

8 Simulace a měření poruchových stavů části elektrizační soustavy

8.1 Parametry prvků elektrizační soustavy

Synchronní generátor SG 12,5 kVA

(Měření parametrů synchronního generátoru viz. příloha P1.)



Jmenovitý výkon (kW)	10
Jmenovitý výkon (kVA)	12,5
Jmenovité otáčky (ot/min)	1500
Jmenovitý proud (A)	18
Jmenovité napětí (V)	400
Frekvence (Hz)	50
Účinnost (-)	0,8
Rozsah buzení napětí (V)	14 – 62
Rozsah budicího proudu (A)	3,4 – 9,6
Typ stroje	A8A4
Výrobní číslo	556315
Číslo normy pro daný stroj	350200
Výrobce	MEZ Frenštát

Náhradní impedance synchronního generátoru

$$X_{(1)} = \frac{x_d \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad (\Omega; \%, \text{kV}, \text{MVA}) \quad (8.1)$$

$$X_{(1)} = \frac{15 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 0,015} = 2,035 \quad \Omega$$

$$R_{(1)} \approx 0 \Rightarrow Z_{(1)} = X_{(1)} \quad (\Omega)$$

Zpětná složka

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} \quad (\Omega)$$

Nulová složka (měření, viz. příloha P1)

$$X_{(0)} = 0,16 \quad \Omega$$

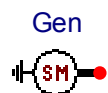
$$R_{(0)} = R_{(1)} = R_{(2)} \approx 0 \Rightarrow Z_{(0)} = X_{(0)} \quad (\Omega)$$

U_{nG} jmenovité napětí alternátoru

S_{nG} jmenovitý zdánlivý výkon alternátoru

x_d'' rázová reaktance alternátoru

Matematický model synchronního generátoru



Synchronní generátor 12,5kVA byl v prostředí ATPDraw modelován pomocí modelu synchronního stroje SM59.

Tab. 8.1 Nastavení synchronního generátoru 12,5 kV·A

Volt	Freq	Angle	Poles	SMOV TP	SMOVT Q	RMVA	RkV	AGLIN E
326	50	45	4	1	1	0,0125	0,4	2,75
RA	XL	Xd	Xq	Xd'	Xq'	Xd''	Tdo'	Tqo'
0,047	0,01	1,41	1,41	0,249	0,249	0,159	0,105	0,105
Tdo''	Tqo''	Xo	RN	XN	XCAN	HICO	DSR	DSD
0,015	0,015	0,012	0	0	0,01	1e-6	0	0
FM	MECH UN							
3	1							

Kde

Volt maximální hodnota fázového napětí (V)

Freq frekvence napětí na svorkách stroje pro ustálený stav (Hz)

Angle úhel fázoru napětí fáze A ve stupních

Poles počet pólů

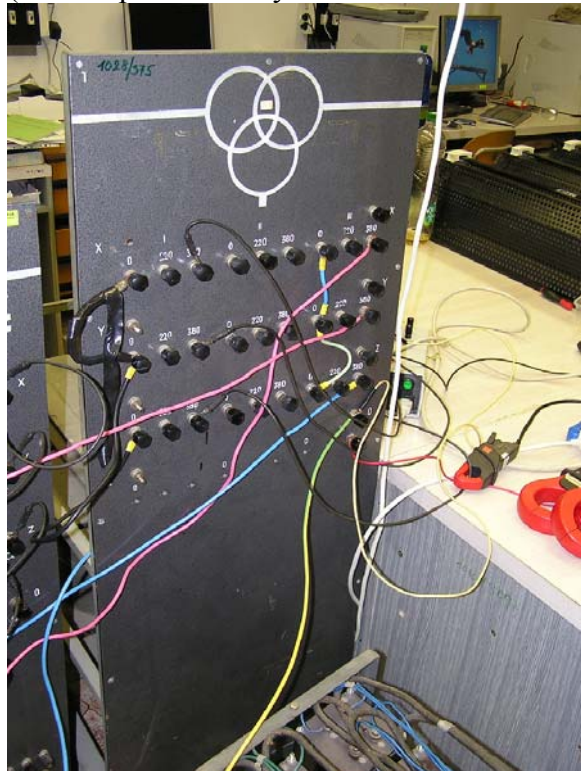
SMOVTP faktor proporcionality, který má význam jen při rozdělení činného výkonu mezi paralelně pracující generátory v průběhu spouštění-náběhu. V případě neexistence paralelních generátorů je hodnota SMOVTP=1

SMOVTQ 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
RMVA	třífázová hodnota zdánlivého výkonu stroje (MV·A)
RkV	jmenovitá hodnota sdruženého napětí stroje, efektivní hodnota (kV)
AGLINE	hodnota kotevního proudu na charakteristice vzduchové mezery, při níž je stroj vybuzen na jmenovité napětí. Nepřímá specifikace vzájemné indukance (A)
RA	rezistance budícího vinutí kotvy (p.j.). RA>0!
XL	rozptylová reaktance kotvy (p.j.)
Xd	synchronní reaktance ve směru osy d – podélná reaktance (p.j.)
Xq	synchronní reaktance ve směru osy q – příčná (p.j.)
Xd'	přechodná reaktance podélná (p.j.)
Xq'	přechodná reaktance příčná (p.j.)
Xd''	rázová reaktance podélná (p.j.)
Xq''	rázová reaktance příčná (p.j.)
Tdo'	podélná přechodová časová konstanta při chodu stroje naprázdno (s)
Tqo'	příčná přechodová časová konstanta při chodu stroje naprázdno (s)
Tdo''	podélná rázová časová konstanta při chodu stroje naprázdno (s)
Tqo''	příčná rázová časová konstanta při chodu stroje naprázdno (s)
Xo	nulová-netočivá reaktance ve složkové soustavě (p.j.)
RN	činná část zemní impedance, rezistance země (p.j.)
XN	jalová část zemní impedance, rezistance země (p.j.)
XCAN	Canayova charakteristická reaktance (p.j.). Když je neznámá: zadejte
XCAN=XL	
HICO	moment setrvačnosti setrvačných hmot stroje v (10 ⁶ *libra*stopa ²) když MECHUN=0 v (10 ⁶ *kg*m ²) když MECHUN=1
DSR	koeficient rychlostní odchylky vlastního tlumení setrvačných hmot T=DSR(W-Ws) kde W je rychlost hmot a Ws je synchronní rychlost v ((10 ⁶ *libra*stopa)/(rad./sec)] když MECHUN=0 v ((10 ⁶ *N*m)/(rad./sec)] když MECHUN=1
DSD	koeficient rychlosti vlastního tlumení setrvačných hmot T=DSD(W) kde W je rychlost setrvačných hmot v ((10 ⁶ *libra*stopa)/(rad./sec)] když MECHUN=0 v ((10 ⁶ *N*m)/(rad./sec)] když MECHUN=1
FM	když je zadaná hodnota <=2, pak je časová konstanta při měření naprázdno když je zadaná hodnota >2, pak je časová konstanta při měření nakrátko
MECHUN	když je zadána 0, pak je vztažnou soustavou anglická soustava jednotek když je zadána 1, pak je vztažnou soustavou metrická soustava jednotek.

Výkonový transformátor 15 kVA

(Měření parametrů výkonového transformátoru 15 kVA, viz. příloha P2)



Parametry transformátoru

$$S_n = 15 \text{ kVA}, U_n = 380\text{V}, p = 1$$

$$\Delta P_k = 600 \text{ kW}, u_k = 15\%$$

$$\Delta P_0 = 71,3 \text{ kW}, i_0 = 0,94\%$$

Náhradní impedance transformátoru

Sousledná složka

$$Z_{(1)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} \quad (\Omega; \%, \text{kV}, \text{MVA}) \quad (8.2)$$

$$Z_{(1)} = \frac{15,0,4^2}{100 \cdot 0,015} = 1,6 \quad \Omega$$

Zpětná složka

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} \quad (\Omega; \%, \text{kV}, \text{MVA})$$

U_k jmenovité napětí nakrátko

U_{nT} jmenovité napětí transformátoru

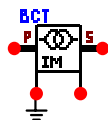
S_{nT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

Nulová složka

$$x_{(0)} = 0,85x_{(1)} = 1,36 \Omega$$

Matematický model výkonové transformátoru 15 kVA

T0,4/0,4

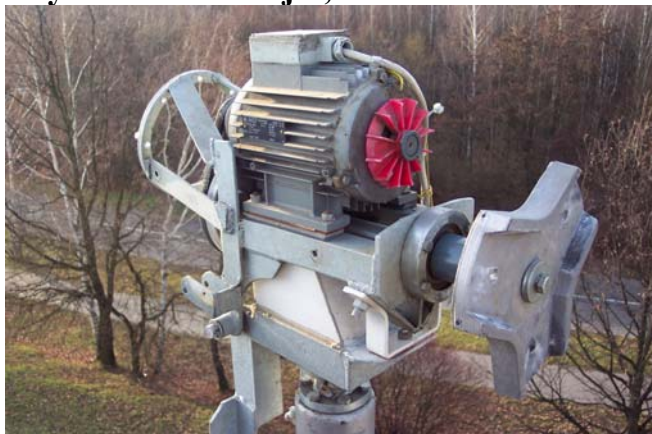


Výkonový transformátor 15kVA byl v prostředí ATPDraw modelován pomocí procedury BCTRAN.

Tab. 8. 1 Jmenovité parametry a hodnoty získané měřením transformátoru 15kVA

Počet fází (Number of phases)	Počet vinutí (Number windigs)	Typ jádra (Type of core)	Testovací frekvence (Hz) (Test frequency)	
3	2	Shell core	50	
Primární napětí (kV) (HV)	Sekundární napětí(kV) (LV)	Jmenovitý výkon (MV·A) (Power)	Zapojení (Connections)	Fázový posun (°) (Phase shift)
0,4	0,4	0,015	Yyn	0

Napětí nakrátko (%) (Imp)	Ztráty nakrátko (kW) (Loss)	Proud naprázdno (%) (Curr)	Ztráty naprázdno (kW) (Loss)
15	0,6	0,47	0,071

Asynchronní stroj 1,1 kW

- 3fázový asynchronní stroj s kotvou nakrátko, typ 4AP 90L 6,
- jmenovité napětí 3x230/400 V,
 - jmenovitá frekvence 50 Hz,
 - jmenovitý výkon stroje v motorickém režimu 1,1 kW,
 - jmenovité otáčky 930 ot.min⁻¹,
 - jmenovitý proud stroje 3 A,
 - jmenovitý účinník 0,75 p.j.

Náhradní impedance asynchronního motoru:

Sousledná složka

$$Z_{(1)} = \frac{U_{nAM}^2}{i_z \cdot S_{nAM}} \quad (\Omega; \text{kV}, -, \text{MVA}) \quad (8.3)$$

$$Z_{(1)} = \frac{0,4^2}{3,7 \cdot 0,0015} = 28,8 \Omega$$

Zpětná složka

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} = \frac{U_{nAM}^2}{i_z \cdot S_{nAM}} \quad (\Omega; \text{kV}, -, \text{MVA})$$

- U_{nAM} jmenovité napětí motoru
- i_z poměrný záběrný proud motoru
- S_{nAM} jmenovitý zdánlivý výkon motoru

Matematický model asynchronního stroje

AG1.1kW



Pro modelování asynchronního motoru je v ATPDraw použit univerzální model UM3. Výchozí nastavení je následující:

General

Pole pairs = 3, stator coupling – Y, frequency = 50 Hz,

Magnet

LMUD = LMUQ = 0,385

Stator

$L_d = L_q = 0,015$ H

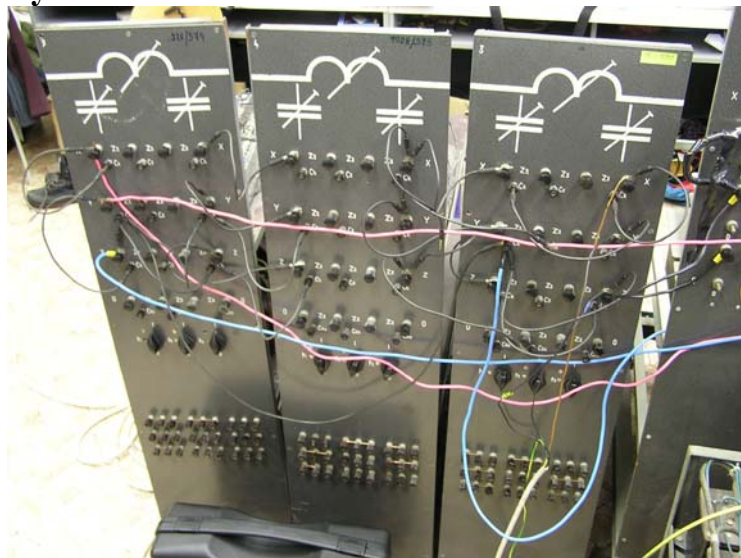
$R_d = R_q = 8,42$ Ω

Rotor

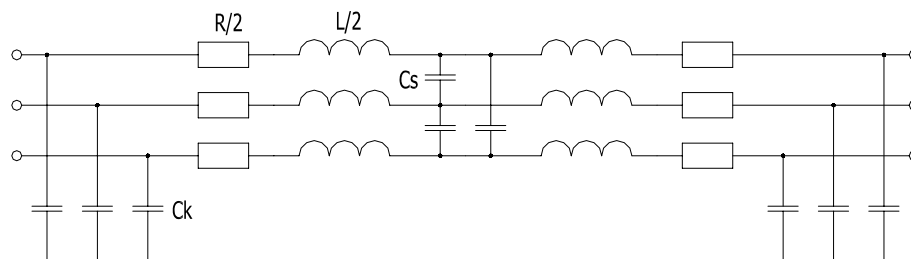
$L_1 = L_2 = 0,015$ H

$R_1 = R_2 = 11,6$ Ω

Fyzikální model venkovního vedení 3km



Náhradní schéma venkovního vedení



Obr. 8.1 Náhradní schéma venkovního vedení AIFe 3km.

