L$ se zpětnou cestou čtvrtým vodičem, pláštěm kabelu a zemí:

$$Z_{(0)L3} = (3 R_{L3} + j 4,46 X_{L3}) = (16,260 + j 7,760) \text{ m}\Omega$$

d) Vedení L4:

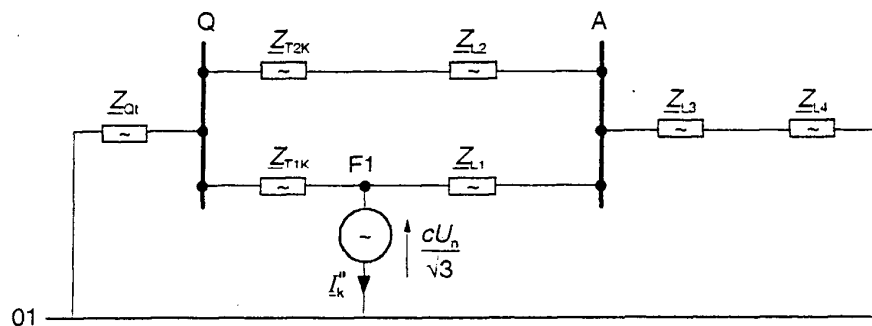
Venkovní vedení s $R_{(0)L} = 2 R_L$ a $X_{(0)L} = 3 X_L$ pro výpočet maximálních zkratových proudů:

$$Z_{(0)L4} = (2 R_{L4} + j 3 X_{L4}) = (37,04 + j 44,55) \text{ m}\Omega$$

3.4 Výpočet I_k'' a i_p trojfázových zkratových proudů

3.4.1 Zkratové místo F1

3.4.1.1 Podle obrázku 7 pro souslednou soustavu je určena následující zkratová impedance v místě zkratu F1:



Obrázek 7 – Schéma sousledné soustavy (podle obrázku 6) pro výpočet I_k'' v místě zkratu F1

Maximální počáteční zkratový proud (rovnice (29) IEC 60909-0) s $c = c_{\max} = 1,05$ (tabulka 1 IEC 60909-0):

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1,05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 7,003 \text{ m}\Omega} = 34,62 \text{ kA}$$

POZNÁMKA Odlišnost proti výsledku IEC 60909-0 je hlavně způsobena jmenovitým napětím 400 V (IEC 60038). Rozdíl s pomocí zavedení K_T je pouze 0,25 %.

Protože je výpočet Z_k proveden v komplexních hodnotách, je snadné určit i_p pomocí metody (b) s použitím poměru R/X v místě zkratu nebo pro vyšší přesnost pomocí metody (c).

3.4.1.2 Metoda (b): Impedanční poměr v místě zkratu (viz 4.3.1.2) IEC 60909-0):

$$R/X = R_k/X_k = 0,279$$

$$\kappa_{(b)} = 1,02 + 0,98 e^{-3R/X} = 1,445 \text{ (rovnice (55) z IEC 60909-0)}$$

Protože poměr R/X $Z_{T2K} + Z_1 + Z_2$ je větší než 0,3 je nutné zavést součinitel 1,15 z metody (b) (viz 4.3.1.2.b) z IEC 60909-0).

$$\dot{i}_{p(b)} = 1,15 \kappa_{(b)} \sqrt{2} I_k'' = 1,15 \times 1,445 \times \sqrt{2} \times 34,62 \text{ kA} = 81,36 \text{ kA}$$

3.4.1.3 Metoda (c): Ekvivalentní kmitočet s R/X z rovnice (59) IEC 60909-0:

Impedance $\underline{Z}_c = R_c + j X_c$ je vypočítána podle metody (c) s ekvivalentním kmitočtem $f_c = 20$ Hz ($f = 50$ Hz). Výpočetní postup je podobný jako při výpočtu \underline{Z}_k , ale s použitím hodnot 20 Hz:

$$\underline{Z}_{Qt_c} = (0,053 + j 0,212) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{T1K_c} = (2,684 + j 4,0212) \text{ m}\Omega; \underline{Z}_{T2K_c} = (4,712 + j 6,279) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{L1_c} = (0,385 + j 0,158) \text{ m}\Omega; \underline{Z}_{L2_c} = (0,416 + j 0,054) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_c = \underline{Z}_{Qt_c} + \frac{\underline{Z}_{T1K_c} (\underline{Z}_{T2K_c} + \underline{Z}_{L1_c} + \underline{Z}_{L2_c})}{\underline{Z}_{T1K_c} + \underline{Z}_{T2K_c} + \underline{Z}_{L1_c} + \underline{Z}_{L2_c}} = (1,8738 + j 2,7076) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} = \frac{1,874 \text{ m}\Omega}{2,707 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,277$$

$$\kappa_{(c)} = 1,02 + 0,98 e^{-3R/X} = 1,447$$

$$\dot{i}_{p(c)} = 1,15 \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_k'' = 1,447 \times \sqrt{2} \times 34,62 \text{ kA} = 70,85 \text{ kA}$$

POZNÁMKA Metoda (a) v tomto případě není dostačující (viz 4.3.1.2) IEC 60909-0). Tato metoda se může použít pouze při první aproximaci pokud je výpočet zkratového proudu proveden pouze s reaktancemi. Metoda (a) vede k $\kappa_{(a)} = 1,46$, která bere v úvahu nejmenší poměry R/X z \underline{Z}_{T1K} a $\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L2} + \underline{Z}_{L1}$. Pokud je síťový napáječ s $R_{Qt}/X_{Qt} = 0,1$ uvažován jako větev sítě, pak součinitel $\kappa_{(a)} = 1,75$ a nárazový zkratový proud $\dot{i}_{p(a)} = 85,5 \text{ kA} > \dot{i}_{p(c)}$ (viz 2.3 IEC 60909-0).

3.4.2 Zkratové místo F2

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Qt} + \frac{(\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{L1}) (\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} = (1,977 + j 6,827) \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1,05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 7,107 \text{ m}\Omega} = 34,12 \text{ kA}$$

Výpočet pomocí metody (c) (viz 4.3.1.2 z IEC 60909-0) vede k:

$$\underline{Z}_c = (1,976 + j 2,733) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} = \frac{1,976 \text{ m}\Omega}{2,733 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,289$$

$$\dot{i}_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_k'' = 1,432 \times \sqrt{2} \times 34,12 \text{ kA} = 69,10 \text{ kA}$$

POZNÁMKA Rozhodující poměr R/X je z největší části určen pomocí dvou větví $\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{L1}$ a $\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L2}$ s $R/X = 0,294$ a $0,324$. Tyto dva poměry jsou podobné s $R_k/X_k = 0,29$, který vede k $\kappa_{(b)} = 1,431$. Výpočet metodou (b) bez doplňujícího součinitele 1,15 vede k

$$\dot{i}_{p(b)} = \kappa_{(b)} \sqrt{2} I_k'' = 1,431 \times \sqrt{2} \times 34,12 \text{ kA} = 69,05 \text{ kA}$$

3.4.3 Zkratové místo F3

$$\underline{Z}_K = \underline{Z}_{Qt} + \frac{(\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{L1})(\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} + \underline{Z}_{L3} + \underline{Z}_{L4} = (25,897 + j 23,417) \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_K} = \frac{1,05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 34,914 \text{ m}\Omega} = 6,95 \text{ kA}$$

$$\underline{Z}_c = \underline{Z}_{F2c} + \underline{Z}_{L3c} + \underline{Z}_{L4c} = (1,976 + j 2,733) \text{ m}\Omega + (23,920 + j 6,636) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} = \frac{25,896 \text{ m}\Omega}{9,369 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 1,106$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_k'' = 1,056 \times \sqrt{2} \times 6,95 \text{ kA} = 10,38 \text{ kA}$$

3.5 Výpočet I_{k1}'' a i_{p1} u jednofázových zkratů

3.5.1 Zkratové místo F1

Obrázek 8 znázorňuje ekvivalentní obvod v sousledné, zpětné a netočivé soustavě sítě na obrázku 6 s jednofázovým zkratem v místě F1.

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1,881 + j 6,764) \text{ m}\Omega \quad (\text{viz 3.4.1})$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)T1K} (\underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}) / (\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}) = (2,140 + j 6,009) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} = 2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} = (5,902 + j 19,537) \text{ m}\Omega$$

Počáteční jednofázový zkratový proud je vypočítán podle rovnice (53) IEC 60909-0:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1,05 \times 400 \text{ V}}{20,409 \text{ m}\Omega} = 35,64 \text{ kA}$$

Nárazový zkratový proud i_{p1} je vypočítán s pomocí součinitele $\kappa_{(c)} = 1,447$ určeného ze sousledné soustavy v 3.4.1:

$$i_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}'' = 1,447 \times \sqrt{2} \times 35,64 \text{ kA} = 72,93 \text{ kA}$$

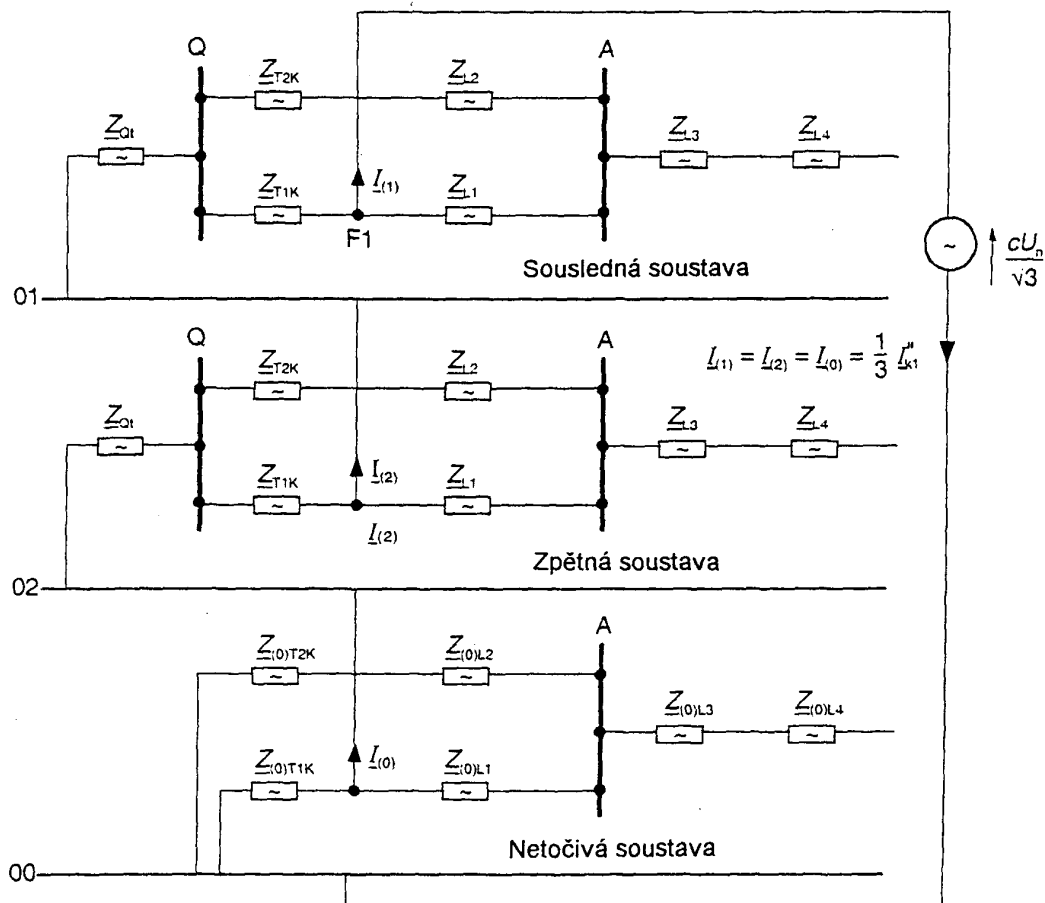
POZNÁMKA Pokud se bere \underline{Z}_c a $\underline{Z}_{(0)c2}$ pro podrobnější výpočet k určení $\kappa_{(c)}$ a $i_{p1(c)}$ mohou se určit následující výsledky:

$$\frac{R}{X} = \frac{2R_c + R_{(0)C}}{2X_c + X_{(0)C}} \times \frac{f_c}{f} = \frac{5,828 \text{ m}\Omega}{7,875 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,296$$

$$\kappa_{(c)} = 1,02 + 0,98 e^{-3R/X} = 1,447$$

$$i_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}'' = 1,447 \times \sqrt{2} \times 35,64 \text{ kA} = 72,93 \text{ kA}$$

V tomto případě je odlišnost pouze 1,7 %.



Obrázek 8 – Schéma sousledné, zpětné a netočivé soustavy se spojením v zkratovém místě F1 pro výpočet I_{k1}''

3.5.2 Zkratové místo F2

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1,977 + j 6,827) \text{ m}\Omega \text{ (viz 3.4.2)}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)L1})(\underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} = (2,516 + j 6,109) \text{ m}\Omega$$

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1,05 \times 400 \text{ V}}{20,795 \text{ m}\Omega} = 34,98 \text{ kA}$$

$$I_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}'' = 1,432 \times \sqrt{2} \times 34,98 = 70,84 \text{ kA}$$

3.5.3 Zkratové místo F3

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (25,897 + j 23,417) \text{ m}\Omega \text{ (viz 3.4.3)}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)F2} + \underline{Z}_{(0)L3} + \underline{Z}_{(0)L4} = (55,816 + j 58,419) \text{ m}\Omega$$

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2 Z_{(1)} + Z_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1,05 \times 400 \text{ V}}{150,550 \text{ m}\Omega} = 4,83 \text{ kA}$$

$$I_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}'' = 1,056 \times \sqrt{2} \times 4,83 = 7,21 \text{ kA}$$

3.6 Soubor výsledků

Soubor výsledků pro příklad na obrázku 6 je uveden v tabulce 4a pro zkratové impedance a proudy a v tabulce 4b pro Jouleův Integrál (rovnice (102) IEC 60909-0).

Tabulka 4a – Zkratové impedance a zkratové proudy

Místo zkratu	$Z_k = Z_{(1)}$	$Z_{(0)}$	I_k''	$I_{p(c)}$	I_{k1}''	$I_{p1(c)}$	I_{k1}'' / I_k''
	mΩ	mΩ	kA	kA	kA	kA	-
F1	7,003	6,421	34,62	70,85	35,64	72,93	1,03
F2	7,107	6,601	34,12	69,10	34,98	70,84	1,03
F3	34,929	80,79	6,95	10,38	4,83	7,21	0,70

Jouleův integrál je vypočítán v místě zkratu F2 a F3 na obrázku 6 s použitím součinitelů m a n uvedenými na obrázcích 21 a 22 v IEC 60909-0. Součinitel m je vypočítán pomocí rovnice pro m uvedenou v příloze A IEC 60909-0. Mezní vypínací časy (doba trvání zkratového proudu T_k) pro pojistky jsou určeny z daných charakteristik pro nn pojistky 250 A.

Tabulka 4b – Jouleův integrál, který závisí na T_k a místě zkratu F2 a F3

Místo zkratu		Typ ochrany	T_k	κ	m 1)	n 2)	Jouleův integrál (rovnice (102) v IEC 60909-0
	kA	-	S	-	-	-	(kA) ² s
F2	$I_k'' = 34,12$	jistice 250 A	0,06	1,43	0,197	1	83,61
F3	$I_k'' = 6,95$		0,06	1,06	0,059	1	3,07
F3	$I_k'' = 4,83$		0,06	1,06	0,059	1	1,48
F2	$I_k'' = 34,12$	pojistka 250 A	<0,005	-	-	-	<0,56 ³⁾
F3	$I_k'' = 6,95$		0,02	1,06	0,178	1	1,19
F3	$I_{k1}'' = 4,83$		0,07	1,06	0,051	1	1,72

¹⁾ Vypočítané z rovnice pro m (viz příloha A v IEC 60909-0).

²⁾ Vzdálený zkrat: $I_k = I_k''$ a $n = 1$.

³⁾ Mezní vypínací časy pojistky.

POZNÁMKA S danou dobou trvání zkratu T_k , jako například u jističe, se maximální Jouleův integrál vyskytne u největšího zkratového proudu. Kdežto u extrémních inverzních charakteristik, jako je například pojistka, se největší Jouleův Integrál vyskytne při nejmenším zkratovém proudu, kterým může být jednoduchý jednofázový zkrat, jako je na příkladu v místě zkratu F3.

4 Výpočet trojfázových zkratových proudů v soustavě vn s vlivem motorů

4.1 Příklad

Soustava 33 kV/6 kV (50 Hz) je uvedena na obrázku 9. Výpočet zkratového proudu se musí provést s uvažováním asynchronních motorů a bez asynchronních motorů napájených z 6 kV přípojnice pro znázornění jejich příspěvku ke zkratovým proudům v místě zkratu F.

Rozvodna 33 kV/6 kV se dvěma síťovými transformátory $S_{rT} = 15$ MVA, každý je napájen pomocí dvou třížilových 30 kV kabelů ze síťového napáječe s $U_{nQ} = 33$ kV a $I_{kQ}'' = 13,12$ kA ($S_{kQ}'' = \sqrt{3} U_{kQ} I_{kQ}'' = 750$ MVA (viz 1.3.6 IEC 60909-0)). Informace o síťové napáječi jsou udány rozvodným podnikem, vypočítaném podle IEC 60909-0.

K znázornění rozdílů jsou provedeny výpočty jak s komplexními impedancemi (viz 4.2) tak pouze s reaktancemi (viz 4.3). Výpočty s reaktancemi jsou vyhovující pro většinu případů na úrovni vn a vvn. Dále je výpočet proveden s hodnotami v poměrných jednotkách. (viz 4.4). Výpočet zkratového proudu pomocí superpoziční metody je uveden ve 4.5 pro ukázkou toho, že výsledky zkratových proudů závisí na směru zatížení, napětí v místě zkratu před zkratem a poloze odboček transformátoru při zatížení (viz obrázek 9).

Obrázek 9 udává schéma trojfázové střídavé soustavy 33 kV/6 kV a údaje elektrických zařízení.

