

## 7 Model části elektrizační soustavy

Pomocí ATPDraw (verze 3) je sestaven model části elektrizační soustavy podle obrázku v první kapitole. V této části soustavy je simulován třífázový zkrat a úder blesku do vedení jako typické příklady přechodných dějů.

### 7.1 Parametry elektrizační soustavy

Následují parametry jednotlivých prvků soustavy podle Obr. 7.1 tedy transformátorů, vedení a generátorů.

Tab. 7.1 Parametry transformátorů

Transformátor	Jmenovitý výkon (MV·A)	Napětí nakrátko (%)	Proud naprázdno (%)	Ztráty nakrátko (kW)	Ztráty naprázdno (kW)
T 1 6/22 kV	10	9,6	0,4	30	13
T 2 6/22 kV	10	9,6	0,4	30	13
T 3 6/22 kV	10	9,6	0,4	30	13
T 4 110/22 kV	40	11,5	0,4	40	25,6

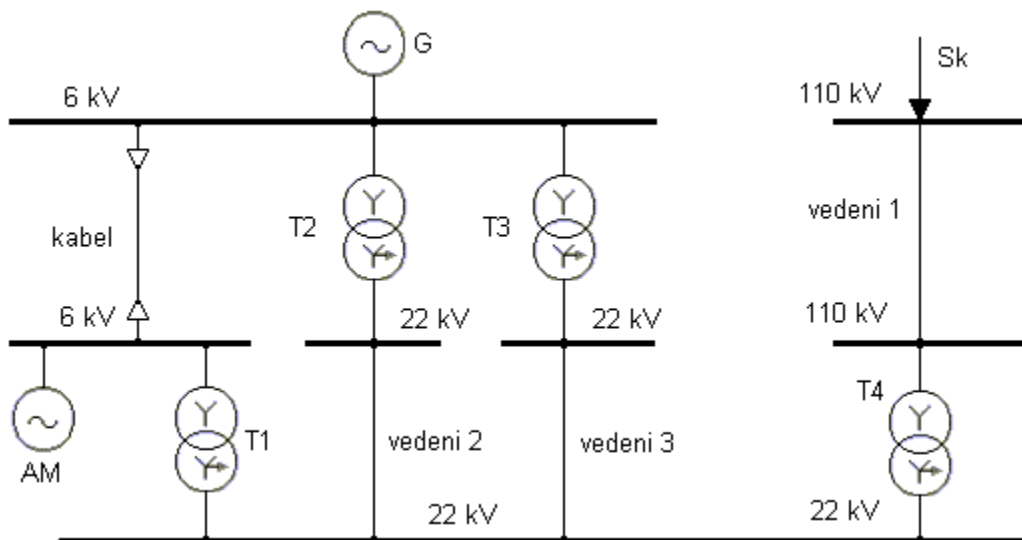
Tab. 7.2 Parametry vedení a kabelu

Vedení, kabel	Délka (km)	Typ	Typ stožáru, uložení	Odpor na 1 km délky (Ω/km)	Reaktance na 1 km délky (Ω/km)	Počet paralelních větví
Kabel 6 kV	0,5	3 x 240 Al	Zem	0,326	0,074	Trojité
Vedení 1 110 kV	6	AlFe6 120 mm <sup>2</sup>	Viz. Obr.7.4	Neuvažuje se	0,26	Jednoduché
Vedení 2 22 kV	0,5	AlFe6 95 mm <sup>2</sup>	Viz. Obr.7.3	Neuvažuje se	0,27	Dvojité
Vedení 3 22 kV	0,5	AlFe6 95 mm <sup>2</sup>	Viz. Obr.7.3	Neuvažuje se	0,27	Dvojité

Síť má na přípojnici 110 kV zkratový výkon  $S_K = 1000 \text{ MV}\cdot\text{A}$ . Do přípojnice 6 kV pracuje synchronní generátor o jmenovitém výkonu  $S_G = 100 \text{ MV}\cdot\text{A}$ . (Parametry generátoru viz. Tab. 7.3) Na přípojnici 6 kV je připojena soustava asynchronních motorů o celkovém instalovaném výkonu  $S_M = 6 \text{ MV}\cdot\text{A}$ , poměrný záběrný proud je roven  $i_z = 7$ , proudový odběr 200 A, účinnost 0,9.