Parametry π článku:

podélná impedance

$$Z = 0,762 + j3,303$$

Kapacita proti zemi/mezifázová kapacita

$$C_k = 1,5 \mu\text{F} / C_s = 0,53 \mu\text{F}$$

Náhradní rezistence a reaktance vedení:

Sousledná složka

$$R_{(1)} = R_k \cdot l \quad (\Omega, \Omega/\text{km}, \text{km}) \quad (8.4)$$

$$R_{(1)} = 0,762 \Omega$$

$$X_{(1)} = X_k \cdot l \quad (\Omega, \Omega/\text{km}, \text{km})$$

$$X_{(1)} = 3,303 \Omega$$

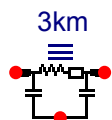
Zpětná složka

$$R_{(2)} = R_{(1)} = R_k \cdot l \quad (\Omega, \Omega/\text{km}, \text{km})$$

$$X_{(2)} = X_{(1)} = X_k \cdot l \quad (\Omega, \Omega/\text{km}, \text{km})$$

Nulová složka

$$Z_{(0)} = 3Z_{(1)} = 2,286 + j9,909 \Omega$$

 R_k rezistence vedení délky 1 km X_k reaktance vedení délky 1 km l délka vedení**Matematický model venkovního vedení**

Venkovní vedení bylo modelováno s využitím RLC prvků v prostředí ATPDraw, výsledný model byl komprimován pomocí volby **Compress**.

8.2 Simulace přechodných dějů části elektrizační soustavy

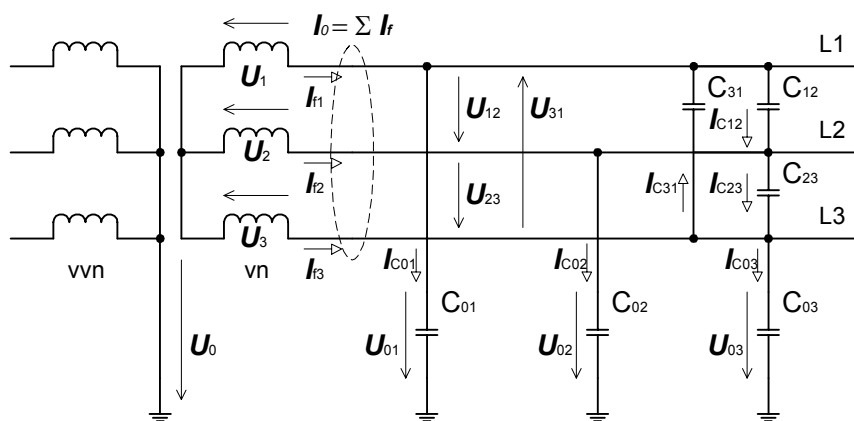
8.2.1 1fázové zemní spojení v izolovaných sítích

V těchto sítích nejsou mezi uzlem a zemí a ani mezi fázemi a zemí připojeny žádné impedance. Výjimky zde mohou tvořit jednofázové přístrojové transformátory napětí a pochopitelně síťové kapacity proti zemi se svodovými odpory. Při popisu poměrů v nezatížené síti s izolovaným uzlem je možné vycházet z předpokladu, že napájecí napětí zdroje jsou symetrické, kapacity všech fází vzhledem k zemi jsou stejné, vzájemné kapacity jsou stejné, síť není zatížena odběrem a svodové odpory lze zanedbat. Pro výše uvedené předpoklady lze pro napětí a proudy psát:

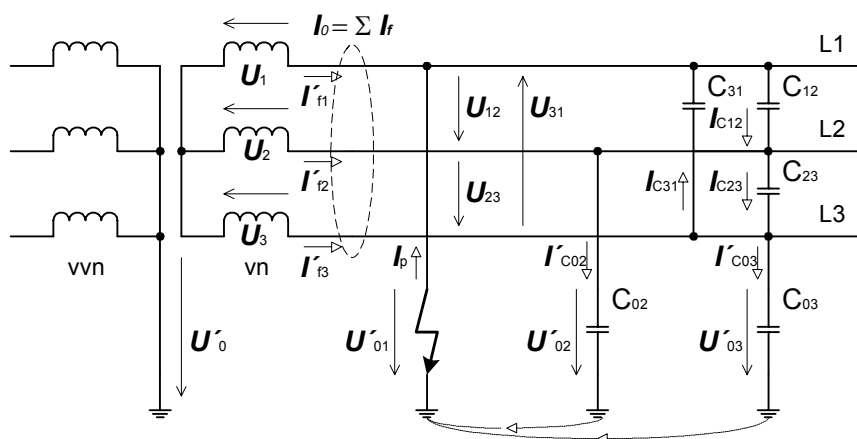
$$\begin{aligned} U_{01} - U_{12} - U_{02} &= 0 & U_{01} - U_0 - U_1 &= 0 \\ U_{02} - U_{23} - U_{03} &= 0 & U_{02} - U_0 - U_2 &= 0 \\ U_{03} - U_{12} - U_{02} &= 0 & U_{03} - U_0 - U_3 &= 0 \end{aligned} \quad (8.5)$$

$$\begin{aligned} I_{f1} &= I_{C01} + I_{C12} - I_{C13} & I_{C01} &= j\omega C_{01} U_{01} \\ I_{f2} &= I_{C02} + I_{C23} - I_{C12} & \text{kde } I_{C02} &= j\omega C_{02} U_{02} \\ I_{f3} &= I_{C03} + I_{C31} - I_{C23} & I_{C03} &= j\omega C_{03} U_{03} \end{aligned} \quad (8.6)$$

$$\begin{aligned} U_{01} + U_{02} + U_{03} &= U_0 \\ I_{01} + I_{02} + I_{03} &= I_0 \end{aligned} \quad (8.7)$$



Obr. 8.2 Schematické znázornění izolované sítě.

Obr. 8.3 Schematické znázornění izolované sítě při zemním spojení (pro $R_p \rightarrow 0$).

Při zemní poruše, znázorněné na obr. 8.3, se poruší symetrie impedancí proti zemi. V případě vzniku zemního spojení v izolované síti je tato porucha doprovázena vznikem poruchového proudu. Ke změně dojde u velikostí amplitud a fázových posuvů kapacitních proudů v jednotlivých fázích a napětí uzlu proti zemi. Kapacitní proudy zdravých fází se uzavírají přes zem, místo zemního spojení a vinutí transformátoru postižené fáze. Pokud je síť většího rozsahu, tak mohou poruchové proudy dosahovat značných hodnot.

Pro velikost napětí lze psát:

$$U'_{01} = 0$$

$$U'_{02} = U_2 + U_0 = U_2 - U_1 = U_{21}$$

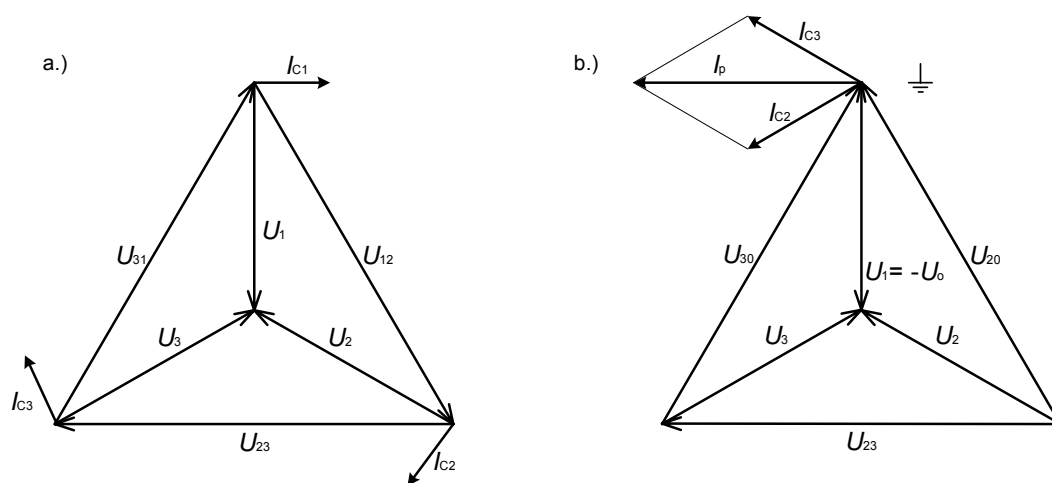
$$U'_{03} = U_3 + U_0 = U_3 - U_1 = U_{31}$$

$$U'_0 = -U_1$$

(8.8)

Předpokládejme symetrickou síť:

$$C_{01} \approx C_{02} \approx C_{03} \approx C_0$$



Obr. 8.4 Fázorový diagram sítě s izolovaným uzlem ve stavu a) bez a b) se zemním spojením.

Pro proudy lze psát:

$$\begin{aligned}
 I_p &= I'_{C20} + I'_{C30} = j\omega C_0 (U'_{02} + U'_{03}) = -3j\omega C_0 U_{01} = -3I_{C01} \\
 I'_{C02} &= j\omega C_0 U'_{02} = -j\omega C_0 U_{23} = \sqrt{3} I_{C20} \\
 I'_{C03} &= j\omega C_0 U'_{03} = -j\omega C_0 U_{31} = \sqrt{3} I_{C30}
 \end{aligned}
 \tag{8.9}$$

Kapacita vedení se v praxi udává na jednotku délky. Kapacitu vedení C_0 a poruchový proud I_p lze zjednodušeně vyjádřit vztahem (3-6):

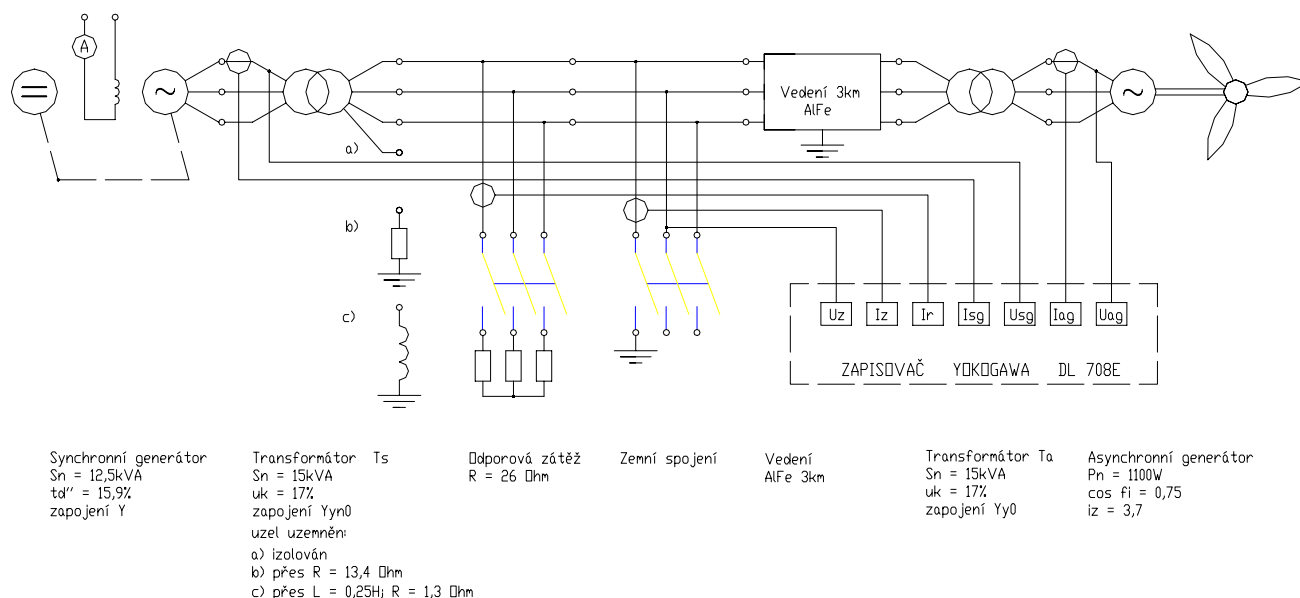
$$\begin{aligned}
 C_0 &= C_{k0} l \\
 I_p &= 3 \omega C_{k0} l U_f = \sqrt{3} \omega C_{k0} l U_s
 \end{aligned}
 \tag{8.10}$$

Za předpokladu ideálního zemního spojení s $R_p \rightarrow 0$ lze konstatovat:

- kapacitní proudy zdravých fází vzrostou $\sqrt{3}$ krát,
- kapacitní proud postižené fáze stoupne 3 krát,
- napětí zdravých fází proti zemi vzroste na sdruženou hodnotu systému,
- napětí uzlu vzroste na fázovou hodnotu systému.