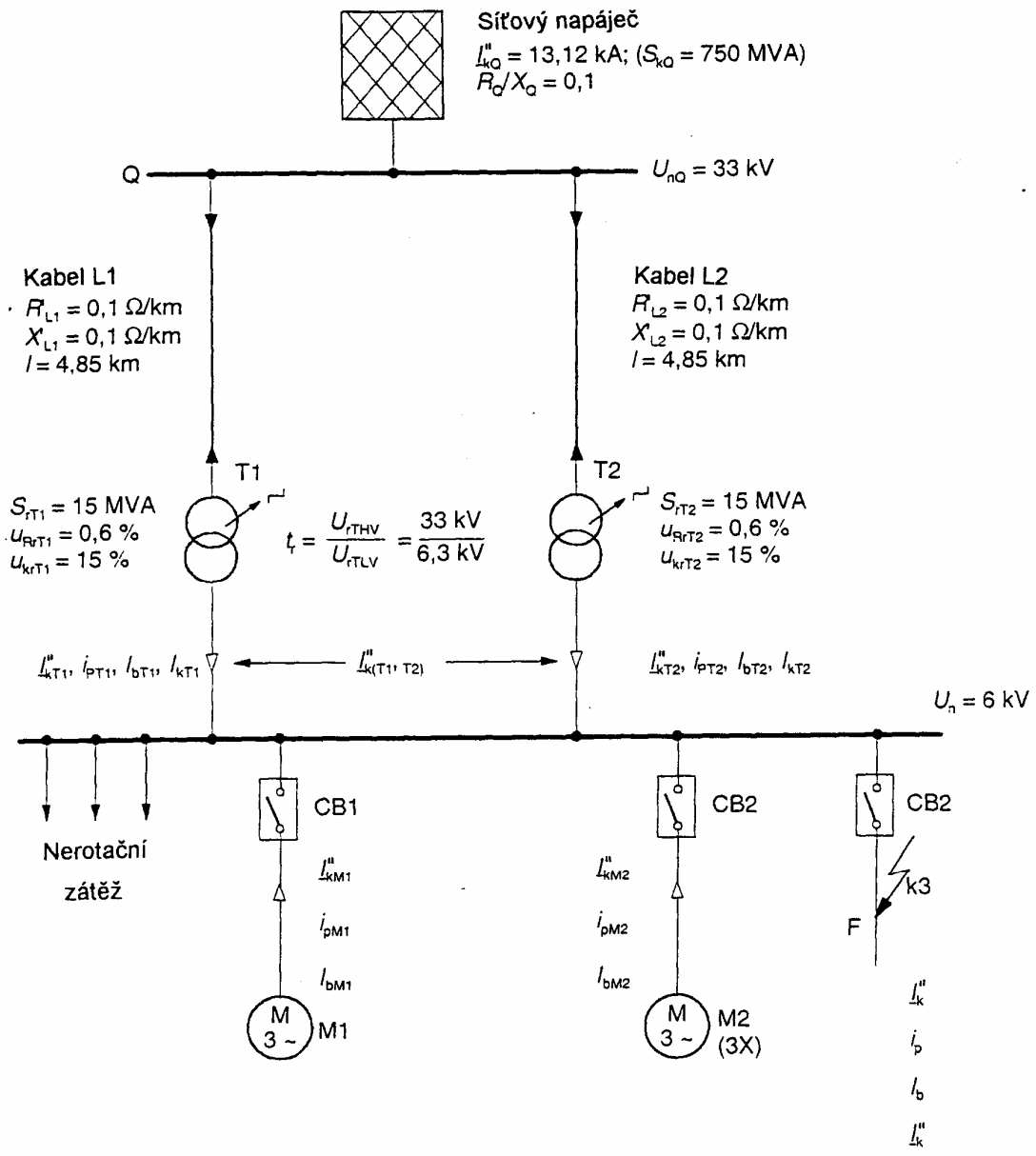
4.2 Výpočet s absolutními hodnotami

Zkratové impedance v tabulce 5 jsou vypočítány z údajů na obrázku 9 a s pomocí rovnic uvedených v IEC 60909-0.

Zkratový proud I_k'' v místě zkratu F je určen z dílčích zkratových proudů na obrázku 9 (viz 4.2.1.2 IEC 60909-0).

$$I_k'' = I_{kT1}'' + I_{kT2}'' + I_{kM1}'' + I_{kM2}''$$

I_{kM2}'' je dílčí zkratový proud od tří paralelních motorů s $P_{rM} = 1$ MW (obrázek 9), znázorněných jedním ekvivalentním motorem M2.



Obrázek 9 – Soustava 33 kV/6 kV: data

Tabulka 5 – Výpočet zkratových impedancí elektrických zařízení a $\underline{Z}_{k(T1,T2)}$ v místě zkratu F, bez motorů (vypínače CB1 a CB2 jsou rozepnuty)

Číslo	Zařízení	Rovnice (IEC 60909-0) a výpočet	Impedance Ω
1	Síťový napáječ	$(6) Z_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \times 33 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 13,12 \text{ kA}} \times \left(\frac{6,3 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} \right)^2$ $X_{Qt} = 0,995 Z_{Qt}; R_{Qt} = 0,1 X_{Qt}$ $\underline{Z}_{Qt} = R_{Qt} + j X_{Qt}$	(0,0582) 0,0058 + j 0,0579
2	Kabel L1 (= kabel L2)	$R_{L1t} = R_{L1} l (1/t_r^2) = 0,1 \Omega/\text{km} \times 4,85 \text{ km} (6,3 \text{ kV}/33 \text{ kV})^2$ $X_{L1t} = X_{L1} l (1/t_r^2) = 0,1 \Omega/\text{km} \times 4,85 \text{ km} (6,3 \text{ kV}/33 \text{ kV})^2$ $\underline{Z}_{L1t} = R_{L1t} + j X_{L1t}$	0,0177 + j 0,0177
3	Transformátor T1 (= transformátor T2)	$(7) Z_{T1} = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{15\%}{100\%} \times \frac{(6,3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ $(8) R_{T1} = \frac{u_{Rr}}{100\%} \times \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{0,6\%}{100\%} \times \frac{(6,3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ $(9) X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2}$ $(12a) K_T = 0,95 (c_{max}/(1 + 0,6 \times 0,1499)) = 0,958$ $\underline{Z}_{T1K} = (R_{T1t} + j X_{T1t}) K_T$	(0,3969) (0,0159) (0,3966) 0,0152 + j 0,3803
4	L1 + T1 = L2 + T2	$\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1K} = \underline{Z}_{L2t} + \underline{Z}_{T2K}$	0,0329 + j 0,3980
5	(L1 + T1) (L2 + T2) paralelně	$\frac{1}{2} (\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1K})$	0,0165 + j 0,1990
6	Zkratová impedance bez motorů	$\underline{Z}_{k(T1,T2)} = \underline{Z}_{Qt} + 1/2 (\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1K})$	0,0223 + j 0,2569
7	Motor M1 Motor M2 (tři jednotky 1 MW)	$(26) Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{4} \times \frac{(6 \text{ kV})^2}{6 \text{ MVA}}$ $s S_{rM} = P_{rM}/(\cos \varphi_{rM} \eta_{rM}) = 6 \text{ MVA}$ $(26) Z_{M2} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{5,5} \times \frac{(6 \text{ kV})^2}{1,28 \text{ MVA}}$ $s S_{rM} = P_{rM}/(\cos \varphi_{rM} \eta_{rM}) = 1,28 \text{ MVA}$	1,500 1,705

Součet $I_{kT1}'' + I_{kT2}''$ na sekundární straně transformátorů je určen z $Z_{k(T1,T2)}$ z tabulky 5.

$$I_{kT1}'' + I_{kT2}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1,1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,0223 + j0,2569) \Omega} = (1,28 - j14,72) \text{ kA}$$

$$I_{k(T1,T2)}'' = |I_{kT1}'' + I_{kT2}''| = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1,1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 0,2579 \Omega} = 14,78 \text{ kA}$$

Dílič zkratové proudy motorů jsou určeny z Z_{M1} a Z_{M2} s použitím $R_M = 0,1 X_M$ a $X_M = 0,995 Z_M$ (viz (viz 3.8.1 IEC 60909-0) pro asynchronní motory s $P_{rM}/p \geq 1 \text{ MW}$).

$$I_{kM1}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1,1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times (0,149 + j1,493) \Omega} = (0,25 - j2,53) \text{ kA}$$

$$I_{kM2}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1,1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times (0,170 + j1,696) \Omega} = (0,22 - j2,22) \text{ kA}$$

Sečtení díličích zkratových proudů $I_{kT1}'' + I_{kT2}''$, $I_{kM1}'' + I_{kM2}''$ vede k

$$I_k'' = (1,75 - j19,47) \text{ kA} \qquad I_k'' = 19,55 \text{ kA}$$

Podle 4.3.1.1 a rovnice (57) IEC 60909-0 je nárazový zkratový proud určen následovně:

$$I_p = I_{p(T1,T2)} + I_{pM1} + I_{pM2} = (37,21 + 6,29 + 5,52) \text{ kA} = 49,02 \text{ kA}$$

s díličími zkratovými proudy

$$I_{p(T1,T2)} = \kappa \sqrt{2} I_{k(T1,T2)}'' = 1,78 \times \sqrt{2} \times 14,78 \text{ kA} = 37,21 \text{ kA}$$

s $R/X = 0,022 \Omega/0,257 \Omega$ a $\kappa = 1,78$ (rovnice (55) IEC 60909-0)

$$I_{pM1} = \kappa \sqrt{2} I_{k(M1)}'' = 1,75 \times \sqrt{2} \times 2,54 \text{ kA} = 6,29 \text{ kA}$$

s $R_{M1}/X_{M1} = 0,1$ a $\kappa = 1,75$ (tabulka 3 IEC 60909-0)

$$I_{pM2} = \kappa \sqrt{2} I_{k(M2)}'' = 1,75 \times \sqrt{2} \times 2,23 \text{ kA} = 5,52 \text{ kA}$$

s $R_{M2}/X_{M2} = 0,1$ a $\kappa = 1,75$ (tabulka 3 IEC 60909-0)

Podle 4.5.2 a rovnic (70) a (73) z IEC 60909-0 je souměrný vypínací zkratový proud pro minimální dobu vypnutí $t_{\min} = 0,1 \text{ s}$ určen následovně:

$$I_b = I_{b(T1,T2)} + I_{bM1} + I_{bM2} = I_{k(T1,T2)}'' + \mu_{M1} Q_{M1} I_{kM1}'' + \mu_{M2} Q_{M2} I_{kM2}''$$

$$I_b = (14,78 + 0,80 \times 0,68 \times 2,54 + 0,72 \times 0,57 \times 2,23) \text{ kA} = 17,08 \text{ kA}$$

$$s \mu_{M1} = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 \times 4,4} = 0,80$$

$$q_{M1} = 0,57 + 0,12 \times \ln 2,5 = 0,68$$

$$\mu_{M2} = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 \times 6,05} = 0,72$$

$$q_{M2} = 0,57 + 0,12 \times \ln 1,0 = 0,57$$

Maximální klesající stejnosměrná složka $i_{d.c.}$ zkratového proudu při $t = t_{\min} = 0,1 \text{ s}$ se může vypočítat s pomocí rovnice (64) IEC 60909-0.

$$\dot{i}_{d.c.} = \dot{i}_{d.c.(T1,T2)} + \dot{i}_{d.c.M1} + \dot{i}_{d.c.M2} = (1,420 + 0,155 + 0,137) \text{ kA} = 1,71 \text{ kA}$$

$$s \dot{i}_{d.c.(T1,T2)} = \sqrt{2} I_{k(T1,T2)} e^{-2\pi f t (R/X)} = 1,420 \text{ kA}$$

$$\dot{i}_{d.c.M1} = \sqrt{2} I_{kM1} e^{-2\pi f t (R/X)} = 0,155 \text{ kA} \quad R/X = R_{M1}/X_{M1}$$

$$\dot{i}_{d.c.M2} = \sqrt{2} I_{kM2} e^{-2\pi f t (R/X)} = 0,136 \text{ kA} \quad R/X = R_{M2}/X_{M2}$$

Tato stejnosměrná složka je menší než I_b .

Protože asynchronní motory nepřispívají k ustálenému zkratovému proudu ($I_{kM1} = 0$, $I_{kM2} = 0$) v případě zkratu na svorkách, pak ustálený zkratový proud v místě F:

$$I_k = I_{k(T1,T2)} + I_{kM1} + I_{kM2} = I_{k(T1,T2)} = 14,78 \text{ kA}$$

4.3 Výpočet s reaktancemi elektrických zařízení

Výpočet pouze s reaktancemi elektrických zařízení je výhodný v případě, že $R_k < 0,3 X_k$ (viz 4.2.1.1 IEC 60909-0). Tato podmínka je splněna v případě údajů uvedených na obrázku 9.

Tabulka 6 udává přibližné výpočetní metody k určení $X_{k(T1,T2)}$ bez vlivu asynchronních motorů (CB1 a CB2 jsou vypnuty).

Tabulka 6 – Výpočet zkratových reaktancí elektrických zařízení a $X_{k(T1,T2)}$ v místě zkratu F

Číslo	Zařízení	Rovnice (IEC 60909-0) a výpočet	Reaktance Ω
1	Síťový napáječ ($X_Q = Z_Q$)	(6) $X_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \times 33 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 13,12 \text{ kA}} \times \left(\frac{6,3 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} \right)^2$	0,0582
2	Kabel L1	$X_{L1t} = X_{L1} \cdot l \cdot (1/t_r^2) = 0,1 \text{ } \Omega/\text{km} \times 4,85 \text{ km} (6,3 \text{ kV}/33 \text{ kV})^2$	0,0177
3	Transformátor T1 ($X_T \approx Z_T$)	(7) $X_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \times \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = \frac{15\%}{100\%} \times \frac{(6,3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ (12a) $K_T = 0,95 (c_{max}/(1 + 0,6 \times 0,15)) = 0,959$ $X_{T1K} = X_{T1} K_T$	(0,3969) 0,3805
4	$L1 + T1 = L2 + T2$	$X_{L1t} + X_{T1K} = X_{L2t} + X_{T2K}$	0,3982
5	$(L1 + T1) \parallel$ $(L2 + T2)$	$\frac{1}{2} (X_{L1t} + X_{T1K})$	0,1991
6	Zkratová impedance bez motorů	$X_{k(T1,T2)} = X_{Qt} + 1/2 (X_{L1t} + X_{T1K})$	0,2573

Zkratový proud $I_{k(T1,T2)}''$ bez motorů:

$$I_{k(T1,T2)}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} X_{k(T1,T2)}} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 0,2573 \text{ } \Omega} = 14,81 \text{ kA}$$

Tento výsledek se liší o +0,2 % od výsledku určeného v 4.2 a je způsobený malými poměry R/X transformátorů.

Reaktance a dílčí zkratové proudy motorů jsou:

$$X_{M1} \approx \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{4} \times \frac{(6 \text{ kV})^2}{6 \text{ MVA}} = 1,5 \text{ } \Omega; I_{kM1}'' = 2,54 \text{ kA}$$

$$X_{M2} \approx \frac{1}{3} \times \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{5,5} \times \frac{(6 \text{ kV})^2}{1,28 \text{ MVA}} = 1,705 \text{ } \Omega; I_{kM2}'' = 2,23 \text{ kA}$$

Pokud asynchronní motory přispívají ke zkratovému proudu v místě zkratu F (CB1 a CB2 zapnuty), pak celkový zkratový proud v F je určen následovně:

$$I_k'' = I_{k(T1,T2)}'' + I_{kM1}'' + I_{kM2}'' = (14,81 + 2,54 + 2,23) \text{ kA} = 19,58 \text{ kA}$$

Tento výsledek je přibližně stejný jako výsledek v 4.2 ($I_k'' = 19,55 \text{ kA}$).

Nárazový zkratový proud je přibližně určen s pomocí R/X transformátorů: $R_T/X_T = u_{Rr}/u_{kr} = 0,6\%/15\% = 0,04$ (na straně bezpečnosti) a $R_M/X_M = 0,1$.

$$I_p = I_{p(T1,T2)} + I_{pM1} + I_{pM2} = (39,57 + 6,29 + 5,52) \text{ kA} = 51,38 \text{ kA}$$

$$s \ I_{p(T1,T2)} = \kappa_{(T1,T2)} \sqrt{2} I_{k(T1,T2)}'' = 1,89 \times \sqrt{2} \times 14,81 \text{ kA} = 39,57 \text{ kA}$$

$$I_{pM1} = \kappa_{(M1)} \sqrt{2} I_{k(M1)}'' = 1,75 \times \sqrt{2} \times 2,54 \text{ kA} = 6,29 \text{ kA}$$

$$I_{pM2} = \kappa_{(M2)} \sqrt{2} I_{k(M2)}'' = 1,75 \times \sqrt{2} \times 2,23 \text{ kA} = 5,52 \text{ kA}$$

Tento výsledek ($I_p = 51,38 \text{ kA}$) je o 5 % vyšší než je výsledek v 4.2 s výpočtem v komplexních hodnotách ($I_p = 49,02 \text{ kA}$).

Výpočet proudů I_p a I_k je znázorněn v 4.2.

4.4 Výpočet v poměrných jednotkách

Protože je vhodné v tomto případě uvažovat pouze reaktance, pokud se počítají zkratové proudy jak je ukázáno ve 4.2 a 4.3, musí být tento výpočet (v poměrných jednotkách) proveden s reaktancemi elektrických zařízení.

Pro výpočet v poměrných jednotkách (p.j.) se musí vybrat dvě referenční hodnoty. Tyto referenční hodnoty (index R) musí být:

$$U_R = U_n = 6 \text{ kV nebo } 33 \text{ kV} \quad \text{a} \quad S_R = 100 \text{ MVA.}$$

Poměrné jednotky (se znakem [*] před symbolem) jsou pak definovány následovně:

$$* U = \frac{U}{U_R}; \quad * I = \frac{I \times U_R}{S_R}; \quad * Z = \frac{Z \times S_R}{U_R^2}; \quad * S = \frac{S}{S_R}$$

Pokud soustava není koherentní, to znamená, že $U_{rTHV}/U_{rTLV} \neq U_{nHV}/U_{nLV}$, pak jmenovitý převod transformátoru vztažený k p.j. napětí:

$$* t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \times \frac{U_{R,6kV}}{U_{R,33kV}} = \frac{33 \text{ kV}}{6,3 \text{ kV}} \times \frac{6 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} = 0,9524$$

Reaktance a zkratové proudy asynchronních motorů v p.j. jsou ($U_{rM} = U_R = 6$ kV):

$$* X_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{S_R}{S_{rM}} = \frac{1}{4} \times \frac{100 \text{ MVA}}{6 \text{ MVA}} = 4,167 \text{ p.j.}$$

$$* X_{M2} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{S_R}{S_{rM}} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{5,5} \times \frac{100 \text{ MVA}}{1,28 \text{ MVA}} = 4,735 \text{ p.j.}$$

$$* I_{kM1}'' = \frac{c \times U_R}{\sqrt{3} \times X_{M1}} = \frac{1,1 \times 1 \text{ p.j.}}{\sqrt{3} \times 4,167 \text{ p.j.}} = 0,1524 \text{ p.j.}; \quad I_{kM1}'' = * I_{kM1}'' (S_R/U_R) = 2,54 \text{ kA}$$

$$* I_{kM2}'' = \frac{c \times U_R}{\sqrt{3} \times X_{M2}} = \frac{1,1 \times 1 \text{ p.j.}}{\sqrt{3} \times 4,735 \text{ p.j.}} = 0,134 \text{ p.j.}; \quad I_{kM2}'' = * I_{kM2}'' (S_R/U_R) = 2,23 \text{ kA}$$

Pokud asynchronní motory přispívají ke zkratovému proudu v místě F, pak

$$* I_k'' = * I_{k(T1,T2)}'' + * I_{kM1}'' + * I_{kM2}'' = (0,8884 + 0,1524 + 0,134) \text{ p.j.} = 1,1748 \text{ p.j.}$$

$$I_k'' = * I_k'' (S_R/U_R) = 1,1748 \text{ p.j.} (100 \text{ MVA}/6 \text{ kV}) = 19,58 \text{ kA}$$

Tento výsledek v poměrných jednotkách je stejný jako ve 4.2.

POZNÁMKA Pokud nebyl v tomto případě brán v úvahu korekční součinitel K_T ($K_T = 1,0$), výsledek byl $I_{k(T1,T2)}'' = 14,35 \text{ kA} = 0,97 \times 14,81 \text{ kA}$.

Pokud byl výpočet proveden bez $*t_r$ ($*t_r = 1,0$), ale s $K_T = 0,959$, pak výsledek byl $I_{k(T1,T2)}'' = 16,33 \text{ kA} = 1,10 \times 14,81 \text{ kA}$.

4.5 Výpočet pomocí superpoziční metody

Základní postup pro určení zkratových proudů a dílčích zkratových proudů pomocí superpoziční metody je uveden v IEC 60909-1.