Tab. 7.3 Parametry synchronního generátoru

Jmenovitý výkon (MV·A)	Jmenovité napětí (kV)	Rázová reaktance (-)	Počet pólů
100	6	0,135	4



Obr. 7.1 Schéma části elektrizační soustavy

## 7.2 Výpočet třífázového zkratu

Jako příklad přechodného děje je uveden výpočet 3fázového zkratu na přípojnici 6 kV. Výpočet je proveden v poměrných jednotkách, kdy je volen vztažný výkon  $S_v = 1000 \text{ MV}\cdot\text{A}$  a vztažné napětí  $U_v = 6 \text{ kV}$ . Pro jednotlivé prvky v poměrných veličinách platí:

reaktance soustavy:

$$x_S = c \cdot \frac{S_v}{S_k} = 1,1 \cdot \frac{1000}{1000} = 1,1 \quad (7.1)$$

reaktance alternátoru:

$$x_G = \frac{x_d''}{100} \cdot \frac{S_v}{S_G} = \frac{13,5}{100} \cdot \frac{1000}{100} = 1,35 \quad (7.2)$$

reaktance asynchronních motorů:

$$x_M = \frac{1}{i_z} \cdot \frac{S_v}{S_M} = \frac{1}{7} \cdot \frac{1000}{6} = 23,81 \quad (7.3)$$

reaktance transformátorů 6/22 kV (odpory transformátorů jsou zanedbány):

$$x_{T1} = x_{T2} = x_{T3} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_v}{S_T} = \frac{9,6}{100} \cdot \frac{1000}{10} = 9,6 \quad (7.4)$$

reaktance transformátoru 100/22 kV:

$$x_{T4} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 2,875 \quad (7.5)$$

reaktance kabelu 6 kV:

$$x_{kab} = X_{kk} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,074 \cdot 0,5 \cdot \frac{1000}{6^2} \cdot \frac{1}{3} = 0,343 \quad (7.6)$$

odpor kabelu 6 kV:

$$r_{kab} = R_{kk} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,326 \cdot 0,5 \cdot \frac{1000}{6^2} \cdot \frac{1}{3} = 1,509 \quad (7.7)$$

reaktance vedení 110 kV (odpory vedení se zanedbávají):

$$x_{v1} = 0,4 \cdot 6 \cdot \frac{1000}{110^2} = 0,198 \quad (7.8)$$

reaktance vedení 22 kV:

$$x_{v2} = x_{v3} = 0,27 \cdot 6 \cdot \frac{1000}{22^2} \cdot \frac{1}{2} = 1,674 \quad (7.9)$$

Pro 3fázový zkrat na přípojnici 6 kV je uvedeno náhradní schéma pro souslednou složku na Obr. 7.2. Po zjednodušení (transfigurace D–Y) je výsledná hodnota impedance pro souslednou složku rovna  $z_1 = 1,102 + 1,551j$ . Absolutní hodnota výsledné impedance v poměrných jednotkách je  $z_1 = 1,902$ .

Pro hodnotu vztažného proudu platí:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 96,23 \text{ kA} \quad (7.10)$$

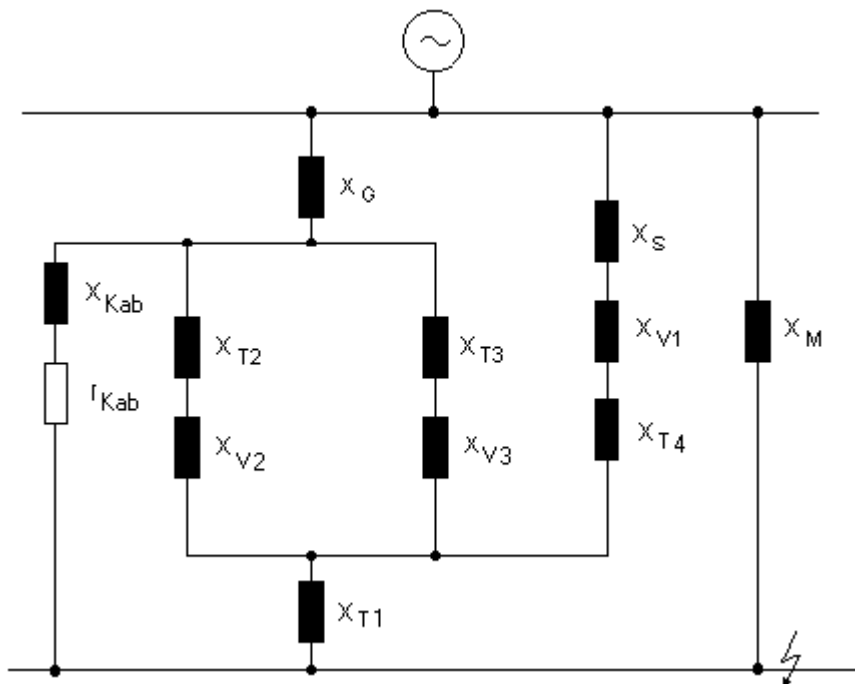
Hodnota ustáleného zkratového proudu je:

$$I_{ku} = \frac{I_v}{|z_1|} = \frac{96,23}{1,902} = 50,59 \text{ kA} \quad (7.11)$$