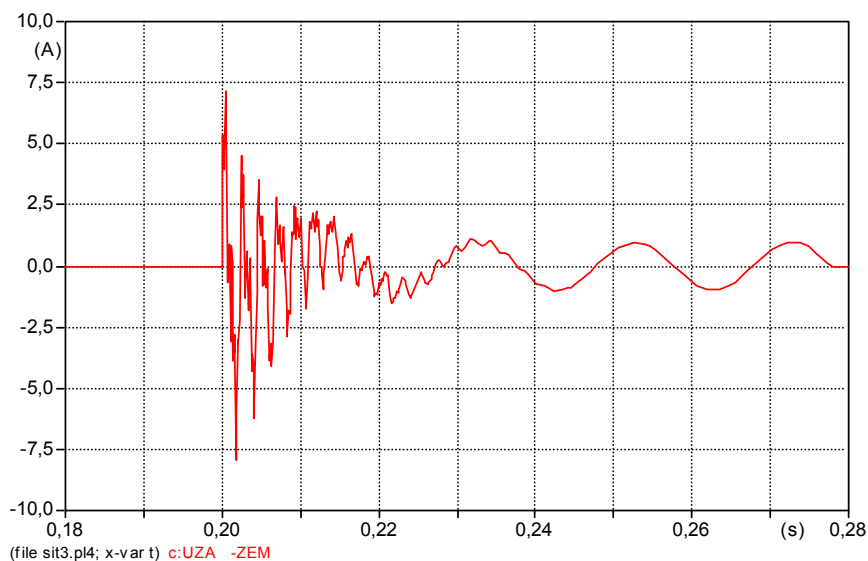
Protože poruchový proud má kapacitní charakter, je jeho zhášení obtížné a provázené znovu-zápaly. Takto vzniklé přechodné děje vyvolávají v síti přepětí. Z uvedených důvodů je používání izolovaného uzlu omezeno na malé sítě. Rovněž hledisko bezpečnosti spojené s výskytem velkých krokových napětí, které vznikají při průchodu proudů zemí, je nutné brát v úvahu. V normách pro provoz VN sítí se připouští mezní rozsah kapacitního proudu $I_c = 20$ A, přičemž od hodnoty $I_c = 10$ A se již doporučuje kompenzace zemních proudů.

Simulace 1fázové zemní spojení v izolovaných sítích s využitím ATPDraw



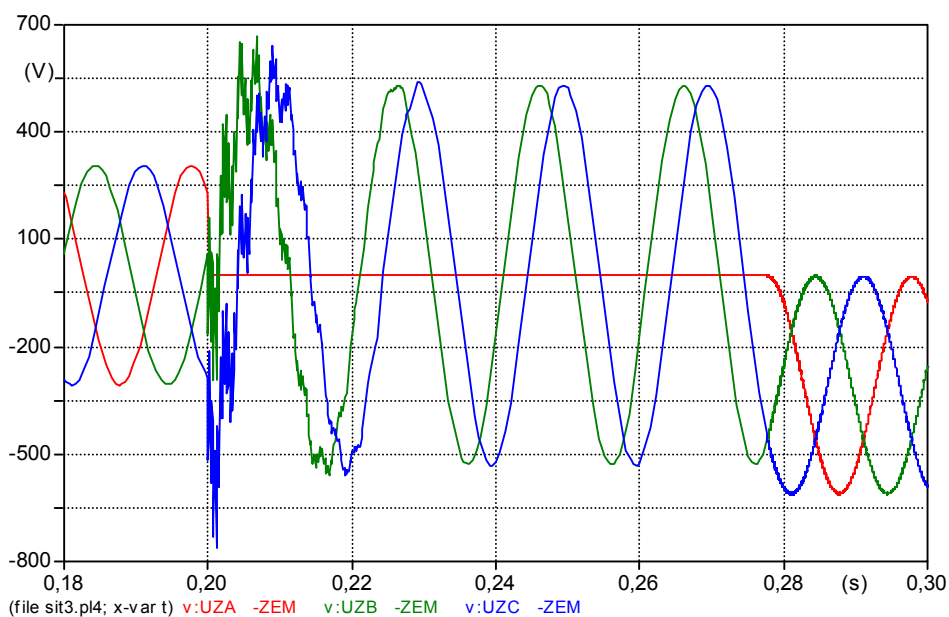
Obr. 8.5 Měření 1fázového zemního spojení v části elektrizační soustavy.

Část elektrizační soustavy pro měření a následnou simulaci je zapojena dle obr. 8.5, část a). Jedná se o síť s oboustranným napájením, kde jako zdroj figuruje synchronní generátor 12,5kVA a větrná elektrárna s asynchronním strojem 1,1kW. Synchronní generátor přispívá

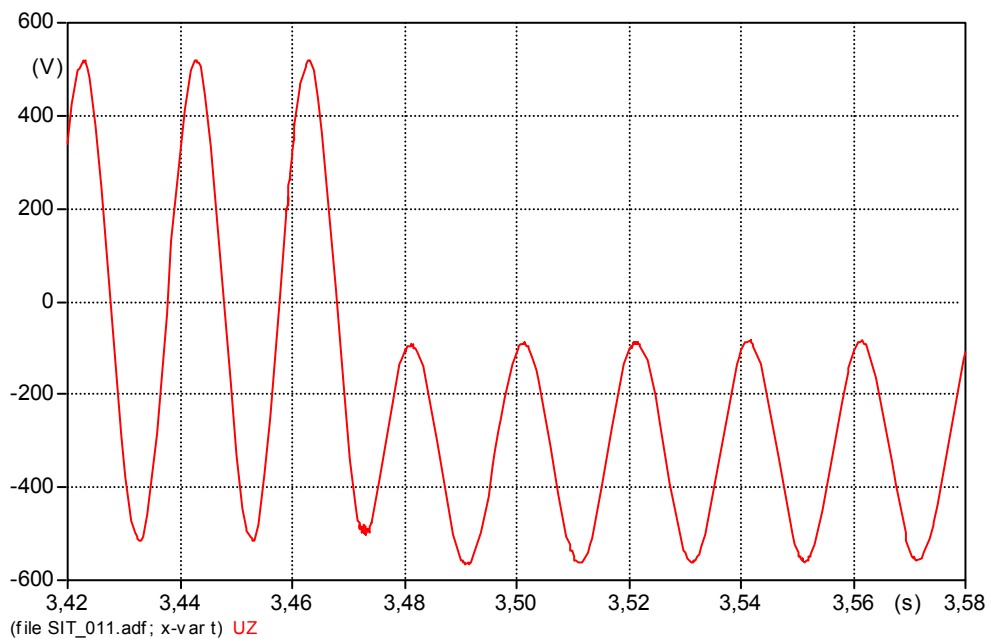


Obr. 8.7 Průběh proudu místem zemního spojení, izolovaná soustava.

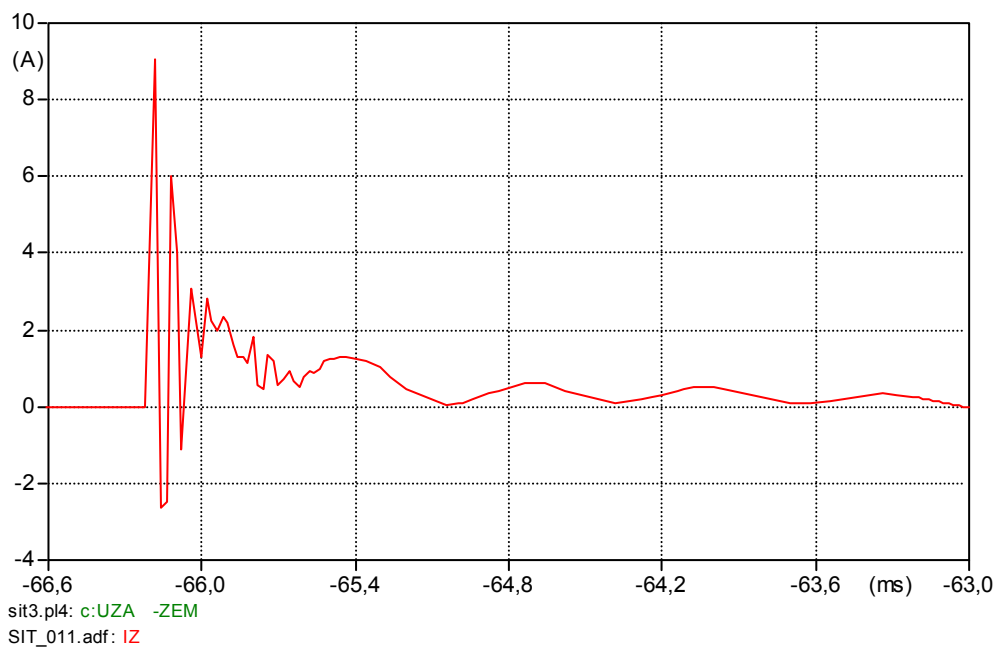
Z obrázku 8.7 je zřejmý vícefrekvenční přechodný děj daný vybitím kapacit soustavy v okamžiku vzniku zemního spojení. Ustálená hodnota kapacitního proudu je 686 mA. Napětí nepostížených fází v okamžiku vzniku zemního spojení překmitnou na hodnotu 664 V, čemuž odpovídá přepětí 2,04 (obr. 8.8). Pro porovnání simulovaných a naměřených hodnot proudu místem zemního spojení jsou na obr. 8.11 uvedeny oba průběhy v ustáleném stavu, na obr. 8.10 je zobrazen naměřený průběh proudu místem zemního spojení. Z obr. 8.8 pro simulovaný průběh napětí a obr. 8.9 pro naměřený průběh napětí v místě zemního spojení, je zřejmý vliv kapacit soustavy, napětí po ukončení zemního spojení nepřejde na hodnotu fázového napětí okamžitě, ale až po odeznění přechodného děje provázejícího vybití kapacit soustavy.