Zkratové proudy závisí na zatížení před zkratem, provozním napětí soustavy 33 kV a 6 kV a na poloze přepínače odboček při zatížení transformátorů (obrázek 9). Následující informace jsou též uvedeny v 4.1 a obrázku 9 (jsou nezbytné pro superpoziční metodu):

a) Transformátor T1, T2:

přepínač odboček při zatížení $p_T = \pm 18 \%$, $u_{k+} = 16,5 \%$ při $+p_T$ a $u_{k-} = 14,0 \%$ při $-p_T$.

b) Proudů na 6 kV přípojnicí před zkratem (znak b):

$$\dot{I}^b = (0 \dots 2,75) \text{ kA s } \cos\varphi^b = 0,8 \text{ nebo } \cos\varphi^b = 0,9 \text{ určeny z } \underline{S}^b = \sqrt{3} U^b \dot{I}^b.$$

c) Provozní napětí před zkratem:

$$U^b = (6 \dots 6,6) \text{ kV}; \quad U_n = 6 \text{ kV}; \quad U_m = 7,2 \text{ kV (IEC 60038)}$$

$$U^b = (30 \dots 36) \text{ kV}; \quad U_n = 33 \text{ kV}; \quad U_m = 36 \text{ kV (IEC 60038)}$$

Dílčí zkratový proud $I_{k(T1,T2)}''$ napájený z obou transformátorů vypočítaný superpoziční metodou (index S) je určen superpozicí proudu $I_{(T1,T2)}^b$ před zkratem a proudem $I_{k(T1,T2)Ub}''$, který závisí na napětí U^b :

$$I_{k(T1,T2)S}'' = I_{(T1,T2)}^b + I_{k(T1,T2)Ub}'' = I_{(T1,T2)}^b + \frac{U^b}{\sqrt{3} \left[0,5 Z_T(t) + \frac{1}{t^2} (Z_Q + 0,5 Z_L) \right]} \quad (1)$$

Impedance $Z_T(t) = Z_{T1}(t) = Z_{T2}(t)$ transformátorů (bez korekčního součinitele) závisí na skutečném transformačním poměru t ($u_{k+} \geq u_k(t) \geq u_k$).

Vztah mezi napětími U_Q^b a U^b v nejbližším zkratovém místě je dán následující rovnicí:

$$U_Q^b = t \left[U^b + \sqrt{3} I^b \left(0,5 Z_T(t) + \frac{1}{t^2} 0,5 Z_L \right) \right] \quad (2)$$

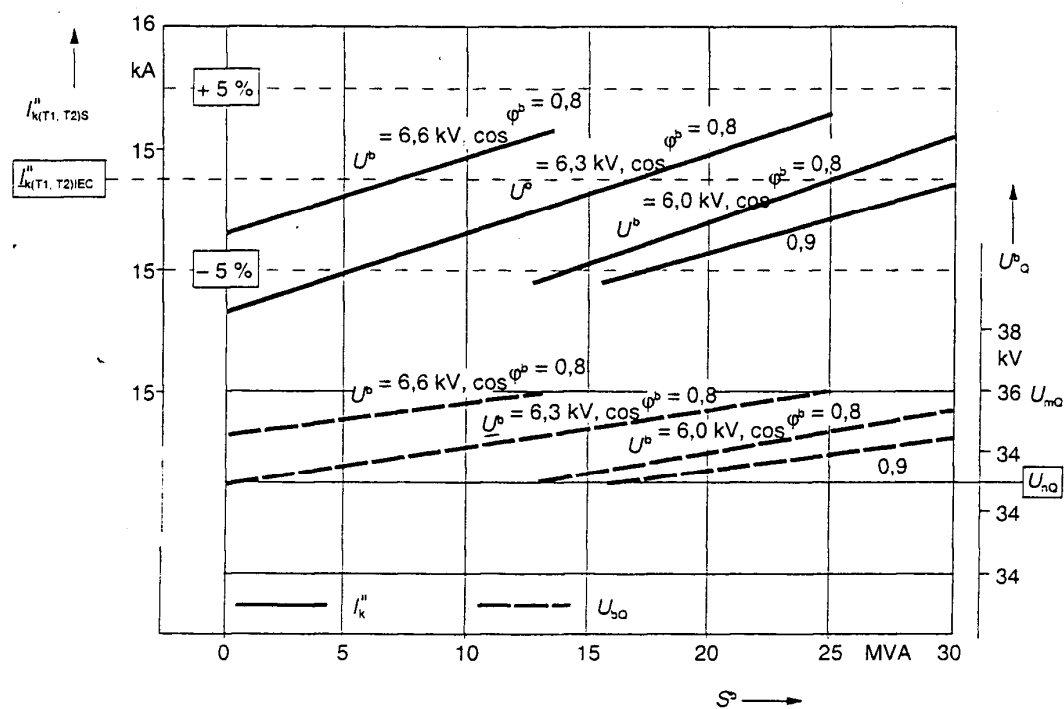
Obrázek 10 udává první případ výsledků podle rovnice (1) a (2) pokud je přepínač odboček v hlavní poloze ($t = t_r = 33 \text{ kV}/6,3 \text{ kV} = 5,238$ a $u_k(t) = u_{kr} = 15 \%$, $u_{Rr} = 0,6 \%$), závisící na S^b ($\cos \varphi^b = 0,8$) a na napětí U^b jako parametru. Kromě toho, vliv $\cos \varphi^b$ je indikován pro příklad $U^b = 6,0 \text{ kV}$. To předpokládá, že napětí U_Q^b má hodnoty mezi 33 kV (U_{nQ}) a 36 kV (U_{mQ}).

Obrázek 11 udává výsledky pro zkratové proudy I_{kS}'' určené pomocí superpoziční metody v místě zkratu F (obrázek 9) jestliže jsou zahrnuty motory (M1 a M2) a přepínač odboček při zatížení má různé polohy. Kromě toho, $u_k(t)$ je uveden na nižší straně obrázku. Při zkratu, proud před zkratem je nulový, pak celkový zkratový proud v místě zkratu je určen následovně:

$$I_{kS}'' = I_{k(T1,T2)S}'' + I_{k(M1,M2)Ub}'' \quad (3)$$

$$I_{k(M1,M2)Ub}'' = \frac{U_b}{\sqrt{3} \frac{Z_{M1} Z_{M2}}{Z_{M1} + Z_{M2}}} \quad (4)$$

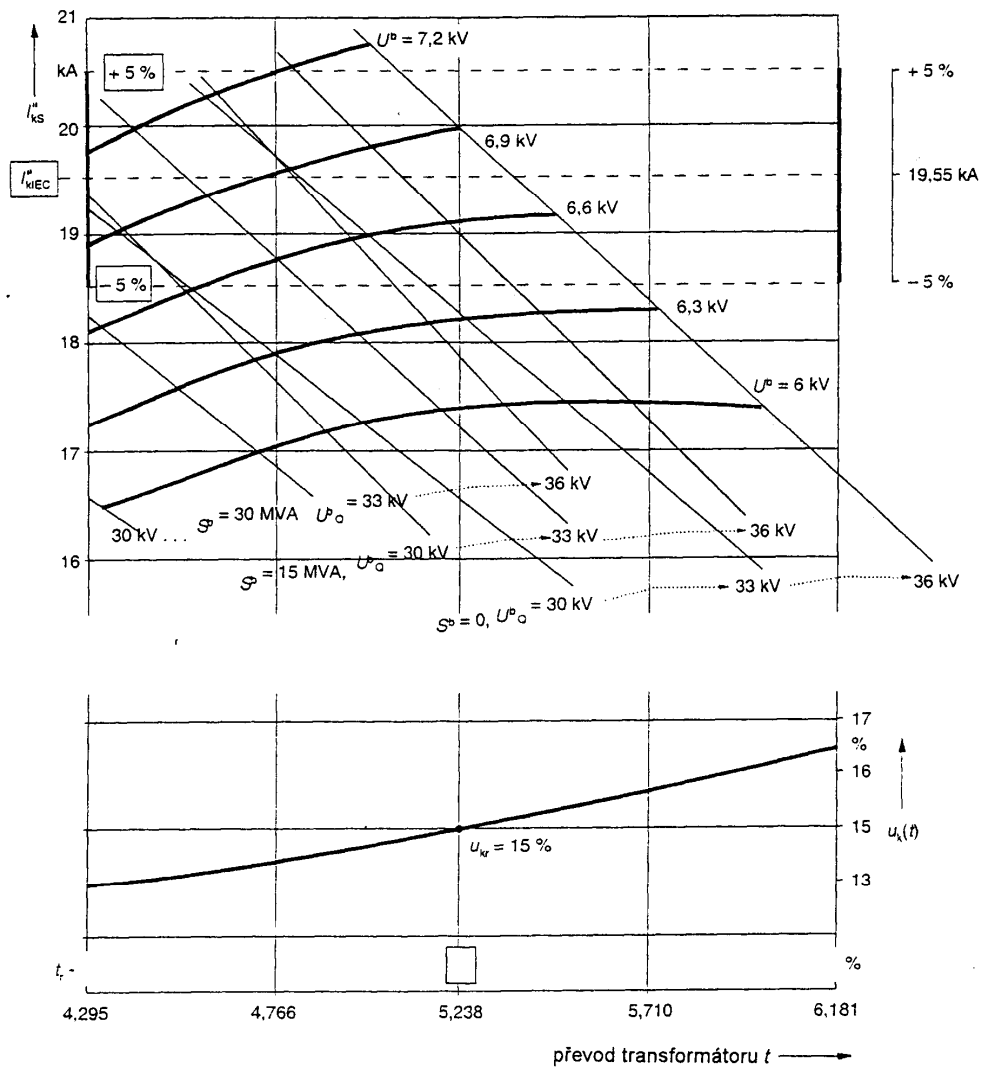
a $I_{k(T1,T2)Ub}''$ podle rovnice (1).



Obrázek 10 – Zkratový proud $I_{k(T1,T2)}''$ vypočítaný pomocí superpoziční metody (S) v porovnání s $I_{k(T1,T2)IEC}''$ vypočítané pomocí metody ekvivalentního zdroje v místě zkratu, které závisí na zatížení S^b a napětí U^b

Provozní napětí je na obrázku vyneseno. Přepínač transformátorů je v hlavní poloze.

Jako příklady jsou uvedeny zatížení: $S^b = 0$, $S^b = 15 \text{ MVA}$ a $S^b = 30 \text{ MVA}$ při $\cos \varphi^b = 0,8$, uvažuje se rozsah napětí mezi $U_Q^b = 30 \text{ kV}$ a $U_Q^b = 36 \text{ kV} = U_{mQ}$. Zvláště maximální napětí $U_Q^b = U_{mQ}$ je omezující pro možné zkratové proudy na obrázku 11.



Obrázek 11 – Zkratový proud I_{ks}'' vypočítaný pomocí superpoziční metody (S) v porovnání s $I_{k(T1,T2)IEC}$ vypočítané pomocí metody ekvivalentního zdroje v místě zkratu, které závisí na převodu transformátoru t před zkratem. Motory jsou uvažovány. Přepínač odboček transformátoru upravený na zatížení S^b ($\cos\phi^b = 0,8$) a napětí U^b

5 Výpočet zkratových proudů pro elektrárenskou jednotku a vlastní spotřebu

5.1 Příklad

Trojfázové zkratové proudy v místě zkratu F1 až F5 na obrázku 12 se musí vypočítat podle IEC 60909-0.

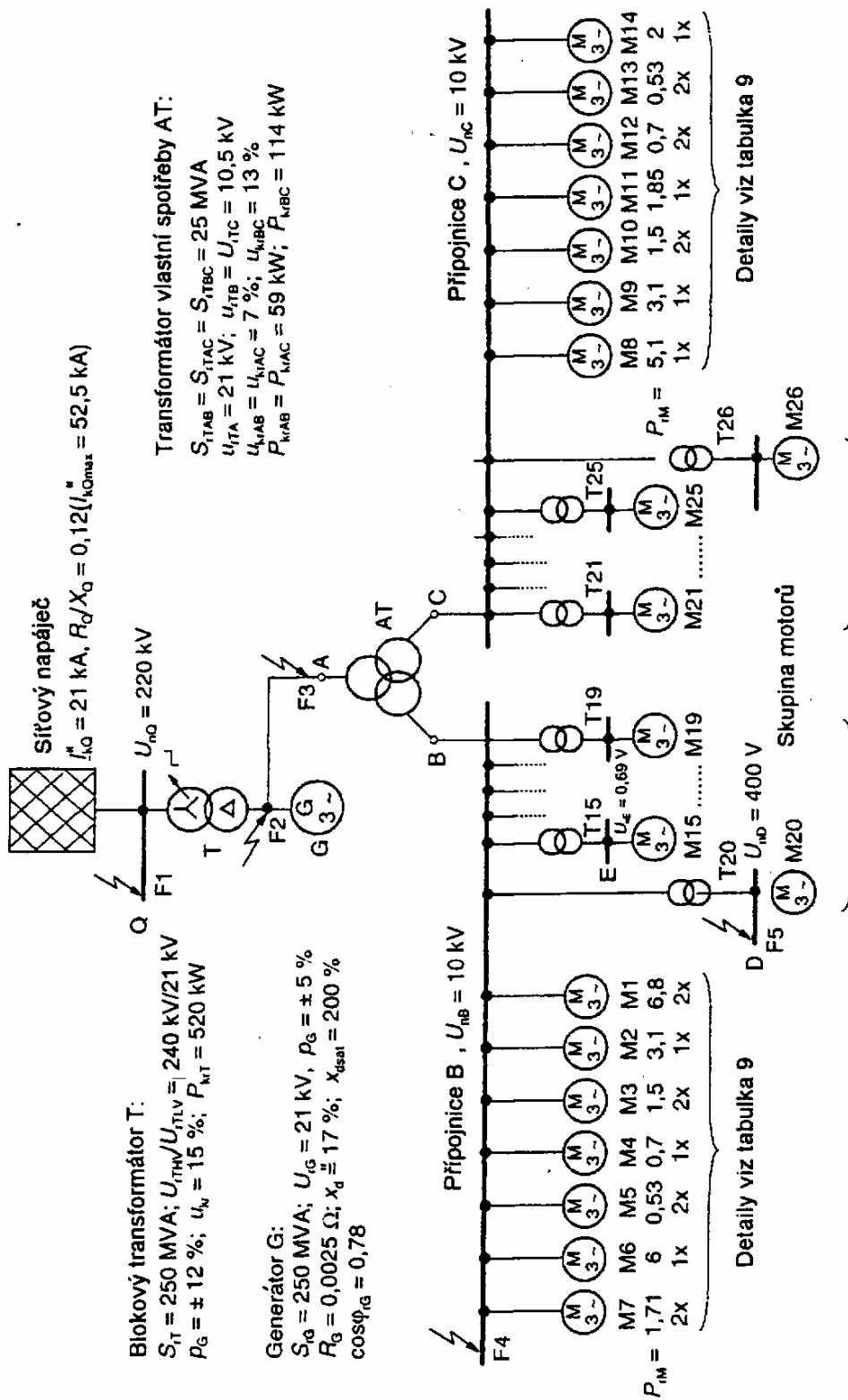
Elektrárenská jednotka (S) s $S_{rG} = S_{rT} = 250$ MVA je spojena se síťovým napáječem s $U_{nQ} = 220$ kV. Skutečný zkratový proud je $I_{kQ}'' = 21$ kA, vypočítaný podle IEC 60909-0, $c = c_{max} = 1,1$ ($S_{kQ}'' \approx \sqrt{3} U_{nQ}'' I_{kQ}'' \approx 8000$ MVA). Blokovaný transformátor je vybaven s přepínačem odboček na straně vyššího napětí (viz 3.7.1 IEC 60909-0). Transformátor vlastní spotřeby AT je trojvinuťový transformátor (viz 3.3.2 IEC 60909-0) se dvěma sekundárními vinutími napájející dvě přípojnice vlastní spotřeby B a C s napětím $U_{nB} = U_{nC} = 10$ kV.

Vliv vn a nn asynchronních motorů se musí brát v úvahu, pokud se počítají zkratové proudy v místě zkratu F2 až F5 (viz 3.8 IEC 60909-0). Skupina nn motorů, připojená k přípojnicím D a E, je uvažována jako ekvivalentní motory (viz 3.8.2 IEC 60909-0).

Zkratové proudy vn motorů M1 až M14 a skupiny nn motorů M15 až M26 jsou vypočítány v tabulce 8 a tabulce 9 s použitím tabulky 3 z IEC 60909-0. Impedance spojovacích kabelů mezi přípojnici a motory jsou zanedbány. Výsledky budou na straně bezpečnosti.

Předpokládá se, že všechny asynchronní motory jsou v provozu při různém zatížení. To vede k výsledkům na straně bezpečnosti. Součet jmenovitých výkonů asynchronních motorů na přípojnici B je $\sum S_{rMB} \approx 40$ MVA a na přípojnici C přibližně $\sum S_{rMC} \approx 30$ MVA. Proti těmto jmenovitým výkonům bude maximální zatížení během provozu elektrárenského bloku přibližně $25 \text{ MVA} \leq S_{rATA} = 0,1 S_{rG}$ v uhelných elektrárnách.

V 5.3.4 se zkratem v místě F4 se může ukázat, že motory napájené z přípojnice C přispívají pouze 1 % k počátečnímu zkratovému proudu I_{kF4}'' . To vede k výsledkům, že zkratové proudy v místě F4 jsou stejné, jestliže motory M8 ... M14 a skupina motorů M21 ... M26 nejsou v provozu.



Detaily viz obrázky 14 a 15 a tabulka 8

Obrázek 12

5.2 Zkratové impedance elektrického zařízení

5.2.1 Síťový napáječ

Podle 3.2 a rovnice (4) a (5) IEC 60909-0, impedance \underline{Z}_Q síťového napáječe je určena s pomocí $I_{kQ}'' = 21$ kA, $R_Q/X_Q = 0,12$ a $c = c_{\max} = 1,1$ (tabulka 1 IEC 60909-0).