Pro nárazový zkratový proud platí:

$$I''_{k3} = \sqrt{2} \cdot K \cdot I_{ku} = \sqrt{2} \cdot 1,5 \cdot 50,59 = 107,3 \text{ kA} \quad (7.12)$$

kde  $K$  je nárazový činitel. Jeho hodnota bývá v sítích volena  $K = 1,5$ .



Obr. 7.2 Náhradní schéma pro souslednou složku v případě 3fázového zkratu na přípojnici 6 kV

### 7.3 Modelování části elektrizační soustavy pomocí ATPDraw

Model části elektrizační soustavy je uveden na Obr. 7.5. Generátor 100 MV·A je modelován pomocí neřízeného modelu synchronního stroje SM59. Vysvětlení významu veličin v dialogovém okně je následující:

<b>Volt</b>	maximální hodnota fázového napětí (V)
<b>Freq</b>	frekvence napětí na svorkách stroje pro ustálený stav (Hz)
<b>Angle</b>	úhel fázoru napětí fáze A ve stupních
<b>Poles</b>	počet pólů
<b>SMOVTP</b>	faktor proporcionality, který má význam jen při rozdělení činného výkonu mezi paralelně pracující generátory v průběhu spouštění-náběhu. V případě neexistence paralelních generátorů je hodnota SMOVTP=1

<b>SMOVTQ</b>	faktor proporcionality, který má význam jen při rozdělení jalového výkonu mezi paralelně pracující generátory v průběhu spouštění-náběhu. V případě neexistence paralelních generátorů je hodnota SMOVTQ=1. V případě výskytu paralelně pracujících generátorů: nutno zadat ručně
<b>RMVA</b>	třířázová hodnota zdánlivého výkonu stroje (MV·A)
<b>RkV</b>	jmenovitá hodnota sdruženého napětí stroje, efektivní hodnota (kV)
<b>AGLINE</b>	hodnota kotevního proudu na charakteristice vzduchové mezery, při níž je stroj vybuzen na jmenovité napětí. Nepřímá specifikace vzájemné indukčnosti (A)
<b>RA</b>	rezistance budícího vinutí kotvy (p.j.). $RA > 0!$
<b>XL</b>	rozptylová reaktance kotvy (p.j.)
<b>Xd</b>	synchronní reaktance ve směru osy d – podélná reaktance (p.j.)
<b>Xq</b>	synchronní reaktance ve směru osy q – příčná (p.j.)
<b>Xd'</b>	přechodná reaktance podélná (p.j.)
<b>Xq'</b>	přechodná reaktance příčná (p.j.)
<b>Xd''</b>	rázová reaktance podélná (p.j.)
<b>Xq''</b>	rázová reaktance příčná (p.j.)
<b>Tdo'</b>	podélná přechodová časová konstanta při chodu stroje naprázdno (s)
<b>Tqo'</b>	příčná přechodová časová konstanta při chodu stroje naprázdno (s)
<b>Tdo''</b>	podélná rázová časová konstanta při chodu stroje naprázdno (s)
<b>Tqo''</b>	příčná rázová časová konstanta při chodu stroje naprázdno (s)
<b>Xo</b>	nulová-netočivá reaktance ve složkové soustavě (p.j.)
<b>RN</b>	činná část zemní impedance, rezistance země (p.j.)
<b>XN</b>	jalová část zemní impedance, rezistance země (p.j.)
<b>XCAN</b>	Canayova charakteristická reaktance (p.j.). Když je neznámá: zadejte XCAN=XL
<b>HICO</b>	moment setrvačnosti setrvačných hmot stroje v $(10^6 \cdot \text{libra} \cdot \text{stopa}^2)$ když MECHUN=0 v $(10^6 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2)$ když MECHUN=1
<b>DSR</b>	koeficient rychlostní odchylky vlastního tlumení setrvačných hmot $T = \text{DSR}(W - W_s)$ kde W je rychlost hmot a $W_s$ je synchronní rychlost v $((10^6 \cdot \text{libra} \cdot \text{stopa}) / (\text{rad.} / \text{sec}))$ když MECHUN=0 v $((10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}) / (\text{rad.} / \text{sec}))$ když MECHUN=1
<b>DSD</b>	koeficient rychlosti vlastního tlumení setrvačných hmot $T = \text{DSD}(W)$ kde W je rychlost setrvačných hmot v $((10^6 \cdot \text{libra} \cdot \text{stopa}) / (\text{rad.} / \text{sec}))$ když MECHUN=0 v $((10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}) / (\text{rad.} / \text{sec}))$ když MECHUN=1
<b>FM</b>	když je zadaná hodnota $\leq 2$ , pak je časová konstanta při měření naprázdno když je zadaná hodnota $> 2$ , pak je časová konstanta při měření nakrátko
<b>MECHUN</b>	když je zadána 0, pak je vztažnou soustavou anglická soustava jednotek když je zadána 1, pak je vztažnou soustavou metrická soustava jednotek.