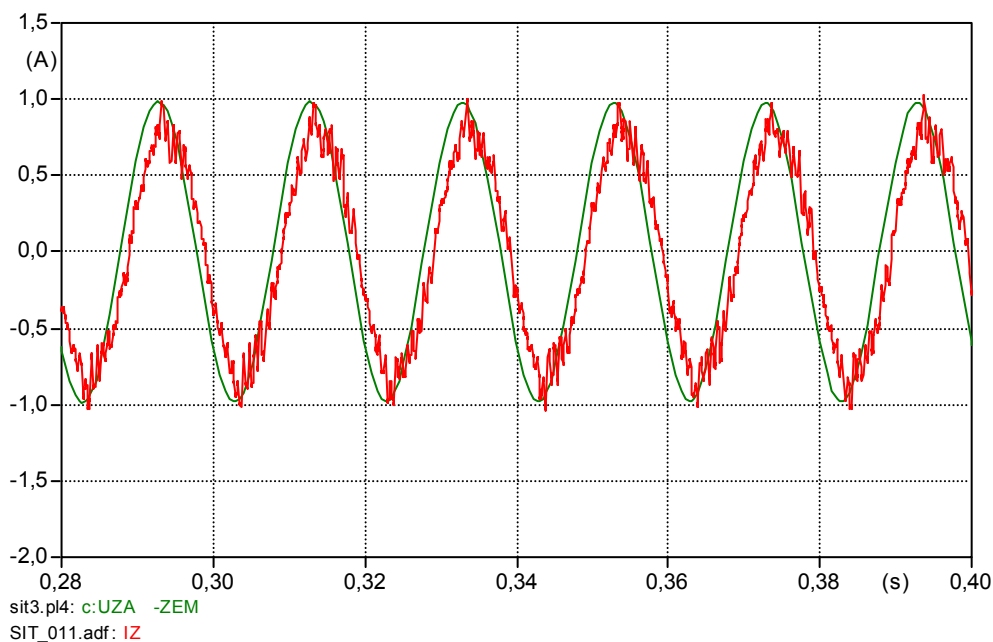
Obr. 8.8 Průběh simulovaných okamžitých hodnot napětí v místě zemního spojení, v počátku vzniku zemního spojení v čase 0,2 a zániku v čase 0,27s



Obr. 8.9 Průběh naměřených okamžitých hodnot napětí jedné nepostížené fáze v okamžiku zániku zemního spojení v čase 3,47 s



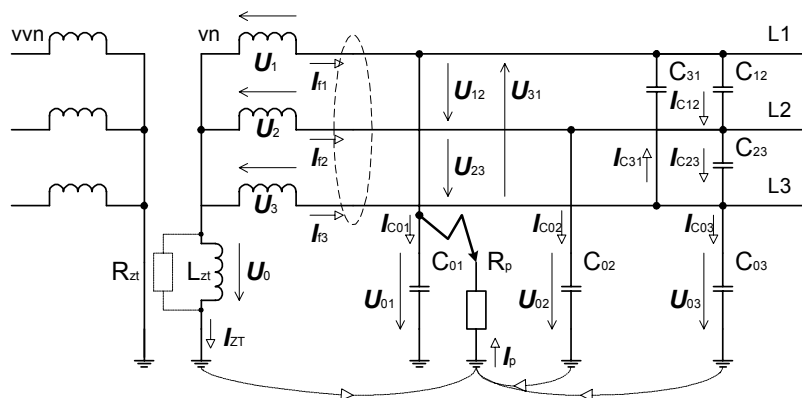
Obr. 8.10 Naměřený průběh proudu místem zemního spojení



Obr. 8.11 Srovnání naměřených a simulovaných okamžitých hodnot proudu místem zemního spojení.

Pozn.: Hodnota proudu místem zemního spojení byla pod definovanou hodnotou přesnosti proudových kleští, proto jsou na naměřeném průběhu proudu patrné zákmity.

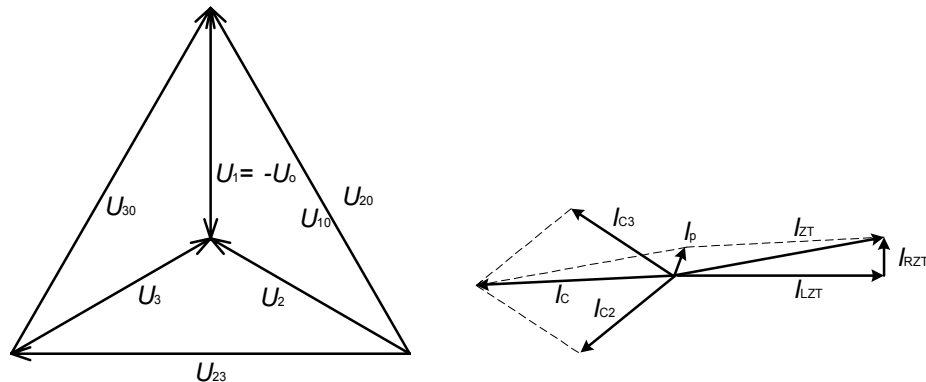
8.2.2 Kompenzace zemních kapacitních proudů



Obr. 8.12 Schematické znázornění kompenzované sítě při zemním spojení.

Kompenzaci kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí je nutné provádět tak, aby místem náhodného zemního spojení protékal pouze tzv. zbytkový proud a tím se dosáhlo samočinného zhášení oblouků v místě s poruchou, snížení krokového napětí v okolí poruchy a aby se umožnil „časově neomezený“ provoz postiženého vedení při zemním spojení. Kompenzace kapacitních proudů se provádí vložením vhodně zvolené indukčnosti do uzlu sítě. Tato indukčnost se nazývá podle účelu „zhášecí“ či „kompenzační“ nebo jménem

zpracovatele teorie „Petersenova“. Tímto zásahem se izolovaná síť změní na síť s neúčinně uzemněným uzlem. Proudové poměry sítě s kompenzační cívkou jsou znázorněny na obr. 8.12.



Obr. 8.13 Fázorový diagram napětí a proudu pro kompenzovanou síť pro $R_p \rightarrow 0$.

K určení poměrů v kompenzované síti lze opět využít vztah (8.10). Budeme-li předpokládat určitou kapacitní nesymetrii C_{nes} a ztrátový odpor ve zhášecí tlumivce R_{ZT} (svodové odpory systému v jednotlivých fázích jsou pro jednoduchost zanedbány) lze napětí v uzlu ve stavu bez zemního spojení vyjádřit rovnicí (8.11). Této závislosti se využívá pro automatické naladění tlumivky do optimálního stavu, při kterém je napětí v uzlu maximální. Zhášecí tlumivkou tedy i v klidovém stavu protéká proud, který je daný hlavně kapacitní nesymetrií.

$$U_0 = U_f \frac{j\omega C_{nes}}{1/R_{ZT} + j(3\omega C_0 + \omega C_{nes} - 1/\omega L_{ZT})} \quad (8.11)$$

Napětí uzlu ve stavu zemního spojení s odporem R_p lze vyjádřit vztahem (8.12):

$$U_0 = U_f \frac{1/R_p + j\omega C_{nes}}{1/R_p + 1/R_{ZT} + j(3\omega C + \omega C_{nes} - 1/\omega L_{ZT})} \quad (8.12)$$

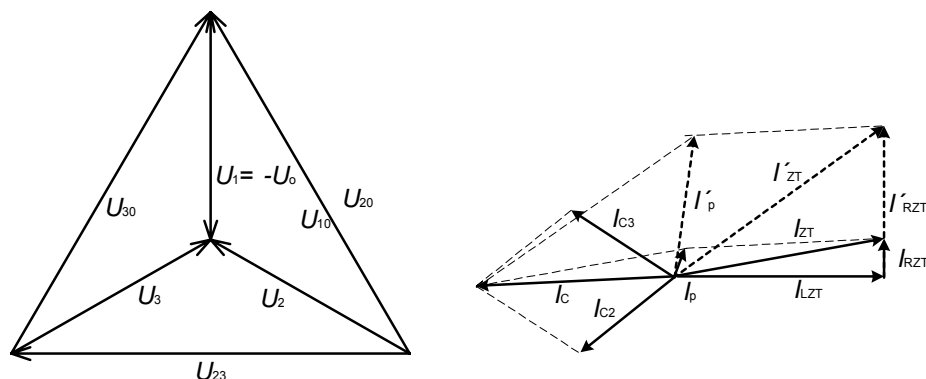
Velikost poruchového proudu lze vyjádřit vztahem (8.13). Pro zjednodušení je ve vztahu zanedbána kapacitní nesymetrie vzhledem její velikosti k poruchovému odporu.

$$I_p = U_f (1/R_{ZT} + 1/R_p + j(3\omega C - 1/\omega L_{ZT})) \Leftrightarrow 1/R_p \gg \omega C_{nes} \quad (8.13)$$

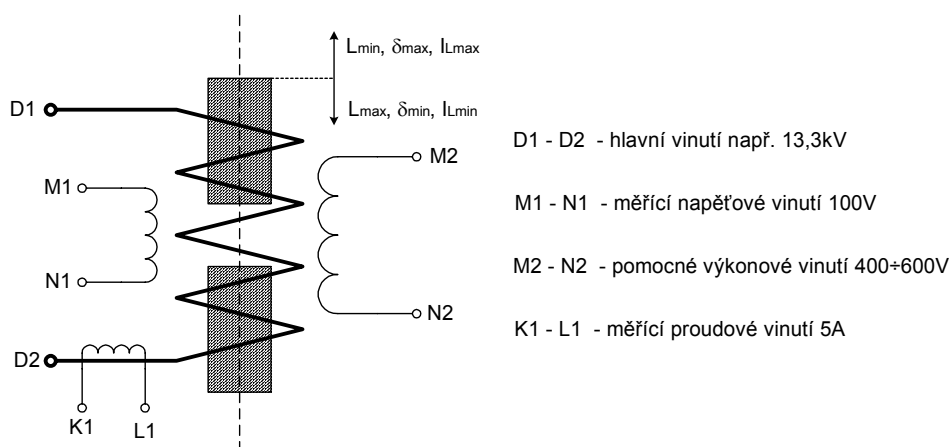
Výsledný poruchový proud má imaginární složku danou rozdílem kapacitního proudu sítě a induktivního proudu zhášecí tlumivkou a nevykompenzovanou činnou složku, odpovídající ztrátám ve zhášecí tlumivce a svodovým odporům fází proti zemi.

$$I_p = I_R + j(I_C - I_{ZT}) \quad |I_p| = \min \Leftrightarrow |I_C| = |I_{ZT}| \quad (8.14)$$

Tento vztah vyjadřuje základní funkci zhášecí tlumivky, tj. snižování proudu místem zemního spojení kompenzací zemních kapacitních proudů. Minimální velikost má poruchový proud pro stav rezonance a je dán svodovými odpory sítě a ztrátami v tlumivce. V úvahu je ovšem třeba brát také proud nevykompenzovaných harmonických, jejichž velikost se v tomto případě stává nezanedbatelná.



Obr. 8.14 Fázorový diagram napětí a proudu pro kompenzovanou síť s $R_p \rightarrow 0$ ve stavu před (plnou čarou) a po připojení (přerušovanou) odporu do uzlu sítě.

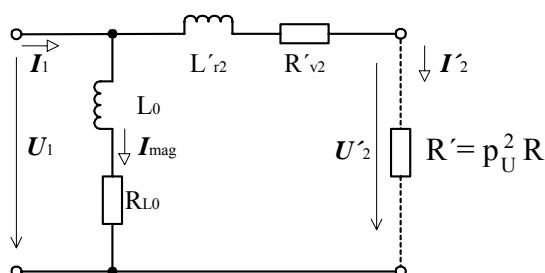


Obr. 8.15 Principiální schéma kompenzační tlumivky.

Skutečné konstrukční provedení zhášecí tlumivky si lze představit jako transformátor s regulovatelným proudem naprázdno. Nastavení požadované indukčnosti se provádí změnou vzduchové mezery v jeho magnetickém obvodu. Výstupní napětí na sekundárním vinutí zhášecí tlumivky je vlivem konstrukce se vzduchovou mezerou v magnetickém obvodu relativně měkké. Sekundární vinutí zhášecí tlumivky se výkonově dimenzuje od 10 do 30 % jmenovitého výkonu tlumivky a slouží pro krátkodobé připojení pomocného odporu při procesu vyhledávání vývodu postiženého zemním spojením. Připojení odporu do uzlu sítě zajistí zvýšení činné složky nulového proudu vývodem postiženým zemním spojením a zvýší se tím citlivost a spolehlivost směrových ochran pro vyšší hodnoty poruchového odporu.

Tab. 8.2 Jmenovité hodnoty zhášecích tlumivek ZTC.

typ ZTC	800		1250		4000	
Q_{max} (kVA)	1250		4000		6300	
U_{In} (kV)	13,3		13,3		13,3	
δ (mm)	10	354	10	600	64	688
I_{I0} (A)	3,1	60	3,7	94	38	297
ΔP_{L0} (kW)	1,4	9,4	2,4	16	5,0	24
ΔP_{LK} (kW)	86	168	528	578	11000	10613
U_{20} (V)	365	407	413	420	543	475
I_{IK} (A)	33,4	104	136	230	1048	1137
L_0 (H)	13,8	0,71	11,4	0,45	1,1	0,143
X_{L0} (Ω)	4330	222	3570	141	346	45
R_{L0} (Ω)	148	2,6	177	1,8	3,4	0,3
p_U (-)	36,4	32,7	32,2	31,7	24,5	28
L'_2 (H)	1,36	0,904	0,31	0,29	0,025	0,024
X'_2 (Ω)	427	284	96	91	7,7	7,6
R'_2 (Ω)	91	78	30	29	12	10



Obr. 8.16 Náhradní schéma zhášecí tlumivky ZTC podle výrobce EGU.