$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} = \frac{1,1 \times 220 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 21 \text{ kA}} = 6,653 \text{ } \Omega$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q / X_Q)^2}} = \frac{6,653 \text{ } \Omega}{\sqrt{1 + (0,12)^2}} = 6,606 \text{ } \Omega; \quad R_Q = 0,12 X_Q$$

$$\underline{Z}_Q = (0,793 + j 6,606) \text{ } \Omega$$

Pro výpočet maximálních zkratových proudů v místě zkratu F2 až F5, musí být použita hodnota $Z_{Q\min}$ odpovídající $I_{kQ\max}'' = 52,5$ kA (viz 4.2.1.3 IEC 60909-0). $I_{kQ\max}''$ s $R_Q/X_Q = 0,1$ je předpokládána pro plánování elektrárenské soustavy, která bere v úvahu životnost elektrárenské jednotky:

$$Z_{Q\min} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ\max}''} = \frac{1,1 \times 220 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 52,5 \text{ kA}} = 2,661 \text{ } \Omega$$

$$\underline{Z}_{Q\min} = (0,265 + j 2,648) \text{ } \Omega$$

5.2.2 Elektrárenský blok

5.2.2.1 Generátor

$$\underline{Z}_G = R_G + j X_d'' = (0,0025 + j 0,2999) \text{ } \Omega; \quad Z_G = 0,2999 \text{ } \Omega$$

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \times \frac{U_{rG}''}{S_{rG}} = \frac{17\%}{100\%} \times \frac{(21 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} = 0,2999 \text{ } \Omega$$

Musí se použít fiktivní rezistance R_{Gf} (viz IEC 60909-0), pokud se počítá κ a i_p :

$$R_{Gf} = 0,05 X_d'' \quad (S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}):$$

$$\underline{Z}_{Gf} = R_{Gf} + j X_d'' = (0,0150 + j 0,2999) \text{ } \Omega$$

5.2.2.2 Blokový transformátor

Podle 3.3.1 IEC 60909-0 se impedance blokového transformátoru na straně vyššího a nižšího napětí určí následovně:

$$Z_{THV} = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = \frac{15\%}{100\%} \times \frac{(240 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} = 34,56 \ \Omega$$

$$R_{THV} = P_{krT} \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}^2} = 0,52 \text{ MW} \frac{(240 \text{ kV})^2}{(250 \text{ MVA})^2} = 0,479 \ \Omega = \frac{u_{rR}}{100\%} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}}$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{krT}}{S_{rT}} \times 100 = 0,208 \%$$

$$X_{THV} = \sqrt{Z_{THV}^2 - R_{THV}^2} = 34,557 \ \Omega$$

$$\underline{Z}_{THV} = R_{THV} + j X_{THV} = (0,479 + j 34,557) \ \Omega$$

Zkratová impedance blokového transformátoru vztažená na stranu nižšího napětí s $t_r = 240/21 \text{ kV} = 11,429$:

$$\underline{Z}_{TLV} = \underline{Z}_{THV} \times 1/t_r^2 = (0,0037 + j 0,265) \ \Omega; \quad Z_{TLV} = 0,265 \ \Omega$$

5.2.2.3 Elektrárenský blok (blokový transformátor s přepínačem odboček při zatížení)

Podle 3.7.1 IEC 60909-0 a $U_G = U_{rG}$:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \phi_{rG}}$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \phi_{rG}}$$

$$\underline{Z}_S = K_S (t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV})$$

$$\underline{Z}_S = 0,913 \left[\left(\frac{240 \text{ kV}}{21 \text{ kV}} \right)^2 (0,0025 + j 0,2999) \ \Omega + (0,479 + j 34,557) \ \Omega \right] = (0,735 + j 67,313) \ \Omega$$

S použitím fiktivní hodnoty R_{Gf} je určena následující impedance:

$$\underline{Z}_{sf} = (2,226 + j 67,313) \ \Omega, \quad (R_{sf}/X_{sf} = 0,033)$$

5.2.3 Transformátory vlastní spotřeby

Sousledné impedance trojvlnového transformátoru AT (obrázek 12) vztažené na stranu A jsou určeny z rovnice (10) IEC 60909-0:

$$\underline{Z}_{AB} = \left[\frac{U_{RrAB}}{100\%} + j \frac{U_{XrAB}}{100\%} \right] \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} = (0,0416 + j 1,235) \ \Omega$$

$$u_{RrAB} = \frac{P_{krTAB}}{S_{rTAB}} \times 100\% \quad u_{XrAB} = \sqrt{u_{krTAB}^2 - u_{RrAB}^2} \quad (\text{rovnice (10d) z IEC 60909-0})$$

$$\underline{Z}_{AC} = \underline{Z}_{AB} = (0,0416 + j 1,235) \ \Omega$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left[\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right] \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} = (0,0804 + j 2,292) \Omega$$

Impedanční korekční součinitel K_T se může určit z rovnice (13) IEC 60909-0 s $x_{TAB} = x_{TAC} \approx 0,1299$:

$$K_{TAB} = K_{TAC} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \times x_{TAB}} = 1,003$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \times x_{TBC}} = 0,969$$

Korigovaná impedance \underline{Z}_{ABK} k \underline{Z}_{BCK} vede ke korigovaným impedancím \underline{Z}_{AK} , \underline{Z}_{BK} a \underline{Z}_{CK} (rovnice (11) IEC 60909-0) z ekvivalentního diagramu uvedeného na obrázku 7b IEC 60909-0:

$$\underline{Z}_{AK} = \frac{1}{2} (K_{TAB} \underline{Z}_{AB} + K_{TAC} \underline{Z}_{AC} - K_{TBC} \underline{Z}_{BC}) = (0,0028 + j 0,1275) \Omega$$

$$\underline{Z}_{BK} = \underline{Z}_{CK} = \frac{1}{2} (K_{TBC} \underline{Z}_{BC} + K_{TAB} \underline{Z}_{AB} - K_{TAC} \underline{Z}_{AC}) = (0,0390 + j 1,1105) \Omega$$

5.2.4 Transformátory 2,5 MVA a 1,6 MVA

Podle obrázku 12 je pět transformátorů (T15 ... T19) na přípojnici B a pět transformátorů (T21 ... T25) na přípojnici C každá s $S_{rT} = 2,5$ MVA, $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10$ kV/0,73 kV (tabulka 8) a kromě toho transformátory (T20) a (T26) s $S_{rT} = 1,6$ MVA, $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10$ kV/0,42 kV (tabulka 8) připojených k přípojnici B (T20) a C (T26). Každý z těchto transformátorů napájí skupinu asynchronních motorů (tabulka 8). Impedance transformátorů jsou vypočítány z 3.1.1 IEC 60909-0 a korekční součinitelé K_T z rovnice (12a) IEC 60909-0, která bere v úvahu údaje z tabulky 8.

5.2.4.1 Transformátory $S_{rT} = 2,5$ MVA (T15...T19, T21...T25)

$$Z_{T15HV} = \frac{u_{krT15}}{100\%} \times \frac{U_{rT15HV}^2}{S_{rT15}} = \frac{6\%}{100\%} \times \frac{(10 \text{ kV})^2}{2,5 \text{ MVA}} = 2,4 \Omega$$

$$R_{T15HV} = P_{krT15} \frac{U_{rT15HV}^2}{S_{rT15}^2} = 0,0235 \text{ MW} \frac{(10 \text{ kV})^2}{(2,5 \text{ MVA})^2} = 0,376 \Omega ; (u_{Rr} = 0,94 \%)$$

$$\underline{Z}_{T15HV} = (0,376 + j 2,370) \Omega$$

$$K_{T15HV} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \times x_{T15}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \times 0,0593} = 1,009$$

$$\underline{Z}_{T15HVK} = (0,379 + j 2,392) \Omega$$

$$(\underline{Z}_{T15HVK} = \underline{Z}_{T16HVK}, \dots, \underline{Z}_{T19HVK}, \underline{Z}_{T21HVK}, \dots, \underline{Z}_{T25HVK})$$

5.2.4.2 Transformátory $S_{rT} = 1,6 \text{ MVA}$ (T20, T26)

$$Z_{T20HV} = \frac{u_{krT20}}{100\%} \times \frac{U_{rT20HV}^2}{S_{rT20}} = \frac{6\%}{100\%} \times \frac{(10 \text{ kV})^2}{1,6 \text{ MVA}} = 3,75 \ \Omega$$

$$R_{T20HV} = P_{krT20} \frac{U_{rT20HV}^2}{S_{rT20}^2} = 0,0165 \text{ MW} \frac{(10 \text{ kV})^2}{(1,6 \text{ MVA})^2} = 0,645 \ \Omega ; (u_{Rr} = 1,03 \%)$$

$$\underline{Z}_{T15HV} = (0,376 + j 2,370) \ \Omega$$

$$K_{T20HV} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \times x_{T20}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \times 0,0591} = 1,009$$

$$\underline{Z}_{T20HVK} = (0,651 + j 3,728) \ \Omega$$

Vztažená na stranu nižšího napětí:

$$\underline{Z}_{T20LV} = \underline{Z}_{T20HV} \times (1/t_r^2) = (1,136 + j 6,516) \text{ m}\Omega ; (t_r = 10 \text{ kV}/0,42 \text{ kV})$$

$$K_{T20LV} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \times x_{T20}} = 0,95 \frac{1,05}{1 + 0,6 \times 0,0591} = 0,963$$

$$\underline{Z}_{T20LVK} = (1,096 + j 6,277) \text{ m}\Omega$$

Tabulka 8 – Údaje transformátorů 10 kV/0,73 kV a 10 kV/0,42 kV, údaje skupiny nn motorů a dílčí zkratové proudy této skupiny motorů v F4

Transformátor skupina motorů		15 16 17 18 19	Σ 15...19	20	Σ 15...20	Poznámky
S_{rT}	MVA	2,5	12,5	1,6	14,1	Údaje uvedené výrobcem
U_{rTHV}	kV	10		10		
U_{rTLV}	kV	0,73		0,42		
u_{kr}	%	6		6		
P_{krT}	kW	23,5		16,5		
P_{rM}	MW	0,9	4,5	1,0	5,5	Údaje skupiny motorů
U_{rM}	kV	0,69		0,40		Viz 3.8.2 z IEC 60909-0
$\cos\varphi_{rM} \eta_{rM}$	-	0,72		0,72		
I_{LR}/I_{rM}	-	5		5		Viz 3.8.2 z IEC 60909-0
R_M/X_M	-	0,42		0,42		Viz 3.8.2 z IEC 60909-0
K_{rM}	-	1,3		1,3		Viz 3.8.2 z IEC 60909-0
S_{rM}	MVA	1,25	6,25	1,39	7,64	$P_{rM}/(\cos\varphi_{rM} \eta_{rM})$
R_{THVK}	Ω	0,379		0,651		viz 5.2.4
X_{THVK}	Ω	2,392		3,728		
R_M	Ω	0,0295		0,0089		$R_M = 0,42 X_M$ $X_M = 0,922 Z_M$ ¹⁾
X_M	Ω	0,0702		0,0212		
I_{kM}^-	kA	5,491		10,53 ²⁾		$c = 1,05$; $U_{nE} = 0,69$ kV; $U_{nD} = 0,4$ kV
$R_{M1} = R_M t_r^2$	Ω	5,536		5,045		$t_r = 10$ kV/0,73 kV nebo $t_r = 10$ kV/0,42 kV
$X_{M1} = X_M t_r^2$	Ω	13,179		12,018		
$R_{THVK} + R_{M1}$	Ω	5,915	1,183	5,696	0,980	na straně 10 kV
$X_{THVK} + X_{M1}$	Ω	15,571	3,114	15,746	2,600	
$ Z_{THVK} + Z_{M1} $	Ω	16,657	3,331	16,745	2,779	
$I_{kTF4}^-, \Sigma I_{kTF4}^-$	kA	0,381	1,906	0,379	2,285 ³⁾	$U_{nB} = 10$ kV, $c = 1,1$

¹⁾ Z_M z rovnice (26) IEC 60909-0.
²⁾ Dílčí zkratový proud v F5.
³⁾ Dílčí zkratový proud v F4.

Tabulka 9 – Údaje vn asynchronních motorů a jejich dílčí zkratové proudy ve zkratových místech na přípojnici B (F4) a respektive C

Přípojnice		B (místo zkratu F4)										C									
Motor č.		1	2	3	4	5	6	7	Σ(1...7)	8	9	10	11	12	13	14	Σ(8...14)				
P_{TM}	kW	6,8	3,1	1,5	0,7	0,53	2	1,71	-	5,1	3,1	1,5	1,85	0,7	0,53	2	-				
Počet	-	2	1	2	1	2	1	2	-	1	1	2	1	2	2	1	-				
U_{TM}	kV	10										10	10								
$\cos\phi_{TM}$	-	0,89	0,85	0,88	0,85	0,75	0,85	0,85	-	0,87	0,85	0,88	0,85	0,85	0,75	0,85	-				
η_{TM}	-	0,976	0,959	0,962	0,952	0,948	0,96	0,96	-	0,973	0,959	0,962	0,959	0,952	0,948	0,96	-				
I_{LR}/I_{TM}^1	-	4										4	4								
Počet pólů p	-	2	2	1	3	5	3	3	-	3	2	1	3	3	5	3	-				
$S_{TM}, \Sigma S_{TM}$	MVA	15,66	3,80	3,54	0,87	1,49	2,45	4,19	32,0	6,02	3,80	3,54	2,27	1,73	1,49	2,45	21,3				
$I_{TM}, \Sigma I_{TM}$	kA	0,904	0,220	0,205	0,05	0,086	0,142	0,242	1,85	0,348	0,22	0,205	0,131	0,10	0,086	0,141	1,23				
P_{TM}/p	-	3,4	1,55	1,5	0,23	0,11	0,67	0,57	-	1,7	1,55	1,50	0,62	0,23	0,11	0,67	-				
R_M/X_M	-	0,15										0,15	0,15								
K_M	-	1,65										1,65	1,65								
μ ($t_{min} = 0,1s$) ²⁾	-	0,796										0,796	0,796								
q ($t_{min} = 0,1s$) ³⁾	-	0,72	0,62	0,62	0,39	0,31	0,52	0,50	-	0,63	0,62	0,62	0,51	0,39	0,31	0,52	-				
$I_{TM}^*, \Sigma I_{TM}^*$	kA	3,98	0,97	0,90	0,22	0,38	0,62	1,06	8,13	1,53	0,97	0,90	0,58	0,44	0,38	0,62	5,41				
i_{pM}	kA	9,85	2,40	2,23	0,51	0,89	1,45	2,47	19,80	3,79	2,39	2,23	1,35	1,03	0,88	1,45	13,12				
I_{BM}	kA	2,28	0,48	0,44	0,07	0,09	0,26	0,42	4,04	0,77	0,48	0,44	0,24	0,14	0,09	0,26	2,42				
Z_M	Ω	1,60	6,58	7,06	28,74	16,78	10,20	5,97	0,782	4,15	6,58	7,06	11,01	14,45	16,78	10,20	1,173				
X_M	Ω	0,995 Z_M										0,995 Z_M	0,989 Z_M								
R_M	Ω	0,1 X_M										0,1 X_M	0,15 X_M								

1) $I_{LM}^*/I_{TM} = 4,4$ (viz 5.2.5); $= I_{LM}^* = c (I_{LR}/I_{TM}) I_{TM}$

2) $\mu (0,1 s) = 0,62 + 0,72c^{-0,32} I_{LM}^*/I_{TM}$ (rovnice (70) z IEC 60909-0)

3) $q (0,1 s) = 0,57 + 0,12 \ln P_{TM}/p$ (rovnice (73) z IEC 60909-0)

5.2.5 Asynchronní motory

V tabulce 9 jsou uvedeny údaje a zkratové impedance vn motorů M1..M7 připojené k přípojnicí B a motorů M8..M14 připojené k přípojnicí C na obrázku 12. Použitím rovnic (26) a (91) z IEC 60909-0 a s uvažováním, že $U_{rM} = U_n$ se může s použitím následující rovnice (z tabulky 9) vypočítat I_{kM}'' :

$$I_{kM}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_M} = \frac{c U_n}{\sqrt{3}} \times \frac{I_{LR}}{I_{rM}} \times \frac{I_{rM}}{U_{rM}/\sqrt{3}} = c \frac{I_{LR}}{I_{rM}} \times I_{rM}$$

Údaje a zkratové impedance skupiny nn motorů jsou uvedeny v tabulce 8. Tato tabulka udává též dílčí zkratové proudy skupiny motorů (M15 až M20) na straně vyššího napětí transformátorů T15 až T20 v případě zkratu v místě F4 (přípojnice B na obrázku 12).

5.3 Výpočet zkratových proudů

5.3.1 Zkratové místo F1

Zkratový proud I_k'' v místě F1 se může vypočítat jako součet I_{kQ}'' a I_{kS}'' . Proud I_{kS}'' se musí vypočítat s pomocí Z_S podle rovnice (21) IEC 60909-0 elektrárenskou jednotku s přepínačem odboček při zatížení. Není nutné brát v úvahu asynchronní motory vlastní spotřeby, protože jejich příspěvek je menší než 1 % k proudu I_k'' (viz 5.3.3).

5.3.1.1 Počáteční zkratový proud I_k''

$$I_{kQ}'' = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} Z_Q} = \frac{1,1 \times 220 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,793 + j6,606) \Omega} = (2,502 - j20,850) \text{ kA}$$

$$I_{kS}'' = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} Z_S} = \frac{1,1 \times 220 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,735 + j67,313) \Omega} = (0,023 - j2,075) \text{ kA}$$

$$I_k'' = I_{kQ}'' + I_{kS}'' = (2,525 - j22,925) \text{ kA}; \quad I_k'' = 23,064 \text{ kA}$$

5.3.1.2 Nárazový zkratový proud i_p

Z impedance Z_Q je $R_Q/X_Q = 0,12$ a $\kappa_Q = 1,704$. Z impedance Z_{St} (viz (5.2.2)) se určí poměr $R_{St}/X_{St} = 0,033$ a $\kappa_S = 1,908$.

$$i_p = i_{pQ} + i_{pS} = \kappa_Q \sqrt{2} I_{kQ}'' + \kappa_S \sqrt{2} I_{kS}'' = 1,704 \times \sqrt{2} \times 21 \text{ kA} + 1,908 \times \sqrt{2} \times 2,075 \text{ kA} = 56,21 \text{ kA}$$

5.3.1.3 Souměrný zkratový vypínací proud I_b

$$I_b = I_{bQ} + I_{bS} = I_{kQ}'' + \mu I_{kS}'' = 21 \text{ kA} + 0,859 \times 2,075 \text{ kA} = 22,78 \text{ kA}$$

$$\mu_{0,1} = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 \times I_{kQ}''/I_{rG}} \quad (\text{rovnice (70) z IEC 60909-0 pro } t_{\min} = 0,1 \text{ s})$$

Poměr I_{kG}''/I_{rG} je určen následovně:

$$\frac{I_{kG}''}{I_{rG}} = \frac{I_{kSt}''}{I_{rG}} = \frac{2,075 \text{ kA} (240 \text{ kV}/21 \text{ kV})}{6,873 \text{ kA}} = 3,45$$

5.3.1.4 Ustálený zkratový proud $I_{k\max}$

$$I_k = I_{kQ} + I_{kS} = I_{kQ}'' + \lambda_{\max} I_{rGt} = 21 \text{ kA} + 1,65 \times 0,601 \text{ kA} \approx 22 \text{ kA}$$

Součinitel $\lambda_{\max} = 1,65$ je určen z obrázku 18a) IEC 60909-0 pro $x_{\text{dsat}} = 2,0$, jestliže je nejvyšší možné budící napětí 1,3 krát větší než jmenovité budící napětí při jmenovitém zatížení a účinníku pro válcové rotory generátoru $S_{rG} = 250 \text{ MVA}$ (viz též 2.5.2.2 IEC 60909-0)

5.3.2 Zkratové místo F2

Podle obrázku 13 a 4.2.1.3 IEC 60909-0 se mohou spočítat oba dílčí zkratové proudy I_{kG}'' (rovnice (35) z IEC 60909-0) a I_{kT}'' (rovnice (37) z IEC 60909-0), protože největší hodnota těchto dvou proudů je použita pro dimenzování přípojnic (tyčí) mezi generátorem a blokovým transformátorem, pokud je použit vypínač mezi generátorem a blokovým transformátorem.

5.3.2.1 Počáteční zkratové proudy I_{kG}'' a I_{kT}''

$$I_{kG}'' = \frac{c U_{rG}}{\sqrt{3} K_{G,S} Z_G} = \frac{1,1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 0,994 \times 0,2999 \Omega} = 44,74 \text{ kA}$$

s rovnicí (36) z IEC 60909-0:

$$K_{G,S} = \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} = \frac{1,1}{1 + 0,17 \times 0,626} = 0,994$$

a Z_G podle 5.5.2

$$I_{kT}'' = \frac{c U_{rG}}{\sqrt{3} \left| Z_{TLV} + \frac{1}{t_f^2} Z_{Qmin} \right|} = \frac{1,1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} |0,0057 + j 0,285| \Omega} = 46,79 \text{ kA}$$

s $Z_{Qmin} = (0,265 + j 2,648) \Omega$ z 5.2.1, $Z_{TLV} = (0,0037 + j 0,265) \Omega$ z 5.2.2 a $t_f = 240 \text{ kV}/21 \text{ kV}$.