Zadávané hodnoty ukazuje tabulka:

Tab. 7.4 Nastavení synchronního generátoru 100 MV·A

<b>Volt</b>	<b>Freq</b>	<b>Angle</b>	<b>Poles</b>	<b>SMOVTP</b>	<b>SMOVTQ</b>	<b>RMVA</b>	<b>RkV</b>	<b>AGLINE</b>
4898,98	50	0	4	1	1	100	6	100
<b>RA</b>	<b>XL</b>	<b>Xd</b>	<b>Xq</b>	<b>Xd'</b>	<b>Xq'</b>	<b>Xd''</b>	<b>Tdo'</b>	<b>Tqo'</b>
0	0,13	1,79	1,71	0,169	0,228	0,135	4,3	0,85
<b>Tdo''</b>	<b>Tqo''</b>	<b>Xo</b>	<b>RN</b>	<b>XN</b>	<b>XCAN</b>	<b>HICO</b>	<b>DSR</b>	<b>DSD</b>
0,032	0,05	0,13	0	0	0,13	2,5	0	50
<b>FM</b>	<b>MECHUN</b>							
3	1							

Model vedení 110 kV je použit z příkladu 4.2.1, data jsou pro názornost uvedena v Tab. 7.5. Model vedení 22 kV je použit z příkladu 4.2.6 a data uvádí Tab. 7.6. Měrná rezistivita země **Rho** 100  $\Omega$ ·m, frekvence **Freq.** 50 Hz. Rozmístění vodičů na stožárech pro vedení 22 kV je na Obr. 7.3, hodnoty v Tab. 7.6 a pro 110 kV na Obr. 7.4 a v Tab. 7.5. Údaje kabelu 6 kV v Tab. 7.7:

Hodnoty transformátoru 110/22 kV jsou získány z kapitoly 6.6.3. V Tab. 7.8 jsou pro názornost uvedeny jeho parametry. Hodnoty transformátoru 6/22 kV jsou uvedeny v Tab. 7.9.

U jednotlivých transformátorů jsou respektovány kapacity primárního 3 nF a sekundárního 10 nF vinutí transformátoru proti zemi a také kapacita mezi primárním s sekundárním vinutí 3 nF. Zapojení kapacit je z důvodu přehlednosti soustředěno do jednoho bloku pomocí **Edit/Compress**. V dialogovém okně **Compress Group** se dále nastaví počet a označení vstupních a výstupních svorek bloku.

Tab. 7.5 Parametry přenosového vedení 110 kV, AlFe6 120 mm<sup>2</sup> o délce 6 km

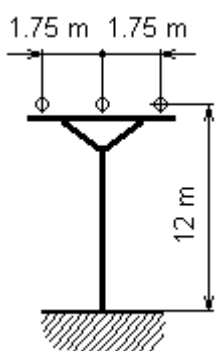
<b>Phase no</b> číslo fáze	<b>Rin (cm)</b> poloměr ocelové duše vodiče	<b>Rout (cm)</b> vnější poloměr vodiče-lana	<b>Resis (<math>\Omega</math>/km)</b> odpor vodiče na jeden kilometr délky	<b>Horiz (m)</b> Horizontální vzdálenost lana od středu stožáru	<b>Vtower (m)</b> výška lana nad zemí u stožáru	<b>Vmid (m)</b> výška lana nad zemí v místě největšího prověšení
1	0,258	1,565	0,234	-1,75	12	12
2	0,258	1,565	0,234	0	12	12
3	0,258	1,565	0,234	1,75	12	12