Simulace a měření 1fázové zemní spojení v kompenzovaných sítích s využitím ATPDraw

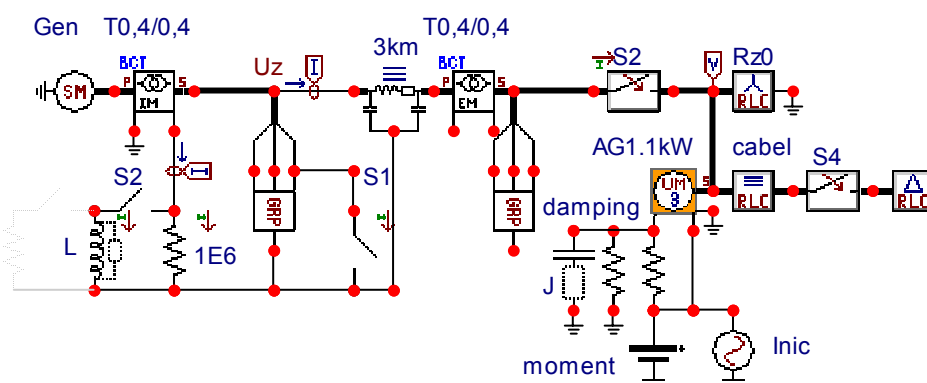
Pro tento případ je konfigurace sítě přizpůsobena schéma na obr. 8.5, část c). Nejprve byla provedena simulace vzniku zemního spojení s využitím preprocesoru ATPDraw. Pro ustálený kapacitní proud 686 mA byla vypočtena odpovídající kapacita soustavy

$$C = \frac{I_c}{U_f \cdot \omega} = \frac{0,686}{230 \cdot 314} = 9,497 \mu\text{F} \quad (8.15)$$

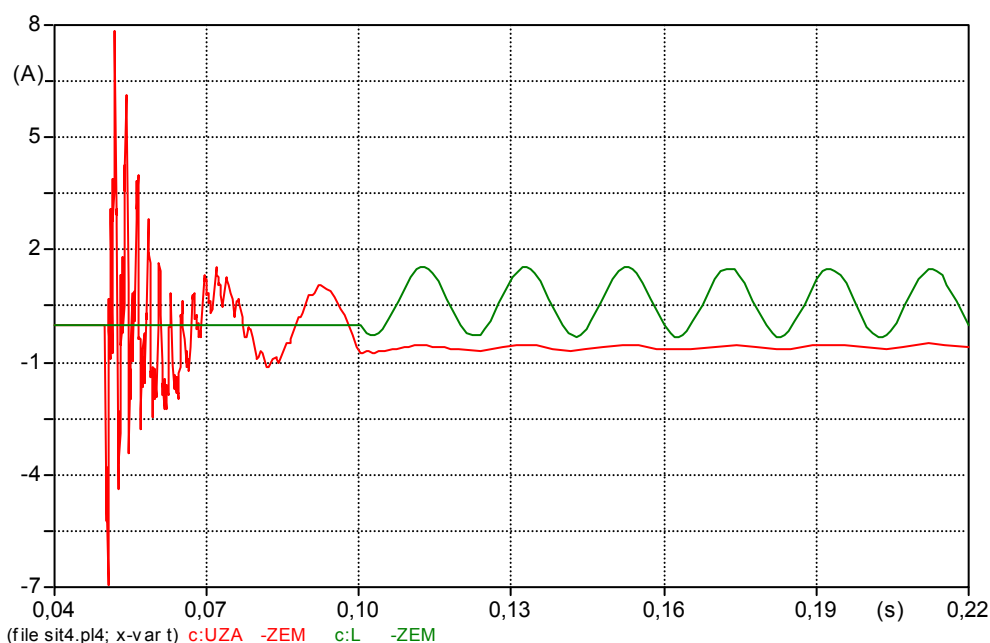
A tomu odpovídající velikost kompenzační tlumivky

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} = \frac{1}{314^2 \cdot 9,497 \cdot 10^{-6}} = 1,0669 \text{ H} \quad (8.16)$$

Pro tuto hodnotu indukčnosti kompenzační tlumivky bylo upraveno výchozí schéma části elektrizační soustavy v prostředí ATPDraw, viz. obr. 8.17.



Obr. 8.17 Schéma v prostředí ATPDraw pro modelování napěťových a proudových poměrů v kompenzované síti.

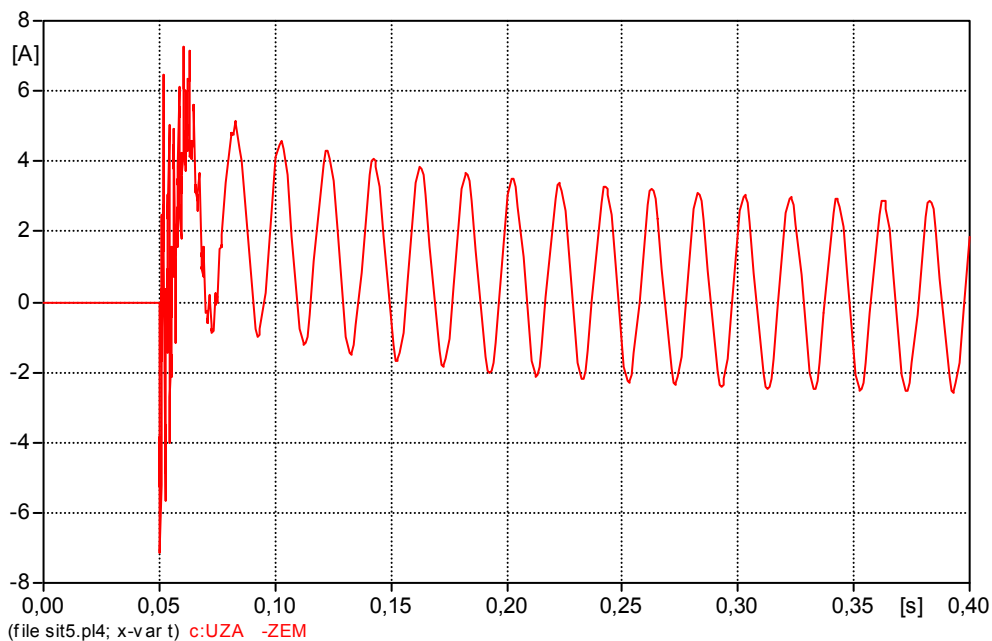


Obr. 8.18 Průběh proudu místem zemního spojení a průběh proudu tlumivkou.

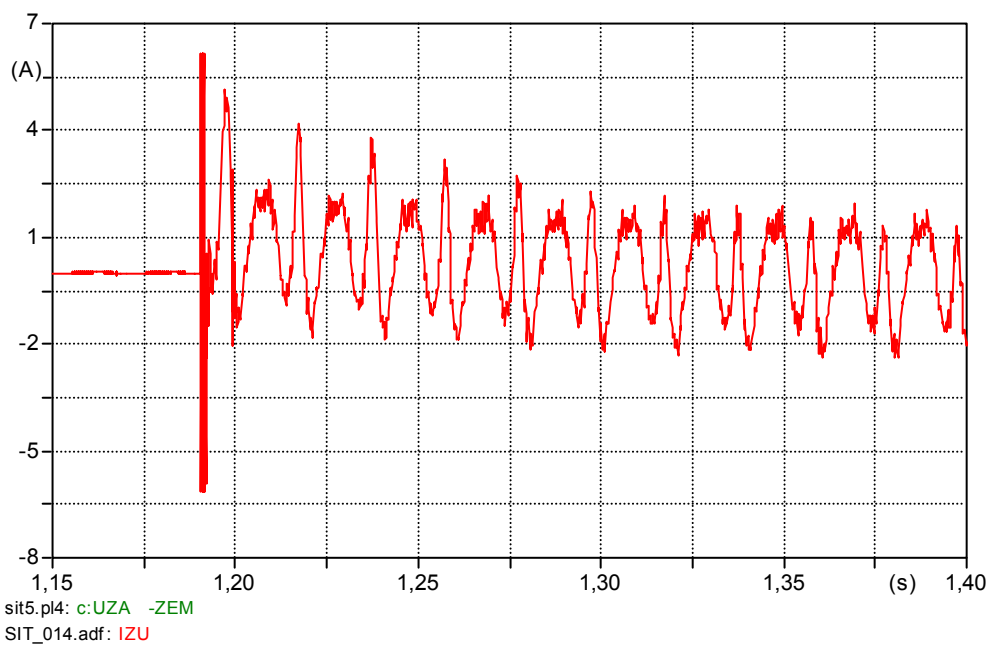
Z obr. 8.18 je zřejmý průběh simulace zemního spojení. V čase 50 ms je stykačem S1 simulován vznik zemního spojení. Pro větší názornost nejprve nekompenzované zemní spojení, ke kompenzaci, tzn. K připojení tlumivky do uzlu transformátoru, došlo v čase 0,1s. Kapacitní proud soustavy byl vykompenzován a místem zemního spojení protéká pouze zbytkový proud daný pouze ztrátami činného vnitřního odporu tlumivky a svodovými odpory soustavy.

Protože k samotné verifikaci matematického modelu měření nebyla k dispozici vhodná kompenzační tlumivka s potřebnými parametry, byla použita tlumivka s parametry 0,25 H s vnitřním odporem 1,3 Ω . Pro tento případ bylo také upraveno schéma matematického

modelu v prostředí ATPDraw. Na obr. 8.19 je pak zobrazen celkový simulovaný průběh proudu místem zemního spojení, na obr. 8.20 průběh proudu naměřený.



Obr. 8.19 Simulovaný průběh proudu místem zemního spojení.



Obr. 8.20 Naměřený průběh proudu místem zemního spojení, částečná kompenzace
 $L = 0,25 \text{ H}$, $R = 1,3 \Omega$.

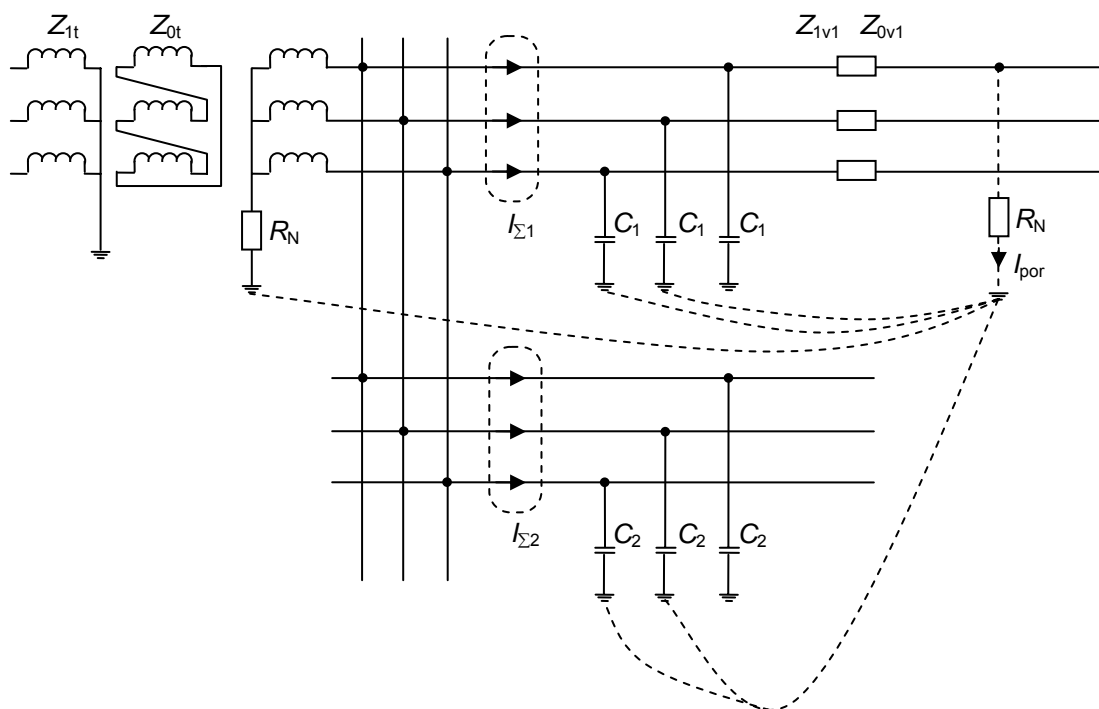
8.2.3 Odporové uzemnění uzlu

U kabelových sítí VN se výhody kompenzace zemních kapacitních proudů neprojevují tak jednoznačně jako u sítí venkovních. Většina poruch je trvalá a zmenšení poruchového proudu se projeví ve „samozhášení“ jako při obloukových poruchách u venkovního vedení. Zhášecí tlumivka sice omezuje přepětí při vzniku zemního spojení, ale provoz sítě při zemním spojení namáhá izolaci zdravých fází sdruženým napětím a přináší riziko vzniku vícenásobných poruch. Zařazení činného odporu do uzlu způsobí omezení proudu zemních spojení s ohledem na dimenzování uzemnění, zajistí dostatečné tlumení přepětí při vzniku zemního spojení a umožní použití jednoduchých ochran. Sít' s odporovým uzemněním uzlu se při zemní poruše trvale neprovozuje a po lokalizaci postiženého vývodu se postižený úsek vypíná.