Celkový proud pro dimenzování přípojnic (tyčí) mezi generátorem a blokovým transformátorem je určen sečtením proudů I_{kT}'' a $I_{kM,AT}''$, které jsou vypočítané v 5.3.3:

$$I_{kT}'' + I_{kM,AT}'' = (46,79 + 6,35) \text{ kA} = 53,14 \text{ kA}$$

$$\left| I_{kT}'' + I_{kM,AT}'' \right| = |1,76 - j 53,08| \text{ kA} = 53,11 \text{ kA}$$

5.3.2.2 Nárazové zkratové proudy i_{pG} a i_{pT}

$$i_{pG} = \kappa_G \sqrt{2} I_{kG}'' = 1,86 \times \sqrt{2} \times 44,74 \text{ kA} = 117,69 \text{ kA}$$

$R/X = R_G/X_d'' = 0,05$ a $\kappa_G = 1,86$ (rovnice (55) z IEC 60909-0).

$$i_{pT} = \kappa_T \sqrt{2} I_{kT}'' = 1,94 \times \sqrt{2} \times 46,79 \text{ kA} = 128,37 \text{ kA}$$

$R/X = 0,0057 \Omega/0,285 \Omega = 0,02$ a $\kappa_T = 1,94$

5.3.2.3 Souměrný zkratový vypínací proud I_{bG} a I_{bT}

$$I_{bG} = \mu I_{kG}'' = 0,71 \times 44,74 \text{ kA} = 31,77 \text{ kA}$$

$$s \mu = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 \times I_{kG}'' / I_{rG}} = 0,71; \quad t_{\min} = 0,1 \text{ s}$$

$$I_{kG}'' / I_{rG} = 44,74 \text{ kA} / 6,87 \text{ kA} = 6,51$$

$$I_{bT} = I_{kT}'' \text{ (vzdálený zkrat (rovnice 65) z IEC 60909-0).}$$

5.3.2.4 Ustálený zkratový proud $I_{kG\max}$ a $I_{kT\max}$

$$I_{kG\max} = \lambda_{\max} I_{rG} = 1,75 \times 6,87 \text{ kA} = 12,0 \text{ kA}$$

$$s \lambda_{\max} = 1,75 \text{ z obrázku 18a IEC 60909-0 s } I_{kG}'' / I_{rG} = 6,51.$$

$$I_{kT\max} = I_{kT}'' \text{ (pro vzdálené zkraty (rovnice (84) z IEC 60909-0)).}$$

Pokud se bere v úvahu příspěvek motorů napájených z transformátoru vlastní spotřeby AT (viz 5.3.3), jsou určeny následující proudy pro dimenzování tyčí mezi generátorem a blokovým transformátorem:

$$I_{pT} + I_{pM,AT} = (128,37 + 15,09) \text{ kA} = 143,46 \text{ kA}$$

$$I_{bT} + I_{bM,AT} \approx I_{kT}'' + I_{kM,AT}'' = 53,14 \text{ kA na straně bezpečnosti.}$$

5.3.3 Zkratové místo F3

5.3.3.1 Počáteční zkratové proudy I_{krsl}'' a $I_{kM,AT}''$

Obrázek 13 udává souslednou soustavu pro výpočet zkratového proudu v místě F3 a dílčí zkratové proudy I_{krsl}'' s Z_{rsl} (rovnice (38) IEC 60909-0) a $I_{kM,AT}''$ na straně vyššího napětí transformátoru vlastní spotřeby.

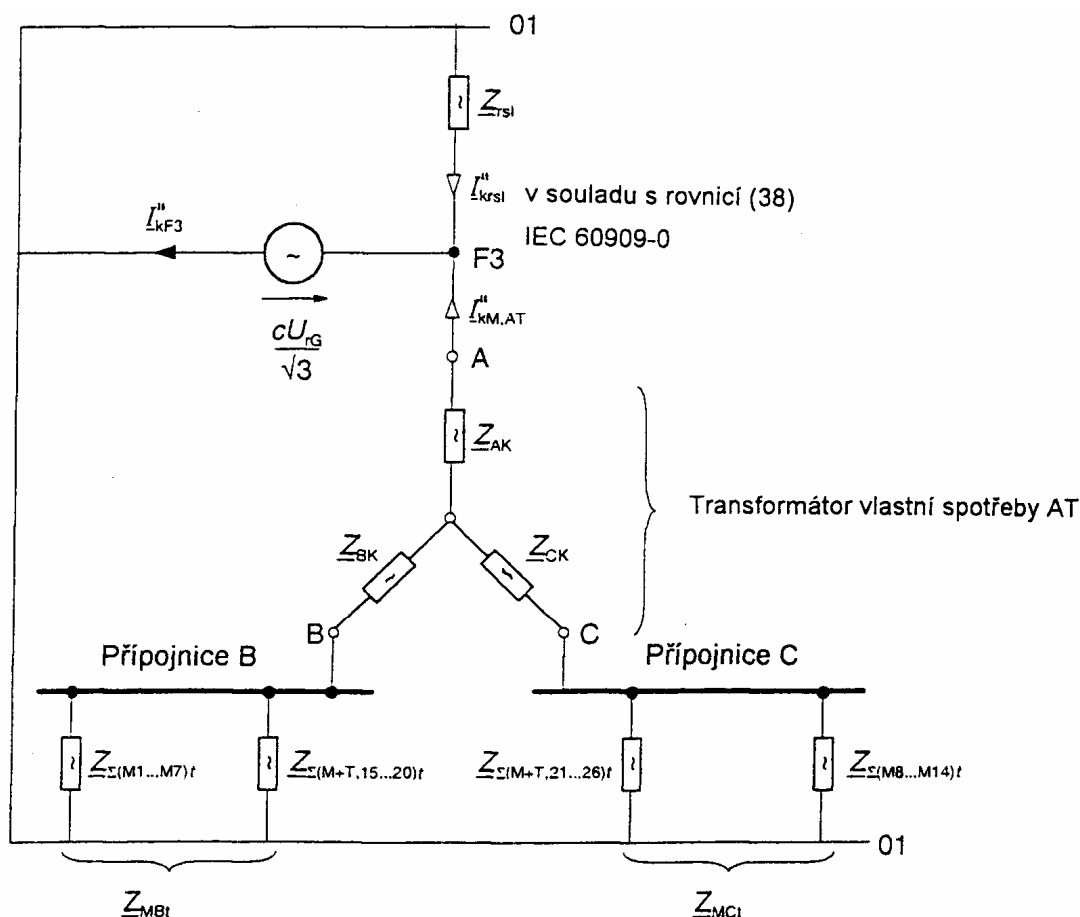
$$I_{krsl}'' = \frac{c U_{rG}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{K_{G,S} Z_G} + \frac{1}{K_{T,S} Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin}} \right] = \frac{c U_{rG}}{\sqrt{3} Z_{rsl}}$$

s $K_{G,S} = 0,994$ z 5.3.2, $Z_G = (0,0025 + j 0,2999) \Omega$ z 5.5.2, $Z_{TLV} = (0,0037 + j 0,265) \Omega$ z 5.2.2, $Z_{Qmin} = (0,265 + j 2,648) \Omega$ a

$$K_{T,S} = \frac{c_{\max}}{1 - x_T \sin \phi_{rG}} = \frac{1,1}{1 - 0,15 \times 0,626} = 1,214$$

z rovnice (39) IEC 60909-0 se určí následující zkratový proud:

$$I_{krsl}'' = \frac{1,1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = \left[\frac{1}{(0,0025 + j 0,298) \Omega} + \frac{1}{(0,0045 + j 0,322) \Omega + (0,0020 + j 0,020) \Omega} \right]$$



Obrázek 13 – Sousedná soustava pro výpočet zkratových proudů v místě F3 (viz obrázek 12)

Impedance s indexem t jsou přepočtené na stranu vyššího napětí A transformátoru vlastní spotřeby s $t_{AT} = 21 \text{ kV}/10,5 \text{ kV} = 2,0$.

$$I_{krsl}'' = \frac{1,1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,0021 + j 0,1592) \Omega} = (1,13 - j 83,73) \text{ kA}; \quad I_{krsl}'' = 83,74 \text{ kA}$$

$$Z_{rs1} = (0,0021 + j 0,1592) \Omega$$

Součtem I_{kG}'' a I_{kT}'' z 5.3.2 vede k $I_{kG}'' + I_{kT}'' = 44,74 \text{ kA} + 46,79 \text{ kA} = 91,53 \text{ kA}$ s výsledkem, který je o 9,3 % vyšší než z rovnice (38) IEC 60909-0.

POZNÁMKA Toto srovnání udává jeden z důvodů proč mohou být výsledky určené superpoziční metodou nebo výpočtem přechodových stavů menší v porovnání s výsledkem určeným prostým sečtením I_{kG}'' a I_{kT}'' . Doporučuje se, aby pro výpočet počátečního rázového zkratového proud v bodech F2 a F3 byl použit jednotný postup, který vede k jednoznačným výsledkům. Fyzikálně jsou místa zkratu F2 a F3 prakticky totožná (je mezi nimi zanedbatelná impedance a ve výše uvedeném výpočtu je tato impedance skutečně zanedbána) a proto i výsledné zkratové proudy v místech F2 a F3 by měly být totožné. Uživatel normy by pro návrh zařízení měl dostat jednoznačné výsledky, které jsou na straně bezpečnosti.

Dílčí zkratový proud $I_{kM,AT}''$ na obrázku 13 se může určit z výsledků v tabulce 8 a 9 pro nn a vn motory. Impedance na obrázku 13 jsou:

$$\underline{Z}_{\Sigma(M1...M7)t} = (0,089 + j0,777) \Omega \left(\frac{21 \text{ kV}}{10,5 \text{ kV}} \right)^2 = (0,356 + j3,108) \Omega$$

$$\underline{Z}_{\Sigma(M+T.15...20)t} = (0,980 + j2,600) \Omega \left(\frac{21 \text{ kV}}{10,5 \text{ kV}} \right)^2 = (3,92 + j10,40) \Omega$$

$$\underline{Z}_{MBt} = (0,410 + j2,420) \Omega,$$

$$\underline{Z}_{\Sigma(M8...M14)t} = (0,136 + j1,165) \Omega \left(\frac{21 \text{ kV}}{10,5 \text{ kV}} \right)^2 = (0,552 + j4,660) \Omega$$

$$\underline{Z}_{\Sigma(M+T.21...26)t} = \underline{Z}_{\Sigma(M+T.15...20)t} = (3,92 + j10,40) \Omega$$

$$\underline{Z}_{MCt} = (0,626 + j3,260) \Omega$$

Impedance \underline{Z}_{AK} , \underline{Z}_{BK} a \underline{Z}_{CK} vztažené na stranu A jsou vypočítané jako v 5.2.3. Pro výpočet $I_{kM,AT}''$ je nutno znát impedanci $\underline{Z}_{M,AT}$:

$$\underline{Z}_{M,AT}'' = \underline{Z}_{AK} + \frac{(\underline{Z}_{BK} + \underline{Z}_{MBt})(\underline{Z}_{CK} + \underline{Z}_{MCt})}{\underline{Z}_{BK} + \underline{Z}_{CK} + \underline{Z}_{MBt} + \underline{Z}_{MCt}} = (0,273 + j2,081) \Omega$$

$$I_{kM,AT}'' = \frac{c U_{rG}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{M,AT}} = \frac{1,1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,273 + j2,081) \Omega} = (0,827 - j6,300) \text{ kA}$$

$$I_{kM,AT}'' = 6,35 \text{ kA}$$

Tento dílčí zkratový proud $I_{kM,AT}'' = 6,35 \text{ kA}$ se musí uvažovat, protože jeho hodnota dosahuje 7,5 % proudu $I_{krsl}'' = 83,74 \text{ kA}$.

Celkový zkratový proud v místě F3 (viz obrázek 13):

$$I_{kF3}'' = I_{krst}'' + I_{kM,AT}'' = (1,96 - j90,03) \text{ kA}, \quad I_{kF3}'' = 90,05 \text{ kA}$$

POZNÁMKA V případě zkratu v místě F3 (obrázek 13) je zbytkové napětí na přípojnici B přibližně 4,1 kV, tj. přibližně 40 % napětí před zkratem.

5.3.3.2 Nárazové zkratové proudy i_{prsl} a $i_{pM,AT}$

Nárazový zkratový proud i_{prsl} se může určit s použitím dvou částí rovnic (38) z IEC 60909-0:

$$i_{prsl} = \kappa_{G,S} \sqrt{2} \frac{c U_{rG}}{\sqrt{3} K_{G,S} Z_G} + \kappa_{T,S} \sqrt{2} \frac{c U_{rG}}{\sqrt{3} |K_{T,S} Z_{TLV} + Z_{Qmint}|}$$

$$i_{prsl} = 1,86 \times \sqrt{2} \times 44,74 \text{ kA} + 1,94 \times \sqrt{2} \times 39,0 \text{ kA} = 224,7 \text{ kA}$$

$$\frac{R_{Gf}}{X_d''} = \frac{0,0150 \Omega}{0,2995 \Omega} = 0,05 \rightarrow \kappa_{G.S} = 1,86; \quad (\underline{Z}_{Gf} \text{ z článku 5.2.2})$$

a

$$\frac{\operatorname{Re} \{K_{T.S} \underline{Z}_{TLV} + \underline{Z}_{Qmint}\}}{\operatorname{Im} \{K_{T.S} \underline{Z}_{TLV} + \underline{Z}_{Qmint}\}} = \frac{0,0066 \Omega}{0,342 \Omega} = 0,019 \rightarrow \kappa_{rst} = 1,94$$

POZNÁMKA Výpočet s 20 Hz (4.3.1.2 (c) IEC 60909-0), s použitím \underline{Z}_{Gf} z 2.5.5 a impedance \underline{Z}_{rslc} podle rovnice (38) z IEC 60909-0 vede k:

Nárazový zkratový proud $i_{pM,AT}$ se může určit podle metody (b) (4.3.1.2 (b) z IEC 60909-0), ale bez součinitele 1,15, protože příslušné impedance vn motorů mají poměr $R/X < 0,3$ (4.3.1.2 z IEC 60909-0).

$$i_{pM,AT} = \kappa_{(b)} \sqrt{2} I_{KM,AT}'' = 1,68 \times \sqrt{2} \times 6,35 \text{ kA} = 15,09 \text{ kA}$$

$$\frac{R_{M,AT}}{X_{M,AT}} = \frac{0,273 \Omega}{2,081 \Omega} = 0,131 \rightarrow \kappa_{(b)} = 1,68$$

POZNÁMKA Výpočet s 20 Hz vede v tomto případě ke stejným výsledkům (odchylka je menší než 0,4 %).

5.3.3.3 Vypínací proud a ustálený zkratový proud

Vypínací proud I_b není důležitý v místě zkratu F3.

Ustálený zkratový proud I_k je překročen $I_{kT} = I_{kT}''$:

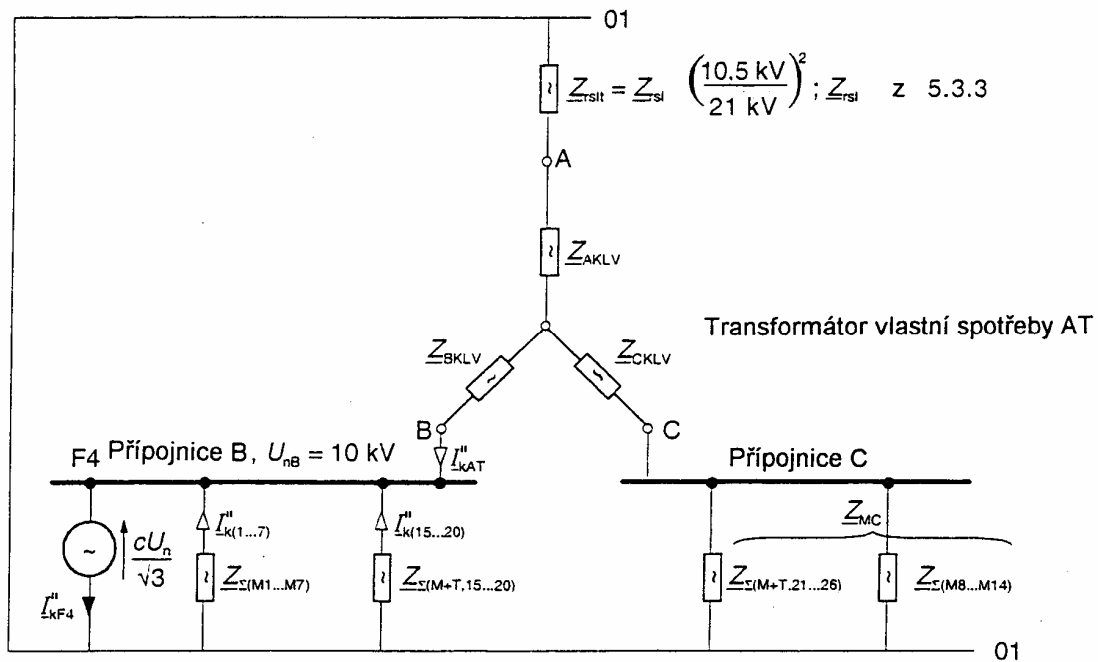
$$I_{kF3} = I_{kG} + I_{kT} + I_{kM,AT} \approx \lambda_{\max} I_{rG} + I_{kT}'' = 12 \text{ kA} + 46,79 \text{ kA} = 58,8 \text{ kA}$$

s I_{kG} a I_{kT}'' z 5.3.2 a $I_{kM,AT} \rightarrow 0$

5.3.4 Zkratové místo F4

Počáteční trojfázový zkratový proud v místě F4 (obrázek 12) se může určit z dílčích zkratových proudů jak je znázorněno na obrázku 14 (4.2.1.2 IEC 60909-0):

$$I_{kF4}'' = I_{kAT}'' + I_{k(1\dots7)}'' + I_{k(15\dots20)}''$$



Obrázek 14 – Sousedná soustava pro výpočet zkratových proudů v místě F4 (viz obrázek 12)

Impedance jsou vztaženy na sekundární stranu transformátoru vlastní spotřeby AT.

$$Z_{kAT} = Z_{BKLV} + \frac{(Z_{AKLV} + Z_{rslt})(Z_{CKLV} + Z_{MC})}{Z_{AKLV} + Z_{rslt} + Z_{CKLV} + Z_{MC}}$$

$$Z_{kAT} = (0,0098 + j 0,2776) \Omega + (0,0017 + j 0,0673) \Omega = (0,0115 + j 0,3449) \Omega$$

$$Z_{kAT} = 0,3451 \Omega$$

$$s \quad Z_{kAKLV} = Z_{AK}/t_r^2; \quad Z_{kBKLV} = Z_{CKLV} = Z_{BK}/t_r^2; \quad Z_{AK} \quad Z_{BK} \text{ z 5.2.3,}$$

$$Z_{MC} = Z_{MC}/t_r^2; \quad Z_{MC} \text{ z 5.3.3,}$$

$$Z_{rslt} \text{ z 5.3.3}$$

$$I_{kAT}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{kAT}} = \frac{1,1 \times 10 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,115 + j0,3449) \Omega} = (0,613 - j18,393) \text{ kA}$$

z tabulky 8 a 9:

$$I_{k(1...7)}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{\Sigma(M1...M7)}} = \frac{1,1 \times 10 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,089 + j0,777) \Omega} = (0,924 - j8,068) \text{ kA}$$

$$I_{k(15...20)}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{\Sigma(M+T,15...20)}} = \frac{1,1 \times 10 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,980 + j2,600) \Omega} = (0,806 - j2,139) \text{ kA}$$

$$I_{kF4}'' = (2,343 - j28,60) \text{ kA}; \quad I_{kF4}'' = 28,70 \text{ kA}$$

POZNÁMKA Zanedbání vlivu motorů napájených z přípojnice C v místě zkratu F4 vede k:

$$Z_{kAT} = Z_{BKLV} + Z_{AKLV} + Z_{rsit} = (0,011 - j0,349) \Omega$$

$$I_{kAT}'' = (0,573 - j18,179) \text{ kA}$$

$$I_{kF4}'' = (2,303 - j28,386) \text{ kA}; \quad I_{kF4}'' = 28,48 \text{ kA}$$

Vliv motorů napájených z přípojnice C je menší než 1 % příspěvku k proudu I_{kF4}'' . V tomto případě mohou být zanedbány.