Tab. 7.6 Parametry vedení 22 kV, AlFe6 95 mm<sup>2</sup> o délce 0,5 km

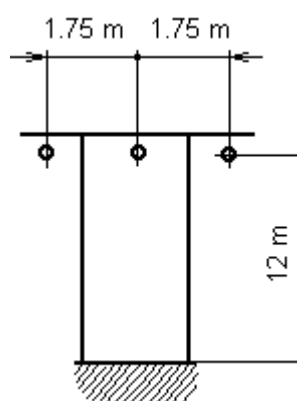
<b>Phase no</b> číslo fáze	<b>Rin (cm)</b> poloměr ocelové duše vodiče	<b>Rout (cm)</b> vnější poloměr vodiče-lana	<b>Resis (<math>\Omega</math>/km)</b> odpor vodiče na jeden kilometr délky	<b>Horiz (m)</b> Horizontální vzdálenost lana od středu stožáru	<b>Vtower (m)</b> výška lana nad zemí u stožáru	<b>Vmid (m)</b> výška lana nad zemí v místě největšího prověšení
1	0,218	1,335	0,319	-1,75	12	12
2	0,218	1,335	0,319	0	12	12
3	0,218	1,335	0,319	1,75	12	12

Tab. 7.7 Parametry kabelu 6 kV (Pí článek, pozice fáze A: vertikální 0,7 m, horizontální 0)

<b>Jádro</b>	<b>Rin (m)</b> vnitřní poloměr vodiče	<b>Rout (m)</b> vnější poloměr vodiče	<b>Rho (Ω·m)</b> rezistivita vodiče	<b>Mu</b> relativní permeabilita materiálu vodiče	<b>mu</b> relativní permeabilita izolačního materiálu okolo vodiče	<b>Eps</b> relativní permitivita izolačního materiálu okolo vodiče
<b>Core</b>	0	0,00874	2,7E-8	1,0000207	0,9999905	2,3
<b>Plášť žily</b>	<b>Rin (m)</b> vnitřní poloměr pláště žily	<b>Rout (m)</b> vnější poloměr pláště žily	<b>Rho (Ω·m)</b> rezistivita pláště žily	<b>Mu</b> relativní permeabilita materiálu pláště žily	<b>mu</b> relativní permeabilita izolačního materiálu okolo pláště žily	<b>Eps</b> relativní permitivita izolačního materiálu okolo pláště žily
<b>Sheath</b>	0,01674	0,01924	1,555E-8	0,99999031	0,9999905	2,3



Obr. 7.3 Rozmístění vodičů na vedení 22 kV



Obr. 7.4 Rozmístění vodičů na vedení 110 kV

Tab. 7.8 Jmenovité parametry a hodnoty získané měřením transformátoru 110/22 kV

Počet fází <b>(Number of phases)</b>	Počet vinutí <b>(Number windigs)</b>	Typ jádra <b>(Type of core)</b>	Testovací frekvence (Hz) <b>(Test frequency)</b>
3	2	Plášťové jádro	50

Primární napětí (kV) <b>(HV)</b>	Sekundární napětí(kV) <b>(LV)</b>	Jmenovitý výkon (MV·A) <b>(Power)</b>	Zapojení <b>(Connections)</b>	Fázový posun (°) <b>(Phase shift)</b>
110	22	40	Yyn	0

Napětí nakrátko (%) <b>(Imp)</b>	Ztráty nakrátko (kW) <b>(Loss)</b>	Proud naprázdno (%) <b>(Curr)</b>	Ztráty naprázdno (kW) <b>(Loss)</b>
11,5	25,6	0,4	40

Tab. 7.9 Jmenovité parametry a hodnoty získané měřením transformátoru 6/22 kV

Počet fází (Number of phases)	Počet vinutí (Number windigs)	Typ jádra (Type of core)	Testovací frekvence (Hz) (Test frequency)
3	2	Plášťové jádro	50

Primární napětí (kV) (HV)	Sekundární napětí(kV) (LV)	Jmenovitý výkon (MV·A) (Power)	Zapojení (Connections)	Fázový posun (°) (Phase shift)
6	22	10	Yyn	0

Napětí nakrátko (%) (Imp)	Ztráty nakrátko (kW) (Loss)	Proud naprázdno (%) (Curr)	Ztráty naprázdno (kW) (Loss)
9,6	30	0,4	13