Zařazení odporníku do uzlu má další příznivý vliv v lepším tlumení přechodných jevů a provozních přepětí, především při vzniku zemních poruch. Spolu s rychlým vypínáním všech zemních poruch se toto projevuje tak příznivým ovlivněním vlastností, že se u tohoto typu sítí téměř nevyskytují vícenásobné poruchy.

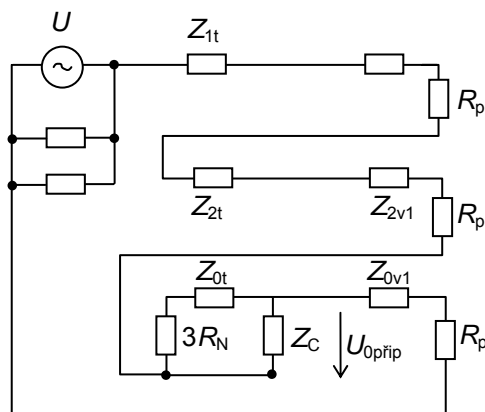
Vliv uzemnění uzlu přes činný odpor se nejvíce projevuje při jednopólových poruchách, zkratech. U ostatních druhů poruch jsou poměry v podstatě shodné s kompenzovanými sítěmi, či sítěmi s izolovaným uzlem. Znalost proudu při jednopólových zkratech je nutná jak pro určení podmínek činnosti ochran a jejich kontrolu, tak pro stanovení přípustnosti provozu s ohledem na ochranu osob před nebezpečným dotykovým a krokovým napětím, ovlivnění blízkých sdělovacích vedení i dimenzování zařízení, přes která se proud při zemních poruchách může uzavírat.

Určení proudů při jednopólovém zkratu pro sít' znázorněnou na obr. 8.21



Obr. 8.21 Schéma pro určení proudu při 1pólovém zkratu.

S jednopólovým zkratem platí náhradní schéma na obr. 8.22, ze kterého lze při podrobnějších výpočtech určit poruchový proud i jednotlivé fázové proudy.



Obr. 8.22 Náhradní schéma pro výpočet poměrů při 1pólovém zkratu.

U sítí s odporovým uzemněním uzlu není možné zanedbávat odpory obloukových poruch, kapacity vedení, ale mnohdy je možné zanedbávat reaktance některých částí, popř. je možné zanedbávat i jejich sousledné impedance. Pro proud poruchy platí známý vztah:

$$I_p = \frac{3U_f}{2Z_1 + Z_0 + 3R_p} \quad (8.17)$$

kde U je fázové napětí sítě, Z_1 výsledná sousledná složková, Z_0 výsledná nulová složková impedance sítě vztažená k místu poruchy, R_p je přechodový odpor poruchy.

Ve většině případů není zapotřebí určovat proud poruchy takto složitě, postačí vycházet ze zjednodušených náhradních schémat a vztahů.

Proud postiženou fází sestává z poruchového proudu I_p , proudu zátěže $R_{zát1}$ a vlastního kapacitního proudu I_{RC1} . U proudu zátěže lze u našich odporově uzemněných sítí vn předpokládat, že se při jednopólovém zkratu v podstatě nemění (protože se prakticky nemění sdružená napětí sítě).

$$I_{R1} = I_p + I_{R1zát} + I_{RC1} \quad (8.18)$$

Vlastní kapacitní proud je dán jeho souslednou a nulovou složkou

$$I_{IC1} = j\omega C_1 U_f \quad (8.19)$$

$$I_{OC1} = -j\omega C_1 \frac{(3R_N + Z_{0T})Z_C}{2Z_1 + Z_0 + 3R_p} = -j\omega C_1 U_{opř} \quad (8.20)$$

U fáze R vývodu č. 1 je tedy vlastní kapacitní proud

$$I_{RC1} = j\omega C_1 (U - U_{opř}) \quad (8.21)$$

Proudy ostatních fází jsou dány součtem jejich zatěžovacích a kapacitních proudů. Např. u postiženého vývodu č. 1

$$I_{S1} = I_{Szát1} + I_{SC1} = I_{Szát1} + j\omega C_1 (a^2 U - U_{opř}) \quad (8.22)$$

$$I_{T1} = I_{Szát1} + j\omega C_1 (aU - U_{opř}) \quad (8.23)$$

Takto podrobné určení proudu má význam např. pro stanovení podmínek činnosti distančních nebo srovnávacích ochran. U nejčastěji předpokládaných nadproudových ochran, zapojených do uzlu transformátorů proudu jednotlivých vývodů, jsou rozhodující součtové proudy fází vývodů.

Součtový proud u vývodu č. 1 s poruchou je

$$I_{S1} = U_f \left(\frac{3}{2Z_1 + Z_0 + R_p} - j3\omega C_1 \frac{U_{opř}}{U_f} \right) \cong I_p - I_{kap1} \quad (8.24)$$

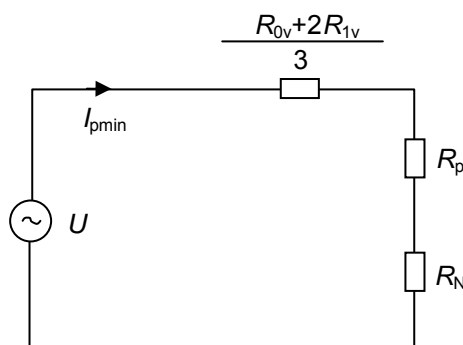
U zdravého vývodu č. 2

$$I_{\Sigma 2} = -j3\omega C_2 U_{0př} \cong -I_{kap2} \quad (8.25)$$

Určení proudu pro kontrolu rozběhu ochran

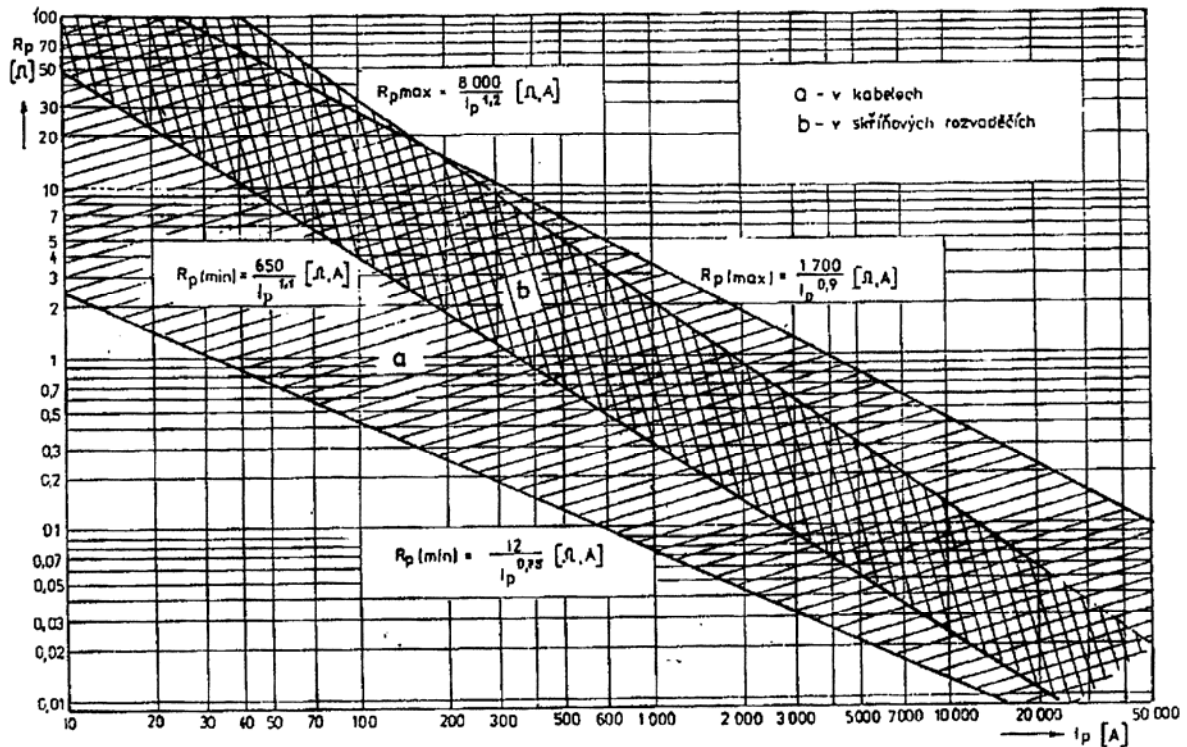
Pro kontrolu rozběhu ochran se určuje výpočtem minimální hodnota proudu, která může být při poruše na daném zařízení k dispozici. U těchto sítí je tím rozuměna hodnota proudu při zanedbání kapacitního proudu sítě, při uvažování největšího přechodového odporu obloukové poruchy, která je n konci chráněného úseku. Obvykle je v tomto případě možné zanedbat impedanci napájecího zdroje a pro určení proudu použít náhradní schéma na obr. 8.23 a z něho vyplývající vztah (za $(2R_{1v}+R_{0v})/3$, což je činný odpor smyčky vodič-země, je použito označení R_v).

$$I_{pmin} = \frac{U_f}{R_v + R_N + R_p} \quad (8.26)$$



Obr. 8.23 Náhradní schéma pro určení minimálního poruchového proudu.

Protože odpor poruchy je závislý na poruchovém proudu a jeho určení by komplikovalo praktické použití vztahu (8.26), je na obr. 8.25 uvedena vypočtená závislost I_{pmin} na součtu R_v+R_N , respektující maximální hodnoty přechodových odporů podle obr. 8.24.

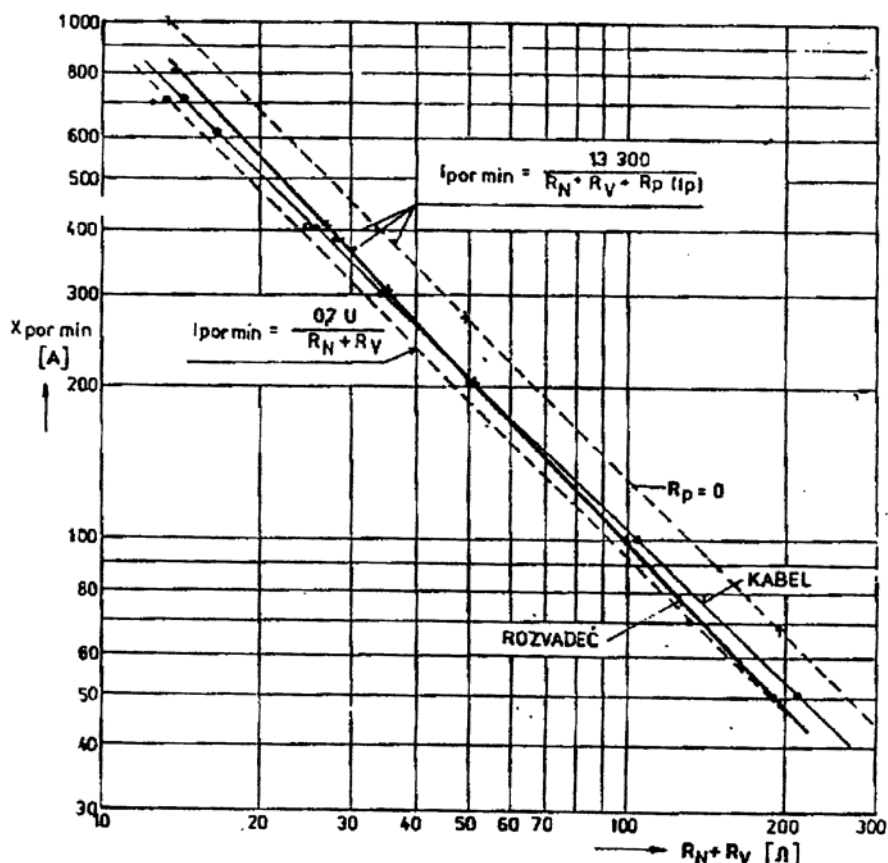


Obr. 8.24 Přečhodné odpory obloukových poruch.