Nárazové zkratové proudy se mohou určit podle metody (b) (4.3.1.2 (b) z IEC 60909-0), ale bez součinitele 1,15, protože poměr $R/X < 0,3$ ve větvích příslušných k proudu I_{kAT}'' a u vn asynchronních motorů.

$$\begin{aligned} \dot{I}_{pF4} &= \kappa_{AT} \sqrt{2} I_{kAT}'' + \kappa_{(1...7)} \sqrt{2} I_{k(1...7)}'' + \kappa_{(15...20)} \sqrt{2} I_{k(15...20)}'' \\ \dot{I}_{pF4} &= 1,91 \times \sqrt{2} \times 18,40 \text{ kA} + 1,72 \times \sqrt{2} \times 8,12 \text{ kA} + 1,34 \times \sqrt{2} \times 2,29 \text{ kA} = 73,79 \text{ kA} \end{aligned}$$

Pokud je dílčí zkratový proud I_{kAT}'' přepočten na stranu vyššího napětí transformátoru vlastní spotřeby, může být $I_{kATt}'' = 9,2 \text{ kA}$ menší než $2I_{rG} = 2 \times 6,87 \text{ kA}$ a zkrat v místě F4 je vzdáleným zkratem.

$$I_{bF4} = I_{bAT} + I_{b(1...7)} + I_{b(15...20)} = 22,8 \text{ kA}$$

$$I_{bAT} = I_{kAT}'' = 18,40 \text{ kA}$$

$$I_{b(1...7)} = \sum_{i=1}^7 \mu_i q_i I_{kMi}'' = 4,04 \text{ kA} \quad (\text{viz tabulka 9})$$

$$I_{b(15...20)} = \mu \times q \times I_{k(15...20)}'' = 0,74 \times 0,21 \times 2,29 \text{ kA} = 0,36 \text{ kA}$$

($\mu = 0,74$ z $t_{\min} = 0,1 \text{ s}$ a $I_{kM}''/I_{rM} = 5,5$ a $q = 0,21$ z $t_{\min} = 0,1 \text{ s}$ a $P_{rM}/p = 0,05 \text{ MW}$;

$I_{k(15...20)}'' = 2,29 \text{ kA}$ z tabulky 8)

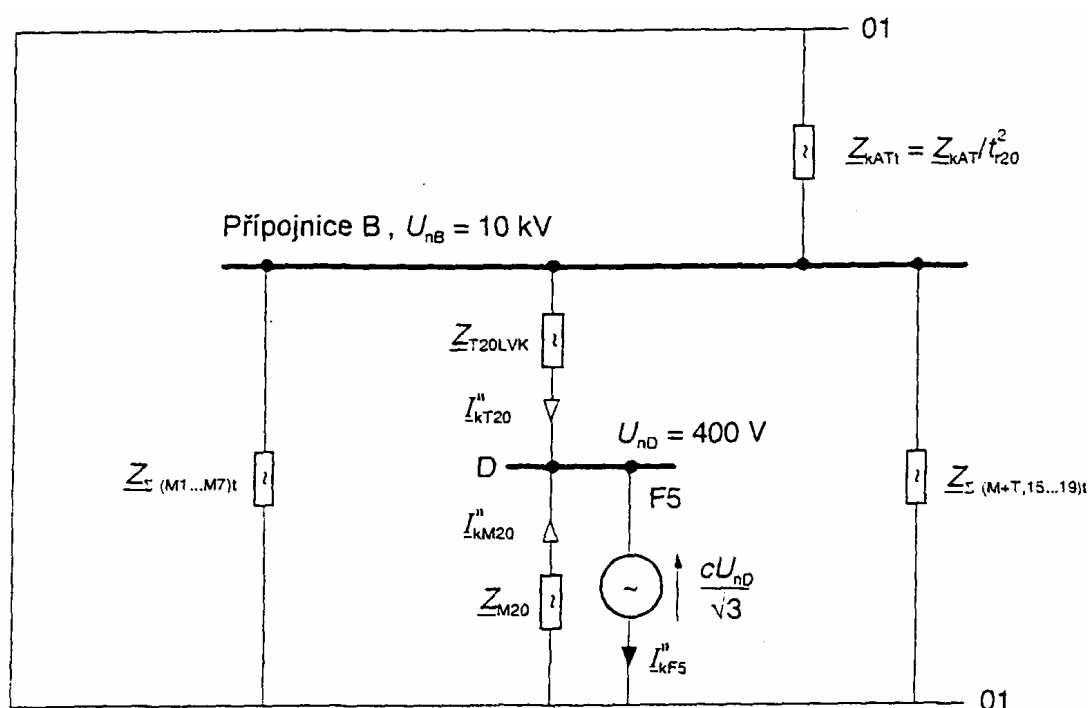
5.3.5 Zkratové místo F5

Počáteční souměrný zkratový proud ve zkratovém místě F5 se může vypočítat na základě sousledné soustavy znázorněné na obrázku 15.

$$I_{kF5}'' = I_{kT20}'' + I_{kM20}''$$

Pro výpočet dílčího zkratového proudu I_{kT20}'' jsou použity následující impedance (viz obrázek 15):

$$Z_{kATt} = Z_{kAT} \frac{1}{t_{r20}^2} = (0,0115 + j0,3449) \Omega \left(\frac{0,42 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 = (0,0203 + j0,6084) \text{ m}\Omega$$



Obrázek 15 – Sousledná soustava pro výpočet zkratových proudů v místě F5 (viz obrázek 12). Impedance jsou vztaženy na stranu nízkého napětí transformátoru T20 ($t_{r20} = 10 \text{ kV}/0,42 \text{ kV}$)

$$Z_{\Sigma(M1...M7)t} = Z_{\Sigma(M1...M7)} \frac{1}{t_{r20}^2} = (0,089 + j0,777) \Omega \left(\frac{0,42 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 = (0,157 + j1,3706) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{\Sigma(M+T,15...19)t} = Z_{\Sigma(M+T,15...19)} \frac{1}{t_{r20}^2} = (1,183 + j3,114) \Omega \left(\frac{0,42 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 = (2,087 + j5,493) \text{ m}\Omega$$

Impedance Z_{kAT} je vždy počítána podle 5.3.4. Impedance $Z_{\Sigma(M1...M7)}$ respektive $Z_{\Sigma(M+T,15...19)}$ jsou uvedeny v tabulkách 8 a 9.

Impedance nn transformátoru T20 je uvedena v 5.2.4 vztažená na stranu nižšího napětí:

$$Z_{T20LVK} = (1,096 + j 6,277) \text{ m}\Omega \quad s \quad K_T = 0,963 \quad (c_{max} = 1,05)$$

$$I_{kT20}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{kT20}} = \frac{1,05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} (1,127 + j 6,671) \text{ m}\Omega} = (5,97 - j 35,33) \text{ kA}; \quad I_{kT20}'' = 35,83 \text{ kA}$$

Impedance Z_{kT20} je určena z $Z_{kT20LVK}$ v sérii s třemi paralelními impedancemi Z_{kAT} , $Z_{\Sigma(M1...M7)}$ a $Z_{\Sigma(M+T,15...19)}$.

Impedance Z_{M20} je uvedena v tabulce 8.

$$I_{kM20}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{M20}} = \frac{1,05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} (8,9 + j 21,2) \text{ m}\Omega} = (4,07 - j 9,72) \text{ kA}; \quad I_{kM20}'' = 10,54 \text{ kA}$$

$$I_{kF5}'' = I_{kT20}'' + I_{kM20}'' = (10,04 - j 45,05) \text{ kA};$$

Nárazový zkratový proud je:

$$I_{pF5} = I_{pT20} + I_{pM20} = \kappa_{T20} \sqrt{2} I_{kT20}'' + \kappa_{M20} \sqrt{2} I_{kM20}''$$

Kde $\kappa_{T20} = 1,60$ z poměru $R_{T20LVK}/X_{T20LVK} = 0,175$, protože impedance transformátorů je hlavní částí Z_{kT20} (více než 90 %) a $\kappa_{M20} = 1,3$ pro ekvivalentní motor skupiny motorů (3.8.2 IEC 60909-0).

$$I_{pF5} = 1,60 \sqrt{2} \times 35,83 \text{ kA} + 1,30 \sqrt{2} \times 10,54 \text{ kA} = 100,5 \text{ kA}$$

Podle konfigurace a hodnot impedancí na obrázku 15 se může určit, že zbytkové napětí během zkratu v místě F5 na přípojnici B bude přibližně 95 % napětí před zkratem. To vede ke zjištění, že motory M1...M7 a M15...M19 nebudou přispívat k vypínacímu proudu v místě F5 ($\mu_{Mj} = 1$ podle rovnice (75) z IEC 60909-0 ve všech případech).

$$I_{bF5} = I_{kT20M}'' + \mu_{M20} q_{M20} I_{kM20}''$$

s I_{kT20M}'' jako dílčí zkratový proud bez vlivu motorů M1...M7 a M15...M19.

$$I_{bF5} = 34,77 \text{ kA} + 0,902 \times 0,902 \times 0,67 \times 10,54 \text{ kA} = 41,1 \text{ kA}$$

Při $t_{min} = 0,02 \text{ s}$ s $\mu_{M20} = 0,84 + 0,26 e^{-0,26 \times 5,5}$ a $q_{M20} = 0,67$, které berou v úvahu $p_{rn}/p = 0,05$ MW pro ekvivalentní motor M20, (viz 3.8.2 IEC 60909-0).

Ustálený zkratový proud:

$$I_{kF5} = I_{kT20} + I_{kM20} \approx I_{kT20M}'' = 34,77 \text{ kA}$$

Protože $I_{kM20} = 0$ (viz tabulka 3 IEC 60909-0).

6 Zkušební příklad pro výpočet zkratových proudů počítačovými programy podle IEC 909

6.1 Všeobecně

Následující zkušební příklad s údaji elektrických zařízení a s výsledky zkratových proudů podle IEC 60909-0 nabízí možnost konstruktérům a uživatelům počítačových programů kontrolovat výsledky určené jejich programem v porovnání s uvedenými výsledky.

Aby se prokázala dostatečná shoda vypočtených a daných výsledků, mělo by se dosáhnout výsledků v tabulkách 12 a 13. To je nezbytná, nikoliv však postačující podmínka, protože i když výsledky testů jsou splněny, mohou některé postupy použité v jiných programech pro jiné příklady vést k odlišným výsledkům. Odchytky by neměly být větší než $\pm 0,02\%$.

Aby se zabránilo potížím v interpretaci vstupních dat elektrického zařízení (jmenovité údaje ze štítku a další údaje) ve shodě s rovnicemi z IEC 60909-0, je doplněna tabulka 11 v níž jsou uvedeny impedance mezi přípojnici testované zkušební sítě z obrázku 16, sousledné a netočivé soustavě jsou vztažené na stranu 110 kV.

Musí se vypočítat maximální trojfázové zkratové proudy na přípojnících 1 až 8 s $c = c_{\max} = 1,1$ v souladu s tabulkou 1 IEC 60909-0 a, kromě toho, se musí vypočítat maximální jednofázové zkratové proudy pouze na přípojnících 2 až 5. Zkratová impedance se musí vždy přepočítat na napěťovou hladinu, ve které je místo zkratu.

Pokud je uveden poměr R_Q/X_Q (viz rovnice (5) v IEC 60909-0) musí se komplexní impedance síťových napáječů v místě připojení vypočítat takto:

$$X_Q = \frac{1}{\sqrt{1 + (R_Q / X_Q)^2}} Z_Q,$$

Přiblížení $X_Q \approx 0,995 Z_Q$ se používá pouze pro speciální případy $R_Q/X_Q = 0,1$ (3.2 z IEC 60909-0). Podobný postup se může použít pro asynchronní motory pokud je určen poměr R_M/X_M (3.8.1 v IEC 60909-0).

Kapacity vedení se neberou v úvahu, protože součinitel zemního spojení je menší než 1,4 (2.3.2 z IEC 60909-0).

K_T je vypočítán z rovnice (12a) IEC 60909-0, protože podmínky rozložení toku výkonu nejsou pro tuto síť známy.

Pro výpočet impedančního korekčního součinitele K_{S1} pro elektrárenský blok S1 se předpokládá, že generátor je provozován pouze v přebuzeném stavu (obrázek 7 v IEC 60909-1).

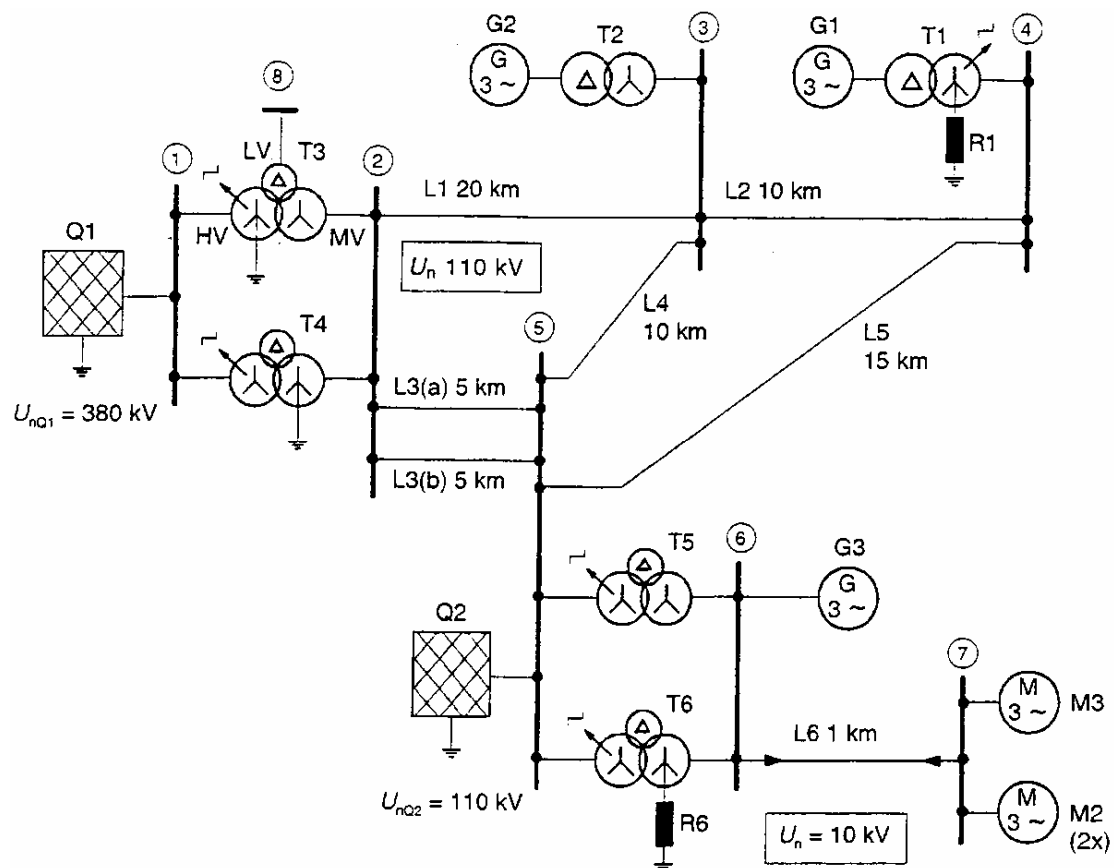
V případě záporných hodnot pro reaktance trojvinuťových transformátorů v sousledné nebo zpětné soustavě, se tyto nemohou interpretovat jako kapacity, zejména v případě výpočtu s pomocí metody ekvivalentního kmitočtu (4.3.1.2c) z IEC 60909-0). Mínusové znaménko se může vyskytnout u ekvivalentní reaktance (viz obrázek 7b v IEC 60909-0) vinutí, které je situováno mezi jiné dvě vinutí v případě trojvinuťového transformátoru (viz tabulka 3B IEC 60909-2, například č. 6).

Pokud se použije metoda 20 Hz nebo 24 Hz k určení součinitele κ v mřížových sítích musí se použít impedanční korekční součinitelé K_G , K_S a K_T ve tvaru uvedeném v IEC 60909-0.

6.2 Zkušební příklad 380 kV/110 kV/30 kV/10 kV

6.2.1 Síťová konfigurace a data

Obrázek 16 udává konfiguraci trojfázové střídavé zkušební sítě, 50 Hz, s přípojnici 1 až 8 a elektrickým zařízením. Přípojnice 1 až 8 se uvažují v případě trojfázových zkratů a přípojnice 2 až 5 v případě jednofázových zkratů. V části sítě 110 kV jsou tři uzemňovací místa: transformátor T4, elektrárenská jednotka S1 (G1 + T1) a napáječ Q2.



G1 + T1 = S1: Elektrárenská jednotka s přepínačem odboček při zatížení

G2 + T2 = S2: Elektrárenská jednotka s přepínačem odboček bez zatížení

10 kV síť s nepřímo uzemněným uzlem R6: Zhášecí tlumivka

1 ... 8 přípojnice a místa zkratu

Obrázek 16 – Zkušební příklad 380 kV/110 kV, 30 kV/10 kV

Data elektrického zařízení:**Síťové napáječe:**

Q1: $U_{nQ} = 380 \text{ kV}$; $I_{kQmax} = 38 \text{ kA}$ ($c_{max} = 1,1$); $R_Q/X_Q = 0,1$; $X_{(0)Q}/X_Q = 3$;
 $R_{(0)Q}/X_{(0)Q} = 0,15$.

Q2: $U_{nQ} = 110 \text{ kV}$; $I_{kQmax} = 16 \text{ kA}$ ($c_{max} = 1,1$); $R_Q/X_Q = 0,1$; $X_{(0)Q}/X_Q = 3,3$;
 $R_{(0)Q}/X_{(0)Q} = 0,2$.

Elektrárenské jednotky

S1: $U_{rG} = 21 \text{ kV}$; $S_{rG} = 150 \text{ MVA}$; $x_d = 0,14 \text{ p.j.}$; $x_{dsat} = 1,8 \text{ p.j.}$; $\cos \varphi_{rG} = 0,85$;
 $R_G = 0,002 \Omega$ (provoz pouze v přebuzeném stavu)
 $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 115 \text{ kV}/21 \text{ kV}$; $S_{rT} = 150 \text{ MVA}$; $u_{kr} = 16 \%$; $u_{rR} = 0,5 \%$; Ynd5 bez
přepínače odboček nebo s odbočkami bez zatížení.
 $X_{(0)T}/X_T = 1,0$; $R_{(0)T}/R_T = 1,0$.