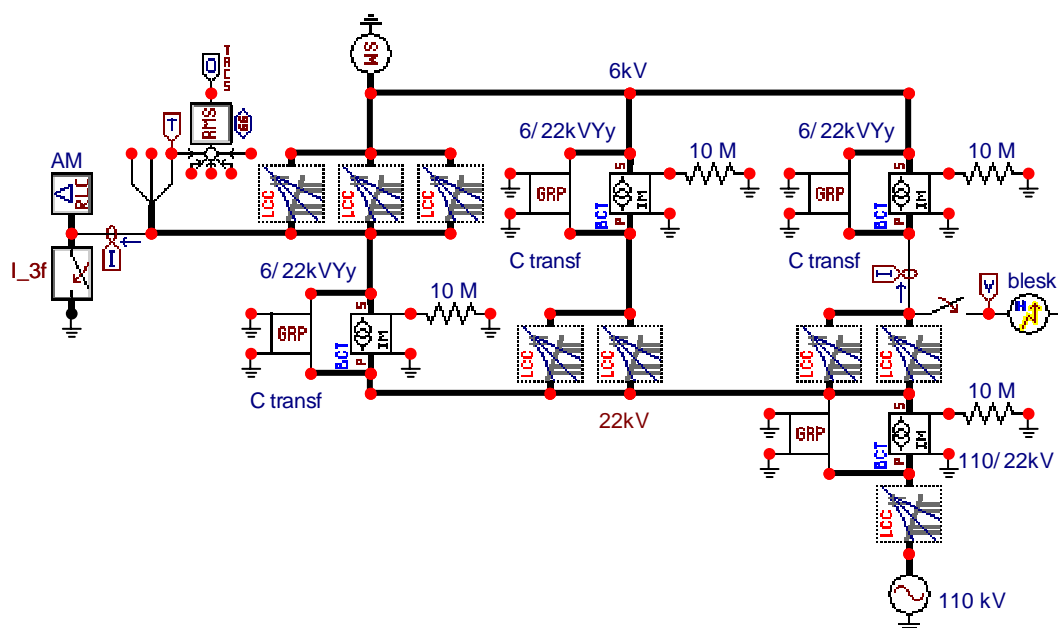
Asynchronní motory o celkovém výkonu  $S_M = 6 \text{ MV}\cdot\text{A}$  a poměrném záběrném proudu  $i_Z = 7$  jsou nahrazeny  $RLC$  článkem v D spojení. Parametry  $RLC$  článku jsou:

$$Z_{nf} = \sqrt{3} \frac{U_n}{I_n} = \sqrt{3} \cdot \frac{6000}{200} = 51,96 \Omega \quad (7.13)$$

$$R_{Z1} = Z_{nf} \cdot \cos \varphi = 51,96 \cdot 0,9 = 46,76 \Omega \quad (7.14)$$

$$L_{Z1} = \frac{Z_{nf} \cdot \sin \varphi}{2\pi f} = \frac{51,96 \cdot 0,436}{2\pi 50} = 72,09 \text{ mH} \quad (7.15)$$

Soustava 110 kV je nahrazena ideálním napěťovým zdrojem o amplitudě 89,815 kV.