Jak je zřejmé, v celém rozsahu je poruchový proud cca 70 % z hodnoty, kterou bychom určili při zanedbání odporu poruchy.

Proto se pro určení minimálního proudu pro kontrolu rozběhu ochran doporučuje vztah (8.27)

$$I_{pmin} = \frac{0,7U_f}{R_v + R_N} \quad (8.27)$$



Obr. 8.25 Minimální proud obloukové poruchy v síti 22 kV.

Tento vztah byl určen pro obloukové poruchy u zařízení 22 kV. Protože pro sítě 10 a 35 kV nejsou dosud potřebné podklady k dispozici, navrhuje se prozatím používat tento vztah i pro tyto sítě. Za odpor R_V je u stávajících sítí, u kterých se přechází na odporové uzemnění uzlu, nejlépe dosazovat naměřenou velikost činného odporu smyčky vodič–zem. Za R_N je zapotřebí dosadit zvolenou velikost uzlového odporu. Pochopitelně u všech kratších úseků je $R_V \ll R_N$ a není ho třeba uvažovat. Ujišťovat Z_{0v} je hlavně zapotřebí při případném použití distančních ochran, její znalost je předpokladem správného nastavení měřicího obvodu.

Napětí při jednopólovém zkratu

Napětí jednotlivých fází proti zemi v místě zkratu se určí

$$U_{R0} = \frac{3R_p \cdot U_f}{2Z_1 + Z_0 + 3R_p} \quad (8.28)$$

$$U_{S0} = U_f \left(a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_p} \right) \quad (8.29)$$

$$U_{T0} = U_f \left(a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_p} \right) \quad (8.30)$$

Sdružená napětí mají velikost

$$U_{RS} = U_{R0} - U_{S0} = U_f \left(\frac{Z_0 - Z_1 + 3R_p}{2Z_1 + Z_0 + 3R_p} - a^2 \right) \quad (8.31)$$

$$U_{TR} = U_f \left(a - \frac{Z_0 - Z_1 + 3R_p}{2Z_1 + Z_0 + 3R_p} \right) \quad (8.32)$$

Pokud u sítě platí $Z_0 \gg Z_1$ je ovlivnění sdružených napětí malé a jak z hlediska vlivu na spotřebiče, tak i na proudy zátěže, je zanedbáváme. U nulové složky napětí její důležitou hodnotou napětí na přípojnicích napájecí stanice, poněvadž některé ochrany zde připojené využívají toto napětí pro svou činnost. Pro její velikost platí:

$$U_{0pr} = \frac{(3R_N + Z_{0t})Z_C}{(2Z_1 + Z_0 + 3R_p)(3R_N + Z_{0t} + Z_C)} U_f \quad (8.33)$$

Simulace a měření 1fázové zemní poruchy v soustavě uzemněné přes odporník s využitím ATPDraw

Na základě výsledků z předcházejících kapitol byla nejprve stanovena hodnota uzlového odporníku

$$R_N \leq \frac{1}{3j\omega C} = \frac{U_f}{I_C} \quad (\Omega) \quad (8.34)$$

$$R_N \leq \frac{1}{3j\omega 9,49 \cdot 10^{-6}} = 112 \quad (\Omega)$$

Z hlediska realizace měření a proudové zatížitelnosti byla vybrán v laboratoři HARD uzlový odporník 13 Ω , 10A a pro tuto hodnotu byla následně určena hodnota minimálního poruchového proudu dle vztahu 8.27

$$I_{pmin} = \frac{U_f}{R_v + R_N + R_p} = \frac{0,7 \cdot 230}{13 + \frac{2 \cdot 0,762 + 2,286}{3}} = 11,3 \text{ A}$$

Odpor poruchy je zanedbán.

Pro nastavení číslicových ochrany je důležité, aby ochrana nepůsobila při zkratu mimo vlastní vedení, je zapotřebí splnit podmínku, aby nastavení rozběhové hodnoty číslicové ochrany bylo větší než kapacitní proud vlastního vedení (aby nedocházelo k falešnému působení při poruše na jiném vedení) a současně, aby rozběhová hodnota číslicové ochrany byla menší nebo rovna hodnotě minimálního poruchového proudu s uvažováním koeficientu citlivosti dané ochrany. Musí tedy platit:

$$\frac{k_b \cdot I_{Cvlastni}}{p_p} \geq I_r \leq \frac{I_{pmin}}{p_p \cdot k_c} \quad (\text{A}) \quad (8.35)$$

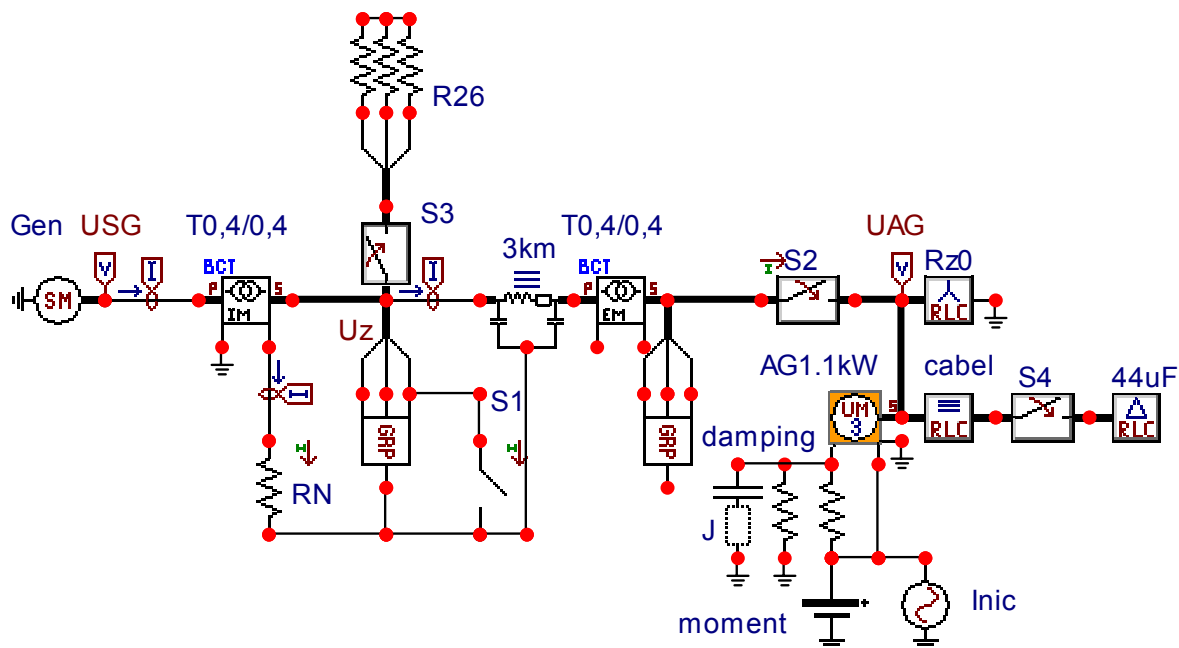
kde I_c vlastní kapacitní proud vedení
 k_b koeficient bezpečnosti = 1,3
 p_p převod měřících transformátorů proudu
 I_p minimální poruchový proud
 k_c koeficient citlivosti = 1,5

Pro uvažovaný případ tedy platí

$$\frac{1,3 \cdot 0,686}{p_p} \geq I_r \leq \frac{11,28}{p_p \cdot 1,5}$$

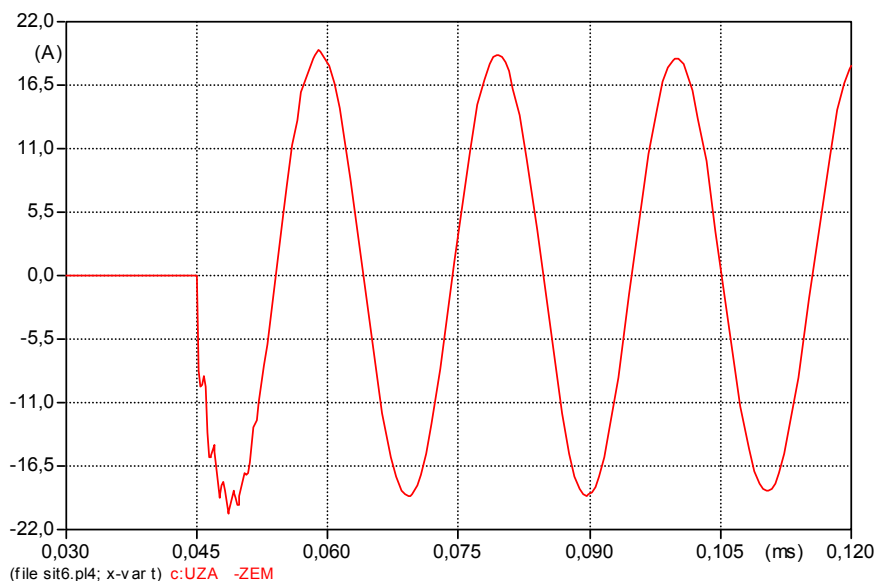
Nastavení rozběhové hodnoty číslicové ochrany pro případ 1pólového zemní zkratu bude $(7,52/p_p) \geq I_r \geq (0,89/p_p)$.

Schéma zapojení modelu části elektrizační soustavy pro měření je na obr. 8.5, část b), schéma matematického modelu pro simulaci 1pólové poruchy je zobrazeno na obr. 8.26.

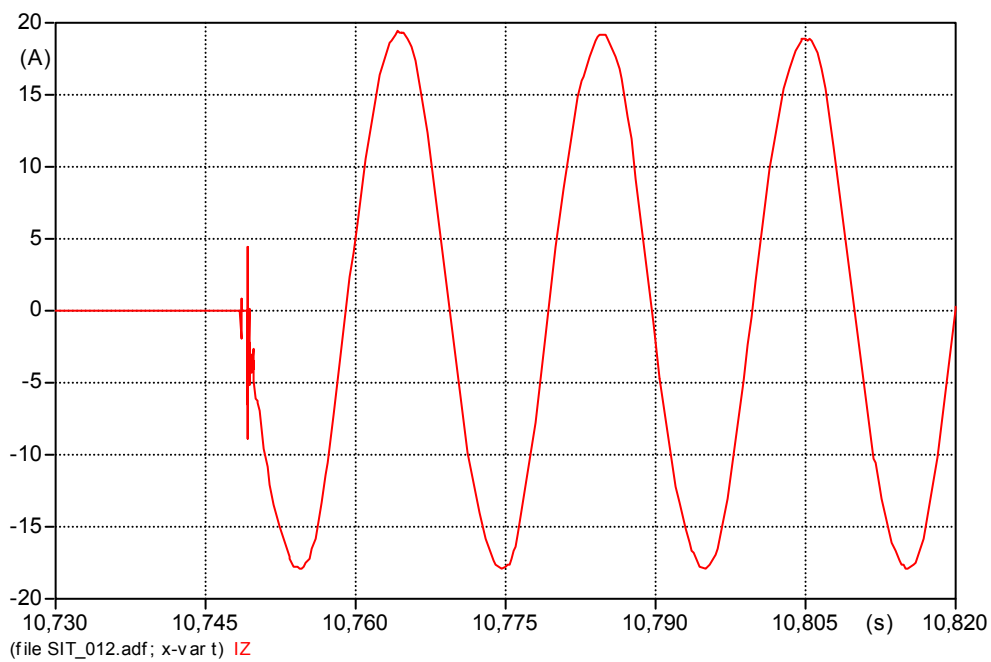


Obr. 8.26 Schéma pro simulaci 1pólového zemní poruchy v soustavě uzemněné přes uzlový odporník.