Generátor

G3: $U_{rG} = 10,5 \text{ kV}$; $S_{rG} = 10 \text{ MVA}$; $p_G = \pm 5 \%$ (pro výpočet s konstantní hodnotou $U_G = U_{rG}$);
 $x_d = 0,1 \text{ p.j.}$; $x_{dsat} = 1,8 \text{ p.j.}$; $\cos \varphi_{rG} = 0,85$; $R_G = 0,018 \Omega$

Síťové transformátory

T3 = T4: Trojvlnuťové síťové transformátory Ynyn,d5 s přepínačem odboček při zatížení na straně vyššího napětí, $p_T = \pm 16 \%$. Uzel je uzemněný: T3 na straně vyššího napětí, T4 na straně nižšího napětí.

$$U_{rTHV} = 400 \text{ kV}; U_{rTMV} = 120 \text{ kV}; U_{rTLV} = 30 \text{ kV};$$

$$S_{rTHV} = 350 \text{ MVA}; S_{rTMV} = 350 \text{ kV}; S_{rTLV} = 50 \text{ MVA};$$

$$u_{krHVMV} = 21 \%; u_{krHVLV} = 10 \%; u_{krMVLV} = 7 \%;$$

$$u_{RrHVMV} = 0,26 \%; u_{RrHVLV} = 0,16 \%; u_{RrMVLV} = 0,16 \%;$$

$$X_{(0)TMV}/X_{TMVHV} = 2,1; R_{(0)TMV}/R_{TMVHV} = 1,0 \text{ (viz 2.2).}$$

T5 = T6: Trojvlnuťový síťový transformátor YNyn,d5, uvažovaný jako dvoujvlnuťový transformátor, tj. $u_{kr} = u_{krHVMV}$ (viz obrázek 16 a 2.2)

$$U_{rTHV}/U_{rTMV} = 115 \text{ kV}/10,5 \text{ kV}; S_{rT} = 31,5 \text{ MVA}; u_{kr} = 12 \%; u_{rR} = 0,5 \%.$$

Asynchronní motory

M1: $U_{rM} = 10 \text{ kV}$; $P_{rM} = 5 \text{ MW}$; $\cos \varphi_{rGM} = 0,88$; $\eta_{rM} = 97,5 \%$;
 $I_{LR}/I_{rM} = 5$; $p = 1$ (počet pólů).

M2: Dva paralelní motory, každý s $P_{rM} = 2 \text{ MW}$:

$$U_{rM} = 10 \text{ kV}; P_{rM} = 2 \text{ MW}; \cos \varphi_{rGM} = 0,89; \eta_{rM} = 96,8 \%;$$

$$I_{LR}/I_{rM} = 5,2; p = 2$$

Tlumivky

R1: $X_{R1} = 22 \Omega$; $R_{R1} \ll X_{R1}$ (omezovací tlumivka)

R6: Zhášecí tlumivka pro 10 kV v síti s nepřímo uzemněným uzlem

Minimální doba vypnutí

$t_{\min} = 0,1$ s, pro výpočet μ a q

Tabulka 10 – Venkovní vedení a kabely

Č.	l	$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}$	$\underline{Z}_{(0)}$	Poznámky
	km	Ω/km	Ω/km	
L1	20	$0,12 + j 0,39$	$0,32 + j 1,26$	Hodnoty platí pro jeden potah dvojitého venkovního vedení
L2	10	$0,12 + j 0,39$	$0,32 + j 1,26$	
L3 (a)	5	$0,12 + j 0,39$	$0,52 + j 1,86$	
L3 (b)	5	$0,12 + j 0,39$	$0,52 + j 1,86$	
L4	10	$0,096 + j 0,388$	$0,22 + j 1,10$	
L5	15	$0,12 + j 0,386$	$0,22 + j 1,10$	
L6	1	$0,082 + j 0,086$	-	10 kV kabel

6.2.2 Zkratové impedance elektrických zařízení

Tabulka 11 udává zkratové impedance elektrického zařízení v sousledné a netočivé soustavě vypočítaných z údajů uvedených v 6.2.1 v souladu s IEC 60909-0 včetně impedančních korekčních součinitelů K_G , K_S a K_T . Doplňující index t je používán pro takové hodnoty, které jsou vztaženy na stranu 110 kV (viz obrázek 16). Impedanční korekční součinitelé pro trojvinuťové transformátory T3 = T4 jsou vypočítány tak, jak je uvedeno v příkladu 2.2.

Tabulka 11 – Impedance elektrického zařízení (viz obrázek 16) vztážené na stranu 110 kV. $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}$

Zařízení	Sousledná soustava \underline{Z}	Netočivá soustava $\underline{Z}_{(0)}$	
	Ω	Ω	
Q1 Q1t Q2	$\underline{Z}_{Q1} = 0,631933 + j 6,319335$ $\underline{Z}_{Q1t} = 0,056874 + j 0,568740$ $\underline{Z}_{Q2} = 0,434454 + j 4,344543$	- - $\underline{Z}_{Q2} = 2,867398 + j 14,336991$	
T3 = T4 T5 = T6	$\underline{Z}_{T3AMV} = 0,045714 + j 8,096989$ ¹⁾ $\underline{Z}_{T3BMV} = 0,053563 - j 0,079062$ ¹⁾ $\underline{Z}_{T3CMV} = 0,408568 + j 20,292035$ ¹⁾ $\underline{Z}_{T5MV} = 2,046454 + j 49,072241$	$\underline{Z}_{(0)T4MV} = 0,107281 + j 18,195035$ ³⁾	$K_{TAB} = 0,928072$ ²⁾ $K_{TAC} = 0,985856$ ²⁾ $K_{TBC} = 1,002890$ ²⁾ $K_T = 0,974870$
S1 S2	$\underline{Z}_{S1} = 0,498795 + j 26,336676$ $\underline{Z}_{S2} = 1,203944 + j 35,340713$	$\underline{Z}_{(0)T1} = 0,439059 + j 13,340874$ ⁴⁾	$K_S = 0,995972$ $K_S = 0,876832$
G3 G3t	$\underline{Z}_{G3} = 0,017790 + j 1,089623$ $\underline{Z}_{G3t} = 2,133964 + j 130,705301$	- -	$K_G = 0,988320$
M1 M1t M2 (2) M2t (2)	$\underline{Z}_{M1} = 0,341497 + j 3,414968$ $\underline{Z}_{M1t} = 40,964124 + j 409,641243$ ⁵⁾ $\underline{Z}_{M2} = 0,412137 + j 4,121368$ $\underline{Z}_{M2t} = 49,437719 + j 494,377190$ ⁵⁾		Dva paralelní motory 2 MW
L1 L2 L3 (DL) L4 L5 L6 L6t	$\underline{Z}_{L1} = 2,4 + j 7,8$ $\underline{Z}_{L2} = 1,2 + j 3,9$ $\underline{Z}_{L3} = 0,3 + j 0,975$ $\underline{Z}_{L4} = 0,96 + j 3,88$ $\underline{Z}_{L5} = 1,8 + j 5,79$ $\underline{Z}_{L6} = 0,082 + j 0,086$ $\underline{Z}_{L6t} = 9,836281 + j 10,3161008$	$\underline{Z}_{(0)L1} = 6,4 + j 25,2$ $\underline{Z}_{(0)L2} = 6,4 + j 25,2$ $\underline{Z}_{(0)L3} = 6,4 + j 25,2$ $\underline{Z}_{(0)L4} = 6,4 + j 25,2$ $\underline{Z}_{(0)L5} = 6,4 + j 25,2$ - -	Dvojitě vedení Kabel
R1	-	$\underline{Z}_{(0)R1} = 0,0 + j 66,0$	$\underline{Z}_{(0)R1} = 3 \underline{Z}_{R1}$
¹⁾ Ekvivalentní impedance vztážená na stranu MV (index MV) a korigovaná (obrázek 7 v IEC 60909-0) ²⁾ Výpočet korekčních součinitelů, viz 2.2 (3.3.3 IEC 60909-0) ³⁾ Korekce pomocí K_{TBC} , viz 2.2 (3.3.3 IEC 60909-0) ⁴⁾ Korekce pomocí $K_S = 0,995975$ ⁵⁾ \underline{Z}_{M1t} paralelně k \underline{Z}_{M2t} : (22,401898 + j 224,018979) Ω			
V tomto případě jsou výsledky jsou uvedeny s přesností na šest desetinných čísel. Poslední číslice je zaokrouhlena.			

6.3 Výsledky

Výsledky uvedené v tabulkách 12 a 13 pro zkratové proudy vypočítané podle IEC 60909-0 vycházejí z údajů uvedených v článku 2.2. Výsledky jsou uvedeny s přesností na čtyři desetinná místa, mimo případu I_b a I_k kde jsou výsledky pouze na tři desetinná čísla. Poslední číslo je zaokrouhleno.

Pokud použijeme program pro výpočet zkušební sítě, výsledky by měly být stejné jako ty, které jsou uvedené v tabulkách 12 a 13; v případě výpočtu I_p záleží na metodě použité k určení součinitele κ . Když jsou zde odchylky, mohou být menší než $\pm 0,02\%$, jak je zmíněno v 6.1.

6.3.1 Trojfázové zkratové proudy

Tabulka 12 udává zkratové proudy I_k'' , I_p , I_b a I_k v případě trojfázových zkratů na přípojnicích 1 až 8 (zkratová místa F).

Tabulka 12 – Výsledky I_{k1} , i_p , I_b a I_k

F	U_n kV	I_{k1} ¹⁾ kA	$i_p(50)$ ²⁾ kA	$i_p(20)$ ³⁾ kA	I_b ⁴⁾ kA	I_k ⁵⁾ kA
1	380	40,6447	100,5766	100,5677	40,645 ⁶⁾	40,635
2	110	31,7831	80,8249	80,6079	31,570	31,663
3	110	19,6730	45,8249	45,8111	19,388	19,623
4	110	16,2277	36,8041	36,8427	16,017	16,196
5	110	33,1894	83,6266	83,4033	32,795	32,997
6	10	37,5629	99,1910	98,1334	34,028	34,356
7	10	25,5895	51,3864	51,6899	23,212	22,276
8	30	13,5778	36,9201	36,9227	13,578 ⁶⁾	13,573

¹⁾ $c = c_{max} = 1,1$;

²⁾ $\kappa = f(R_k/X_k)$ bez součinitele 1,15 (viz 4.3.1.2) a tabulka 11 z IEC 60909-0, který bere v úvahu, že kabel L6 je zapojen do série s asynchronními motory a tvoří společnou větev, přičemž venkovní vedení má poměr $R/X \approx 0,3$. V případě zkratu v místě 7, L6 je větev a pak se musí použít součinitel 1,15. Proud $i_p(50)$ se vynásobí 1,15.

³⁾ κ vypočítaný pomocí 20 Hz metody (4.3.1.2 c) z IEC 60909-0).

⁴⁾ I_b je vypočítán pomocí rovnice (75) z IEC 60909-0 a $t_{min} = 0,1$ s.

⁵⁾ $I_k = I_{kM}$ (4.6.3 v IEC 60909-0).

⁶⁾ Vzdálený zkrat $I_b = I_k$ (4.5.1 v IEC 60909-0). Pro elektricky vzdálený zkrat platí $\mu_{Mj} = 1$.

6.3.2 Jednofázové zkratové proudy

Tabulka 13 udává zkratové proudy I_{k1}'' a i_{p1} v případě jednofázových zkratů na přípojnicích 2 až 5. Nárazový zkratový proud i_{p1} s $\kappa_{(1)}$ je vypočítán s $\kappa_{(1)}$ určeným ze sousledných impedancí ve zkratových místech F pomocí metody 20 Hz. Nárazový zkratový proud i_{p1} s $\kappa_{(012)}$ je vypočítán s $\kappa_{(012)} = (R_{(0)} + R_{(1)} + R_{(2)}) / (X_{(0)} + X_{(1)} + X_{(2)})$ v místech zkratu, které používají metodu 20 Hz.

Tabulka 13 – Výsledky I_k'' a i_{p1}

F	U_n kV	$I_{k1}''^{1)}$ kA	i_p s $\kappa_{(1)}^{2)}$ kA	i_p s $\kappa_{(012)}^{3)}$ kA	$X_{(0)}/X_{(1)}^{4)}$ -
2	110	15,9722	40,5086	39,9641	3,961
3	110	10,4106	24,2424	24,2635	3,666
4	110	9,0498	20,5463	21,0415	3,394
5	110	170452	42,8337	41,4303	3,823

¹⁾ $I_{k1}'' = I_{b1} = I_{k1}$ (viz 4.5.2.4 a 4.6.4 v IEC 60909-0), $c = c_{max} = 1,1$

²⁾ $i_{p1} = \kappa_{(1)} \sqrt{2} I_{k1}''$ s $\kappa_{(1)}$ určeném pomocí metody 20 Hz pro impedance sousledné soustavy v místě zkratu (viz 4.3.1.2c), metoda (c) v IEC 60909-0)

³⁾ $\kappa_{(012)}$ je vypočítán pomocí metody 20 Hz, která bere v úvahu netočivé, sousledné a zpětné impedance v sérii v místě zkratu.

⁴⁾ Pouze pro informaci: $X_{(0)}/X_{(1)} \approx 3,4...4,0 \rightarrow I_{k1}''/I_k'' \approx 0,56...0,5$, součinitel zemního spojení $\leq 1,4$

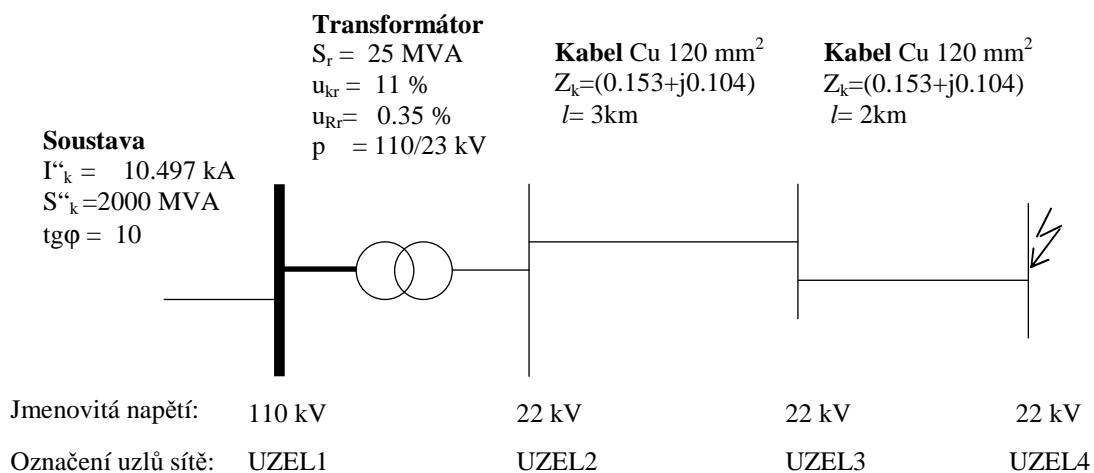
7. Příklady výpočtu zkratových poměrů v elektrických sítích

V následující kapitole si ukážeme na jednoduchém příkladu použití několika výpočetních postupů. V závěru pak porovnáme výsledky dosažené pomocí těchto postupů a vyhodnotíme odchylky v dosažených výsledcích.

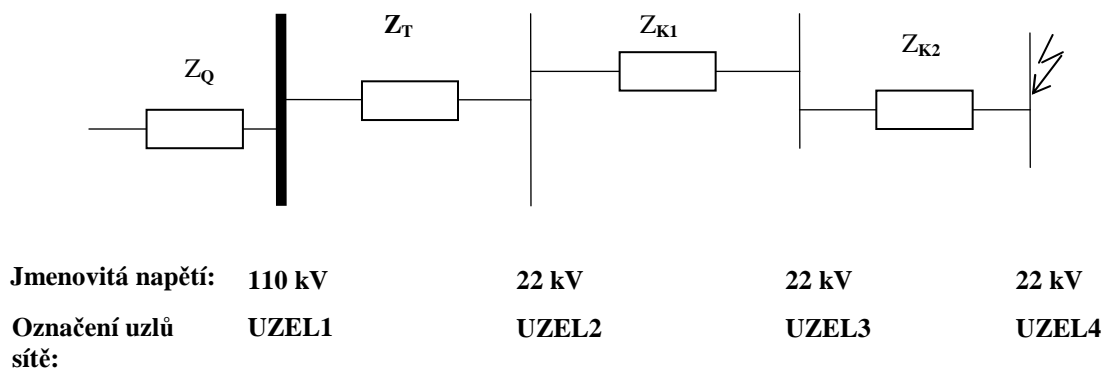
Ukázka zahrnuje 7 postupů výpočtu zkratového proudu na konci paprskové sítě 22 kV napájené z transformovny 110/22 kV. Transformátor má jmenovitý výkon 25 MVA. Jsou to:

- 1) Zjednodušený výpočet se zanedbáním činného odporu použitých zařízení, převod transformátoru (fiktivní), je dán napětím sítí, které transformátor spojuje. Výpočet v ohmických hodnotách.
- 2) Zjednodušený výpočet se zanedbáním činného odporu použitých zařízení, převod transformátoru (fiktivní), je dán napětím sítí, které transformátor spojuje. Výpočet v procentních hodnotách.
- 3) Výpočet s uvážením impedancí použitých zařízení, převod transformátoru (fiktivní), je dán napětím sítí, které transformátor spojuje. Komplexní výpočet v ohmických hodnotách.
- 4) Výpočet s uvážením impedancí použitých zařízení, převod transformátoru (fiktivní), je dán napětím sítí, které transformátor spojuje. Komplexní výpočet v procentních hodnotách.
- 5) Výpočet s uvážením impedancí použitých zařízení, převod transformátoru je jmenovitý. Komplexní výpočet v ohmických hodnotách.
- 6) Výpočet s uvážením impedancí použitých zařízení, převod transformátoru je jmenovitý. Komplexní výpočet v procentních hodnotách.
- 7) Ukázka použití programu pro výpočet zkratových poměrů v elektrických sítích pro danou úlohu.