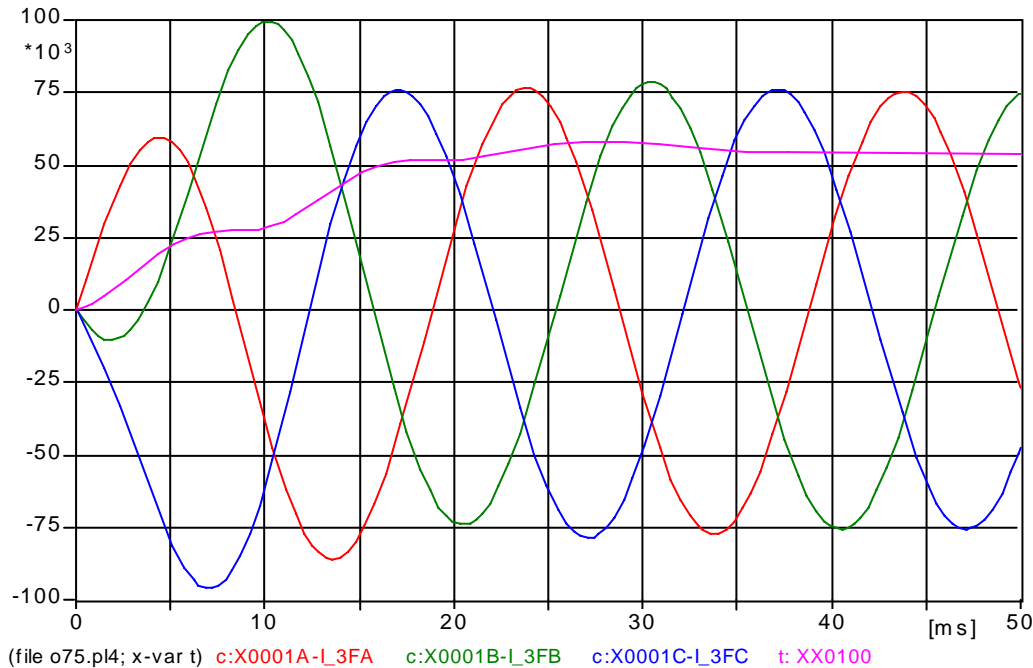


Obr. 7.5 Schéma části elektrizační soustavy vytvořené pomocí ATPDraw



## 7.4 Simulace 3fázového zkratu

V čase  $t = 0$  ms je vytvořen 3fázový kovový zkrat na přípojnici 6 kV a je sledován průběh jednotlivých proudů (X0001A - I\_3FA, X0001B - I\_3FB, X0001C - I\_3FC), včetně průběhu efektivní hodnoty ustáleného zkratového proudu (XX0100).



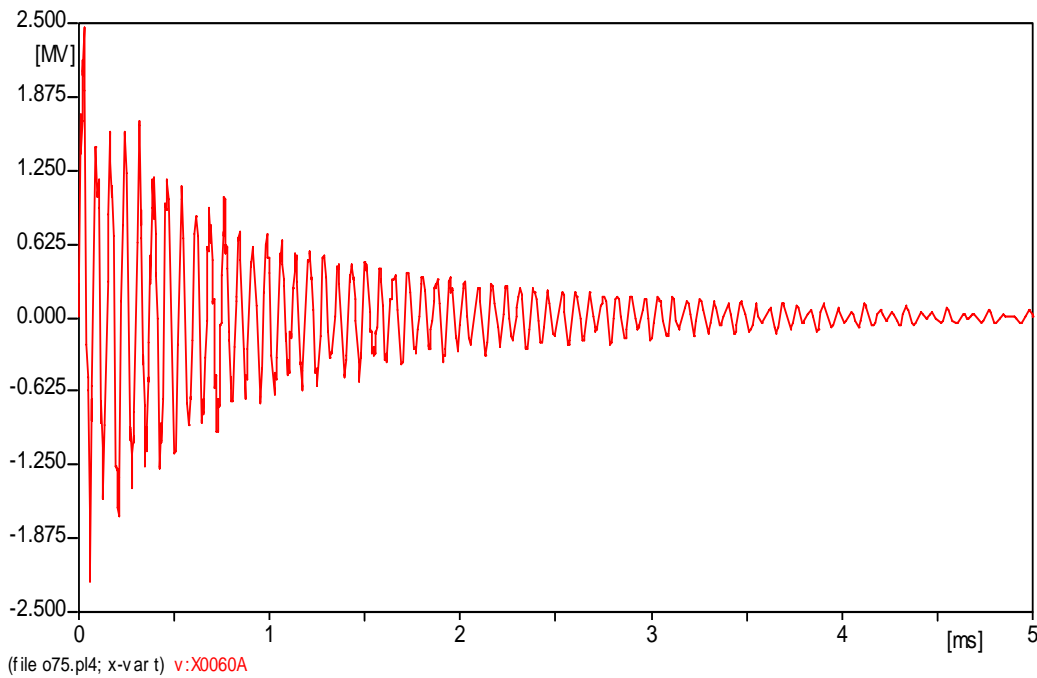
Obr. 7.6 Průběh proudů jednotlivých fází a efektivní hodnoty ustáleného zkratového proudu při kovovém 3fázovém zkratu na přípojnici 6 kV

Tab. 7.10 Srovnání vypočtených hodnot podle jednotlivých metod výpočtu

metoda	Efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu (kA)	Nárazový zkratový proud (kA)
výpočet	50,59	107,3
simulace ATP	51,6	100,0

## 7.5 Simulace úderu blesku do vedení 22 kV

Typickým přechodným dějem, který se vyskytuje na vedení vysokého napětí, je odezva na atmosférické přepětí. Schéma na Obr. 7.5 zachycuje úder blesku do vodiče fáze A v síti 22 kV. Blesk je modelován proudovým impulzem 8/20  $\mu$ s s amplitudou 10 kA. Průběh napětí v místě úderu blesku ukazuje Obr. 7.7. Vzniklé přepětí je dáno impedančním charakterem sítě v místě úderu a je poměrně rychle tlumeno.



Obr. 7.7 Průběh napětí v místě úderu blesku

## 7.6 Co v předchozích kapitolách nebylo

Program ATP samozřejmě poskytuje další možnosti modelování, které dosud nebyly popsány. Cílem kapitol s názvy „Začátečník“ a „Pokročilý“ bylo poskytnout úvodní informaci potenciálním zájemcům zejména z oboru elektroenergetika o práci s programem EMTP-ATP. Vyčerpávajícím způsobem popisuje práci s ATP Rule Book.

### 7.6.1 Zdroje

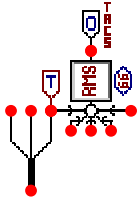
Příkladem dalších možností ATP v oblasti zdrojů je poslední simulace, která využívá zdroj typ 15 HEIDLER. Jedná se zdroj impulzu a význam jednotlivých veličin v dialogovém okně je následující:

<b>U/I</b>	nastavení napěťového (hodnota 0) nebo proudového zdroje (-1)
<b>Amp</b>	amplituda napětí (pro hodnotu $U/I = 0$ ) blesku, jednotka volt nebo ampér v závislosti na nastavení U/I.
<b>T<sub>f</sub></b>	doba čela (s)
<b>Tau</b>	doba půltýlu (s)
<b>n</b>	faktor definující strmost impulzu napětí/proudu
<b>Tsta</b>	nastavení startovacího času (s)
<b>Tsto</b>	ukončení činnosti zdroje (s)
	v intervalu $Tsto < T < Tsta$ je výstupní signál zdroje nulový.

V simulaci byly pro zdroj impulzu proudu zadány hodnoty **Amp** 10 kA, časové parametry odpovídají parametrům normalizovaného atmosférického impulsu proudu **T<sub>f</sub>** 8  $\mu$ s, **Tau** 20  $\mu$ s a faktor strmosti **n** 2.

## 7.6.2 TACS a MODELS

V simulaci 3fázového zkratu byl použit prvek TACS (Transient Analysis of Control Systems). Modul RMS počítá efektivní hodnotu sumy veličin, ke kterým jsou připojeny vstupy modulu. Zadávání modulu v ATPDraw ukazuje Obr. 7.8.



Obr. 7.8 Zapojení modulu pro měření efektivní hodnoty

Jedná se o typ RMS meter 66 (TACS / DEVICES / RMS meter 66). V dialogovém okně Attributes se nadefinuje použití prvku:

<b>Type</b>	88 vnitřní veličina 98 výstupní veličina 99 vstupní veličiny
<b>Freq.</b>	počítaná frekvence (Hz)

Výstupní signál  $OUT = \text{rms}(\text{sum}(\text{inputs}))$ , určí efektivní hodnotu sumy vstupních signálů (uzly  $INI$  až  $IN5$ ).

U každého uzlu modulu se ještě nastaví jeho charakter, pro vstupní uzly lze zadat:

<b>Type</b>	0 výstupní 1 vstupní kladná 2 vstupní záporná 3 ignorován
-------------	--

Do uzlu s označením  $OUT$  je nutné připojit prvek, jehož prostřednictvím bude sledovaný průběh zobrazován (**Probes & 3 phase / Probe Tacs**) a do uzlu s označením  $IN$  je nutné připojit prvek, který bude sledovaný průběh měřit (**EMTP – OUT**). U tohoto prvku se nastaví typ sledovaného průběhu:

<b>Type</b>	90 napětí 91 proud 92 vnitřní proměnná 93 definuje stav spínače: spínač sepnut <b>Probe</b> = 1, spínač vypnut <b>Probe</b> = 0
<b>T_sta a T_sto</b>	nastaví čas začátku a konce sledování (s)

### Závěr

Pomocí prostředků TACS mohou být vytvořeny soustavy měřicích a řídicí modulů nebo vytvářeny modely, které ATP nemá definováno. Pro ty případy, kdy by řešení problému pomocí TACS bylo komplikované případně nemožné, byl pro ATP vytvořen programovací jazyk MODELS, pomocí něhož lze splnit prakticky libovolný požadavek uživatele. Bližší popis použití obou prostředků je však mimo uvažovaný rozsah tohoto materiálu.