Schéma zapojení sítě a štítkové údaje zařízení



Výpočtové schéma



- 1) Zjednodušený výpočet se zanedbáním činného odporu použitých zařízení, převod transformátoru (fiktivní), je dán napětím sítí, které transformátor spojuje. Výpočet v ohmických hodnotách.

$$X_{Q(110)} \cong \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_k''} = \frac{1.1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 10.497} = 6.65499 \Omega$$

$$X_{Q(22)} \cong X_{Q(110)} \cdot \frac{1}{p^2} = \left(\frac{22}{110}\right)^2 \cdot 6.65499 = 0.266199 \Omega$$

$$X_{T(22)} \cong u_{kr} \cdot \frac{U_n^2}{100 \cdot S_n} = 11 \cdot \frac{22^2}{100 \cdot 25} = 2.1296 \Omega$$

$$X_{K1+K2(22)} = X_{k(22)} \cdot (l_{k1} + l_{k2}) = 0.104 \cdot 5 = 0.52 \Omega$$

$$X_{náhr} = X_{K1+K2(22)} + X_{T(22)} + X_{Q(22)} = 0.52 + 2.1296 + 0.266199 = 2.911579 \Omega$$

$$I_{k(3)}'' = c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot X_{náhr}} = \frac{1.1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 2.911579} = 4.79 \text{ kA}$$

$$S_{k(3)}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k(3)}'' = \sqrt{3} \cdot 4.79 \cdot 22 = 182.6 \text{ MVA}$$

- 2) Zjednodušený výpočet se zanedbáním činného odporu použitých zařízení, převod transformátoru (fiktivní), je dán napětím sítí, které transformátor spojuje. Výpočet v procentních hodnotách, $S_v=100$ MVA.

$$x_Q \cong \frac{c \cdot 100 \cdot S_v}{S_k''} = \frac{1.1 \cdot 100 \cdot 100}{2000} = 5.5 \%$$

$$x_T \cong \frac{u_r \cdot S_v}{S_r} = \frac{11 \cdot 100}{25} = 44 \%$$

$$X_{K1+K2(22)} = X_{k(22)} \cdot (l_{k1} + l_{k2}) = 0.104 \cdot 5 = 0.52 \Omega$$

$$x_{K1+K2} = X_{k1+k2(22)} \cdot \frac{100 \cdot S_v}{U_n^2} = 0.52 \cdot \frac{100 \cdot 100}{22^2} = 10.74 \%$$

$$x_{\text{náhr}} = x_{K1+K2} + x_T + x_Q = 10.74 + 44 + 5.5 = 60.24 \%$$

$$S_{k(3)}'' = \frac{c \cdot 100 \cdot S_v}{x_{\text{náhr}}} = \frac{1.1 \cdot 100 \cdot 100}{60.24} = 182.6 \text{ MVA}$$

$$I_{k(3)}'' = \frac{S_{k(3)}''}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{182.6}{\sqrt{3} \cdot 22} = 4.79 \text{ kA}$$

- 3) Výpočet s uvážením impedancí použitých zařízení, převod transformátoru (fiktivní), je dán napětím sítí, které transformátor spojuje. Komplexní výpočet v ohmických hodnotách.

$$Z_{Q(110)} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_k''} = \frac{11 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 10.497} = 6.65499 \Omega$$

$$Z_{Q(22)} = Z_{Q(110)} \cdot \frac{1}{p^2} = \left(\frac{22}{110}\right)^2 \cdot 6.65499 = 0.266199 \Omega$$

pro $\text{tg}\varphi=10$ je hledaná reaktance:

$$X = \sqrt{\frac{Z^2}{1 + \frac{1}{\text{tg}^2 \varphi}}} = \sqrt{\frac{Z^2}{1.01}} = \sqrt{0.990099 \cdot Z^2} = 0.995 \cdot Z$$

$$X_{Q(22)} = Z_{Q(22)} \cdot 0.995 = 0.2648689 \Omega$$

$$R_{Q(22)} = X_{Q(22)} \cdot 0.1 = 0.02648689 \Omega$$

$$Z_{T(22)} = u_{kr} \cdot \frac{U_r^2}{100 \cdot S_r} = 11 \cdot \frac{22^2}{100 \cdot 25} = 2.1296 \Omega$$

$$R_{T(22)} = u_{Rr} \cdot \frac{U_r^2}{100 \cdot S_r} = 0.35 \cdot \frac{22^2}{100 \cdot 25} = 0.06776 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{2.1296^2 - 0.06776^2} = 2.1285 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{K1+K2(22)} = \mathbf{Z}_{k(22)} \cdot (l_{k1} + l_{k2}) = (0.153 + j0.104) \cdot 5 = (0.765 + j0.52) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{\text{náhr}} = \mathbf{Z}_{K1+K2(22)} + \mathbf{Z}_{T(22)} + \mathbf{Z}_{Q(22)} = (0.85925 + j2.913369) \Omega$$

$$\mathbf{I}_{k(3)}'' = \mathbf{c} \cdot \frac{\mathbf{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{Z}_{\text{náhr}}} = \frac{1.1 \cdot (22 + j0)}{\sqrt{3} \cdot (0.85925 + j2.913369)} = (1.301 - j4.412) \text{ kA}$$

$$\mathbf{S}_{k(3)}'' = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_n \cdot \mathbf{I}_{k(3)}'' = \sqrt{3} \cdot (22 + j0) \cdot (1.301 - j4.412) = (49.58 - j168.1) \text{ [MW;MVAr]}$$

$$I_{k(3)}'' = |\mathbf{I}_{k(3)}''| = |1.30124 - j4.412| = 4.6 \text{ kA}$$

$$S_{k(3)}'' = |\mathbf{S}_{k(3)}''| = |49.58 - j168.12| = 175.28 \text{ MVA}$$

- 4) Výpočet s uvažováním impedancí použitých zařízení, převod transformátoru je fiktivní daný napětím sítí, které transformátor spojuje. Komplexní výpočet v procentních hodnotách.

$$z_Q = \frac{c \cdot 100 \cdot S_v}{S_k''} = \frac{1.1 \cdot 100 \cdot 100}{2000} = 5.5 \%$$

$$x_Q = z_Q \cdot 0.995 = 5.4725 \%$$

$$r_{Q(\prime)} = x_Q \cdot 0.1 = 0.54725 \%$$

$$z_T = \frac{u_r \cdot S_v}{S_r} = \frac{11 \cdot 100}{25} = 44 \%$$

$$r_T = \frac{u_{Rr} \cdot S_v}{S_r} = \frac{0.35 \cdot 100}{25} = 1.4 \%$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} = \sqrt{44^2 - 1.4^2} = 43.9777 \%$$

$$\mathbf{z}_{K1+K2} = \mathbf{z}_{k(22)} \cdot \frac{100 \cdot S_v}{U_n^2} = (0.765 + j0.52) \cdot \frac{100 \cdot 100}{22^2} = (15.8058 + j10.7438) \%$$

$$\mathbf{z}_{náhr} = \mathbf{z}_{K1+K2(22)} + \mathbf{z}_{T(22)} + \mathbf{z}_{Q(22)} = (17.75295 + j60.194) \%$$

$$\mathbf{S}_{k(3)}'' = \frac{c \cdot 100 \cdot \mathbf{S}_v}{\mathbf{z}_{náhr}} = \frac{1.1 \cdot 100 \cdot (100 + j0)}{17.75295 + j60.194} = (49.58 - j168.1) \text{ [MW; MVAr]}$$

$$\mathbf{I}_{k(3)}'' = \frac{\mathbf{S}_{k(3)}''}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_n} = \frac{49.58 - j168.1}{\sqrt{3} \cdot (22 + j0)} = (1.301 - j4.412) \text{ kA}$$

$$S_{k(3)}'' = |\mathbf{S}_{k(3)}''| = |49.58 - j168.1| = 175.28 \text{ MVA}$$

$$I_{k(3)}'' = |\mathbf{I}_{k(3)}''| = |1.301 - j4.412| = 4.6 \text{ kA}$$

5) Výpočet s uvažováním impedancí použitých zařízení, převod transformátoru je jmenovitý. Komplexní výpočet v ohmických hodnotách.

$$p = \frac{110}{23}$$

$$\frac{1}{p^2} = \left(\frac{23}{110}\right)^2$$

$$Z_{Q(22)} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_k''} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{1.1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 10.497} \cdot \left(\frac{23}{110}\right)^2 = 0.2909499 \Omega$$

pro $\text{tg}\varphi=10$ je hledaná reaktance:

$$X = \sqrt{\frac{Z^2}{1 + \frac{1}{\text{tg}^2\varphi}}} = \sqrt{\frac{Z^2}{1.01}} = \sqrt{0.990099 \cdot Z^2} = 0.995 * Z$$

$$X_{Q(22)} = Z_{Q(22)} \cdot 0.995 = 0.289495 \Omega$$

$$R_{Q(22)} = X_{Q(22)} \cdot 0.1 = 0.0289495 \Omega$$

$$Z_{T(22)} = u_{kr} \cdot \frac{U_r^2}{100 \cdot S_r} = 11 \cdot \frac{23^2}{100 \cdot 25} = 2.3276 \Omega$$

$$R_{T(22)} = u_{Rr} \cdot \frac{U_r^2}{100 \cdot S_r} = 0.35 \cdot \frac{23^2}{100 \cdot 25} = 0.07406 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{2.3276^2 - 0.07406^2} = 2.3264 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{K1+K2(22)} = \mathbf{Z}_{k(22)} \cdot (l_{k1} + l_{k2}) = (0.153 + j0.104) \cdot 5 = (0.765 + j0.52) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{\text{náhr}} = \mathbf{Z}_{K1+K2(22)} + \mathbf{Z}_{T(22)} + \mathbf{Z}_{Q(22)} = (0.868 + j3.1359) \Omega$$

$$\mathbf{I}_{k(3)}'' = c \cdot \frac{\mathbf{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{Z}_{\text{náhr}}} = \frac{1.1 \cdot (22 + j0)}{\sqrt{3} \cdot (0.868 + j2.1359)} = (1.145 - j4.138) \text{ kA}$$

$$\mathbf{S}_{k(3)}'' = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_n \cdot \mathbf{I}_{k(3)}'' = \sqrt{3} \cdot (22 + j0) \cdot (1.145 - j4.138) = (43.69 - j157.68) \text{ [MW; MVAr]}$$

$$I_{k(3)}'' = |\mathbf{I}_{k(3)}''| = |1.145 - j4.138| = 4.29 \text{ kA}$$

$$S_{k(3)}'' = |\mathbf{S}_{k(3)}''| = |43.69 - j157.68| = 163.6 \text{ MVA}$$

6) Výpočet s uvažováním impedancí použitých zařízení, převod transformátoru je jmenovitý. Komplexní výpočet v procentních hodnotách.

$$p_p = \frac{U_{r1T}}{U_{r2T}} \cdot \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = \frac{110}{23} \cdot \frac{22}{110}$$

$$\frac{1}{p_p^2} = \left(\frac{23}{22}\right)^2 = 1.092975$$

$$z_Q = \frac{c \cdot 100 \cdot S_v}{S_k''} = \frac{1.1 \cdot 100 \cdot 100}{2000} = 5.5 \%$$

$$x_Q = z_Q \cdot 0.995 = 5.4725 \%$$

$$r_Q = x_Q \cdot 0.1 = 0.54725 \%$$

$$\mathbf{z}_{Qkor} = \mathbf{z}_Q \cdot \frac{1}{p_p^2} = (0.59813 + j5.9813) \%$$

$$z_T = \frac{u_r \cdot S_v}{S_r} = \frac{11 \cdot 100}{25} = 44 \%$$

$$r_T = \frac{u_{Rr} \cdot S_v}{S_r} = \frac{0.35 \cdot 100}{25} = 1.4 \%$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} = \sqrt{44^2 - 1.4^2} = 43.9777 \%$$

$$\mathbf{z}_{Tkor} = \mathbf{z}_T \cdot \frac{1}{p_p^2} = (1.53 + j48.066) \%$$

$$\mathbf{z}_{K1+K2} = \mathbf{z}_{k(22)} \cdot \frac{100 \cdot S_v}{U_n^2} = (0.765 + j0.52) \cdot \frac{100 \cdot 100}{22^2} = (15.8058 + j10.7438) \%$$

$$\mathbf{z}_{náhr} = \mathbf{z}_{K1+K2(22)} + \mathbf{z}_{T(22)} + \mathbf{z}_{Q(22)} = (17.933 + j64.7911) \%$$

$$\mathbf{S}_{k(3)}'' = \frac{c \cdot 100 \cdot \mathbf{S}_v}{\mathbf{z}_{náhr}} = \frac{1.1 \cdot 100 \cdot (100 + j0)}{17.933 + j64.7911} = (43.63 - j157.68) \text{ [MW;MVAr]}$$

$$\mathbf{I}_{k(3)}'' = \frac{\mathbf{S}_{k(3)}''}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_n} = \frac{43.63 + j157.68}{\sqrt{3} \cdot (22 + j0)} = (1.144 - j4.138) \text{ kA}$$

$$S_{k(3)}'' = \left| \mathbf{S}_{k(3)}'' \right| = \left| 43.63 - j157.68 \right| = 163.6 \text{ MVA}$$

$$I''_{k(3)} = |I''_{k(3)}| = |1.145 - j4.138| = 4.29 \text{ kA}$$

7) Ukázka použití programu pro výpočet zkratových poměrů v elektrických sítích pro tento příklad.

Vstupní data

Vstupní data se zadají formou ASCII souboru.

Příklad výpočtu zkratu v síti 22 kV
Výpočet s impedancemi, fiktivní převod
2

```
110  1.1    1
22   1.1    1
```

SOUSTAVA

*NAZ	Un	Sk3"	X1/R1	Sk1"	X0/R0	c	Obl	Ith	poc
UZEL1	110	2000	10	0.000001	10	1.1	1	25	A

UZLY

UZEL2	22	0	0	0	0	1	12
UZEL3	22	0	0	0	0	2	12
UZEL4	22	0	0	0	0	2	12

2VTRANSFORMATORY

*NAZ	POC	KONC	uk%	Pk	Sn	R0	X0	ktr	VYP
TR1	UZEL1	UZEL2	11	87.5	25	1	1	1	

VETVE1

*NAZ	POC	KONC	R1	X1	R0	X0	DELKA	ZAP	POZNAMKA
K1	UZEL2	UZEL3	0.153	0.104	1	1	3	0	
K2	UZEL3	UZEL4	0.153	0.104	1	1	2	0	

KONEC

Poznámka:

Data se zadávají ve jmenovitých hodnotách zařízení.

Program počítá zkrat postupně pro každý uzel. Jako výsledek dostaneme celkové hodnoty trojfázových souměrných počátečních rázových zkratových proudů a výkonů v komplexní formě a příspěvky po jednotlivých vedeních.

V následující tabulce jsou vidět celkové hodnoty trojfázových souměrných počátečních rázových zkratových proudů a výkonů a také celkové trojfázových hodnoty nárazových a oteplovacích proudů.

V poslední tabulce můžeme vidět i celkové hodnoty dvojfázového zkratu v každém uzlu sledované sítě.

Výsledky

Příklad výpočtu zkratu v síti 22 kV
Výpočet s impedancemi, fiktivní převod

VÝSLEDNE KOMPLEXNÍ HODNOTY TROJFAZOVÝCH A JEDNOFAZOVÝCH ZKRATU
(Výpočet maximálních zkratu uvazuje se c_{max})

ZKRAT V	I(3)	UH(3)	IRE(3)	IIM(3)	SK(3)
UZEL1	[kA]	[DEG]	[kA]	[kA]	[MVA]

PRISPEVEK OD

UZEL2	.000	.00	.000	.000	.00
UZEL1	10.497	-84.29	1.045	-10.445	2000.00

CELKEM	10.497	-84.29	1.045	-10.445	2000.00
--------	--------	--------	-------	---------	---------

ZKRAT V	I(3)	UH(3)	IRE(3)	IIM(3)	SK(3)
UZEL2	[kA]	[DEG]	[kA]	[kA]	[MVA]

PRISPEVEK OD

UZEL1	5.833	-87.74	.230	-5.829	222.27
UZEL3	.000	.00	.000	.000	.00
UZEL2	.000	.00	.000	.000	.00

CELKEM	5.833	-87.74	.230	-5.829	222.27
--------	-------	--------	------	--------	--------

ZKRAT V	I(3)	UH(3)	IRE(3)	IIM(3)	SK(3)
UZEL3	[kA]	[DEG]	[kA]	[kA]	[MVA]

PRISPEVEK OD

UZEL2	5.060	-78.44	1.014	-4.957	192.80
UZEL4	.000	.00	.000	.000	.00
UZEL3	.000	.00	.000	.000	.00

CELKEM	5.060	-78.44	1.014	-4.957	192.80
--------	-------	--------	-------	--------	--------

ZKRAT V	I(3)	UH(3)	IRE(3)	IIM(3)	SK(3)
UZEL4	[kA]	[DEG]	[kA]	[kA]	[MVA]

PRISPEVEK OD

UZEL3	4.600	-73.57	1.301	-4.412	175.28
UZEL4	.000	.00	.000	.000	.00

CELKEM	4.600	-73.57	1.301	-4.412	175.28
---------------	--------------	---------------	--------------	---------------	---------------

Příklad výpočtu zkratu v síti 22 kV
Výpočet s impedancemi, fiktivní převod
(Oteplovací proudy v síti jsou počítány pro $t_k = 1.0$ s)

UZEL	Un	Ik" 3f	Sk" 3f	Ik" 1f	Sk" 1f	Ikm 3f	Ikm 1f	Ike 3f	Ike 1f	Ith-1s
	[kV]	[kA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[kA]	[kA]	[kA]	[kA]
UZEL1	10.000	10.497	2000.0	.000	.0	25.689	.000	10.663	.000	25.00
UZEL2	22.000	5.833	222.3	.000	.0	15.539	.000	6.064	.000	12.00
UZEL3	22.000	5.060	192.8	.000	.0	10.919	.000	5.099	.000	12.00
UZEL4	22.000	4.600	175.3	.000	.0	9.081	.000	4.625	.000	12.00

Příklad výpočtu zkratu v síti 22 kV
Výpočet s impedancemi, fiktivní převod

UZEL	Un [kV]	Ik" 3f [kA]	Sk" 3f [MVA]	Ik" 1f [kA]	Sk" 1f [MVA]	Ik" 2f [kA]	Sk" 2f [MVA]	Ik" 2fz [kA]	Sk" 2fz [MVA]	Ith-1s [kA]
UZEL1	110.000	10.497	2000.0	.000	.0	9.091	1732.1	.000	.0	25.00
UZEL2	22.000	5.833	222.3	.000	.0	5.052	192.5	.000	.0	12.00
UZEL3	22.000	5.060	192.8	.000	.0	4.382	167.0	.000	.0	12.00
UZEL4	22.000	4.600	175.3	.000	.0	3.984	151.8	.000	.0	12.00

Porovnání výsledků výpočtů zkratů

a) Zjednodušený výpočet s uvážením jedné složky impedance, podle bodu 1 a 2.

$$I_k'' = 4,79 \text{ kA} \quad 112 \% \quad (\text{z výpočtu v bodu c})$$

b) Výpočet s uvážením impedancí, převod transformátoru je daný jmenovitým napětím propojovaných sítí (fiktivní) podle bodu, 3 a 4..

$$I_k'' = 4,6 \text{ kA} \quad 107 \% \quad (\text{z výpočtu v bodu c})$$

c) Výpočet s uvážením impedancí, převod transformátoru je daný jmenovitým napětím transformátoru (jmenovitý) podle bodu 5 a 6.

$$I_k'' = 4,29 \text{ kA} \quad 100 \%$$

d) Výpočet podle počítačového programu podle bodu 7, který vychází z metody uvedené v bodech 3 a 4.

$$I_k'' = 4,6 \text{ kA} \quad 107 \% \quad (\text{z výpočtu v bodu c})$$

Z porovnání výsledků v výpočtů zkratů vidíme, že z hlediska dimenzování zařízení je zjednodušený výpočet na straně bezpečnosti proti ostatním výpočtům. Výsledky výpočtu podle bodů 5 a 6 závisí to na jmenovitém převodu použitého transformátoru a mohou být ve srovnání s body 3 a 4 vyšší nebo nižší.

Zběžný výpočet podle bodů 1 a 2 se používá když potřebujeme rychlý odhad zkratových proudů v síti.

V praxi se u nás často používá výpočet s impedancemi podle bodů 3 a 4 s uvážením fiktivního převodu.

Výpočet s impedancemi a uvážením jmenovitých převodů podle bodů 5 a 6 použijeme, pokud chceme provést podrobný výpočet.