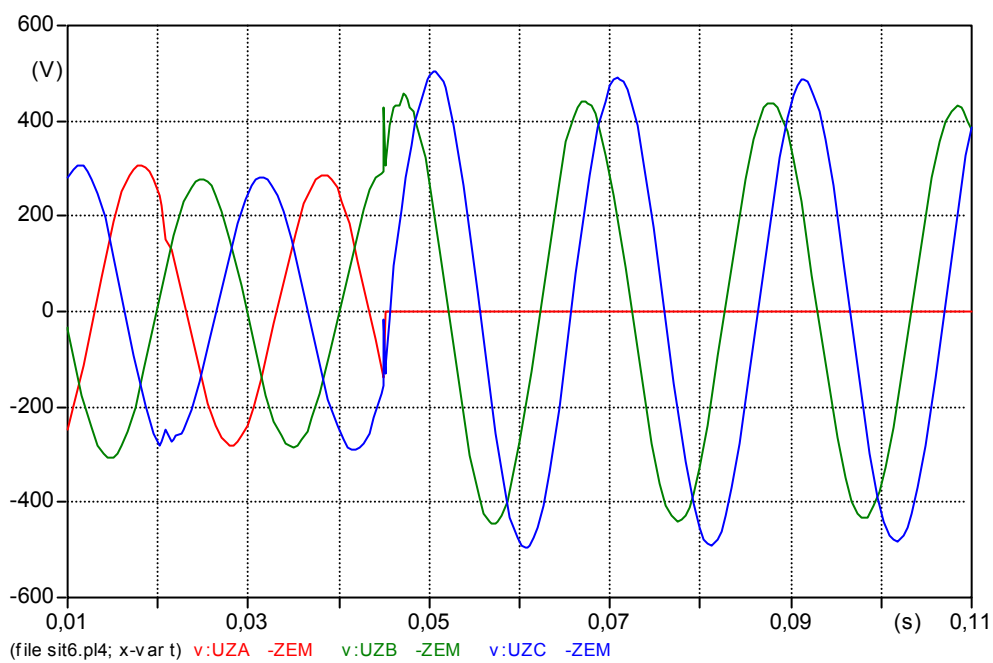
Na obr. 8.27 je uveden výsledný simulovaný průběh zkratového proudu, na obr. 8.28 pak pro srovnání naměřený průběh zkratového proudu. Z obr. 8.29 pro simulovaný průběh okamžitých hodnot napětí v místě zkratu a obr. 8.30 pro naměřený průběh jedné fáze je zřejmé předpokládané tlumení přechodného děje v okamžiku vzniku zemního zkratu. Strmost průběhů napětí je sice vyšší než v případě kompenzovaných sítí, nicméně přepětí je zřetelně menší, napětí dosáhne maximální hodnoty 505 V, čemuž odpovídá přepětí 1,54. (Pro srovnání: u nekompenzované sítě hodnota přepětí byla 2,04, u kompenzované 2,24).



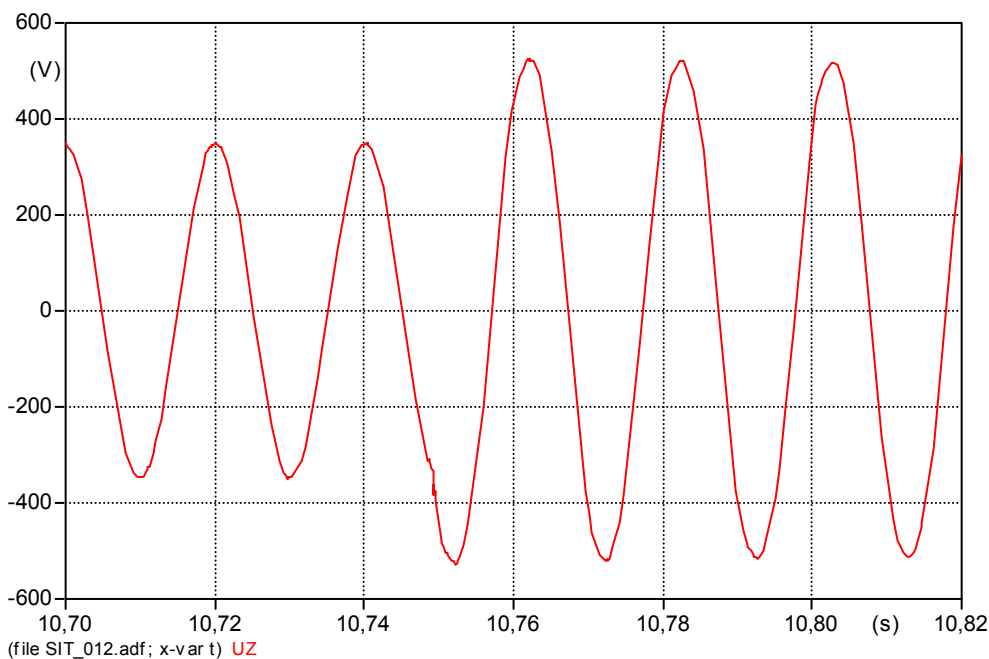
Obr. 8.27 Výsledný simulovaný průběh zkratového proudu.



Obr. 8.28 Výsledný naměřený průběh zkratového proudu.



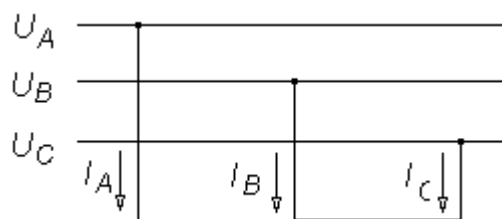
Obr. 8.29 Simulovaný průběh okamžitých hodnot napětí v místě zkratu.



Obr. 8.30 Naměřený průběh okamžitých hodnot napětí jedné fáze v místě zkratu.

8.2.4 Dvofázový zkrat v přímo uzemněné soustavě

Pro úplnost jsou v následující kapitole řešeny poměry při 2fázovém v přímo uzemněné soustavě, hodnoty zkratového proudu při výše uvedeném typu poruchy je nezbytně nutné znát při nastavování číslicových ochran chráničů daný objekt. V textu je obsažena pouze potřebná část teorie k výpočtu zkratových poměrů.



Obr. 8.31 Schématické znázornění 2fázového zkratu.

Z výše uvedeného obrázku je zřejmé, že platí:

$$I_A = 0 \quad U_B = U_C \quad I_B = -I_C \quad (8.36)$$

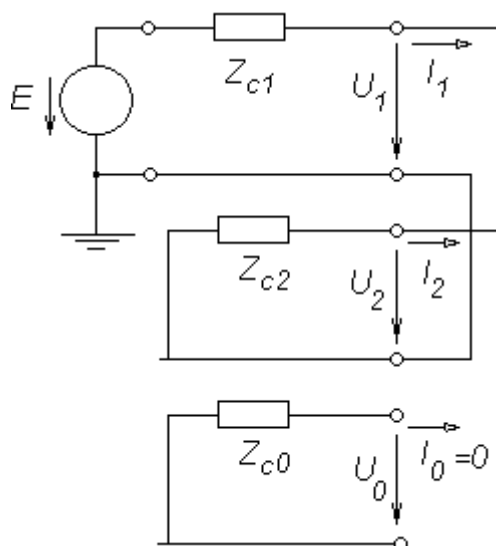
Přechodem ke složkovým veličinám platí pro složkové proudy rovnice:

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{I} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} j\sqrt{3}I_B \\ -j\sqrt{3}I_B \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8.37)$$

Z rovnice plyne:

$$I_1 = -I_2 \quad I_0 = 0 \quad (8.38)$$

Je možno sestavit náhradní složkové schéma:



Obr. 8.32 Náhradní složkové schéma pro 2fázový zkrat.

Pro složkové veličiny je možno na základě náhradního schématu na obr. 8.32 psát:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{c1} + Z_{c2}} \quad I_2 = -I_1 \quad I_0 = 0 \quad (8.39)$$

$$U_1 = U_2 = -Z_{c2} I_2 = Z_{c2} I_1 \quad U_0 = 0 \quad (8.40)$$

Měření na modelu části elektrizační soustavy a simulace 2fázového zkratu v prostředí ATPDraw

Napěťové a proudové poměry při 2fázovém zkratu byly určovány na testovacím obvodu části elektrizační soustavy, jednotlivé komponenty sítě byly zapojeny dle schéma na obr. 8.33.

Pro impedanci náhradního obvodu dle obr. 8.34 je tedy možno psát:

$$Z_{(1)} = \frac{(jx_{AG} + jx_T + R_v + jx_V) \cdot (jx_{SG} + jx_T)}{R_v + j(x_{AG} + x_T + x_V + x_{SG} + x_T)}$$

$$Z_{(1)} = \frac{(j29,48 + j1,6 + 0,762 + j3,303) \cdot (j2,035 + j1,6)}{0,762 + j(29,48 + 1,6 + 3,303 + 2,035 + 1,6)} = 6,96 \cdot 10^{-3} + j3,289$$

Pro počáteční rázový zkratový proud I''_{k2} při dvoufázovém zkratu platí

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kV}, \Omega), \text{ pro minimální hodnotu je } c = 1, \text{ potom}$$

$$I''_{k2\min} = \frac{1 \cdot 400}{2 \cdot 3,288} = 60,8 \text{ (A)}$$

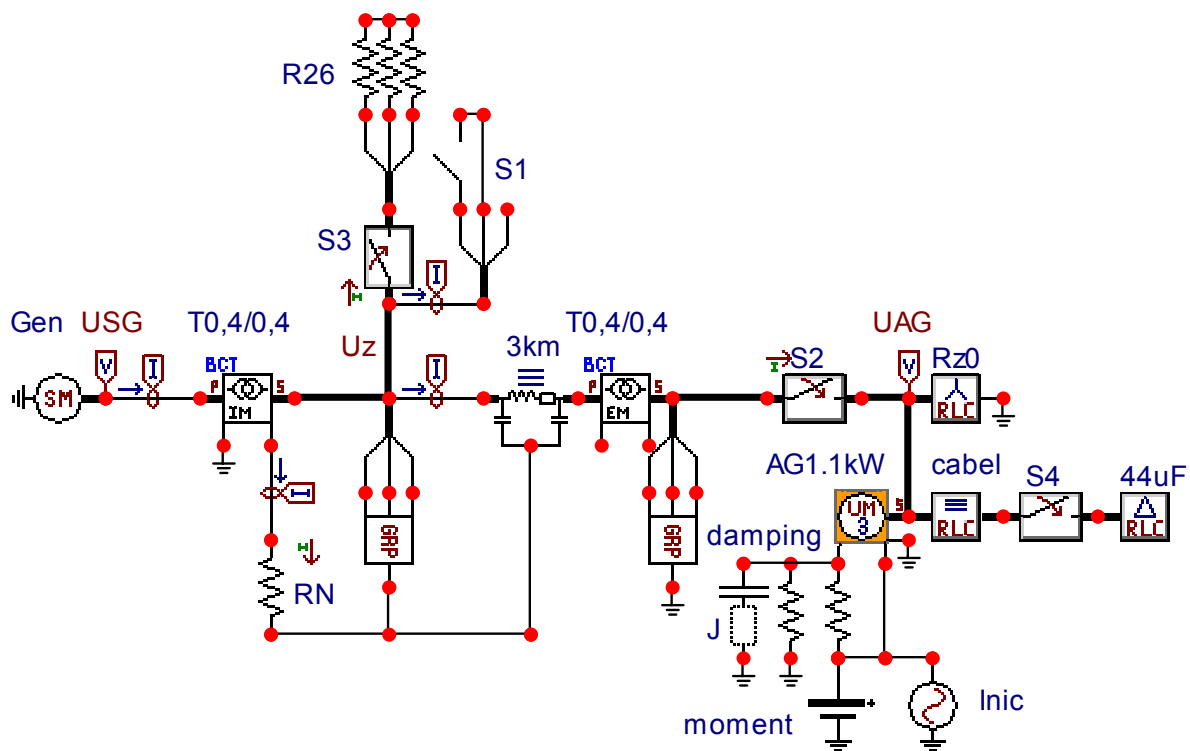
Pozn.: Pro 3fázový zkrat pak platí

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = 70,2 \text{ (A)}$$

Pro názornost je dále uveden výpočet nastavení zkratové ochrany, která musí vypnout každý zkrat, který může nastat v chráněném úseku. Pro nastavení rozběhové hodnoty stupně zkratové ochrany musí platit

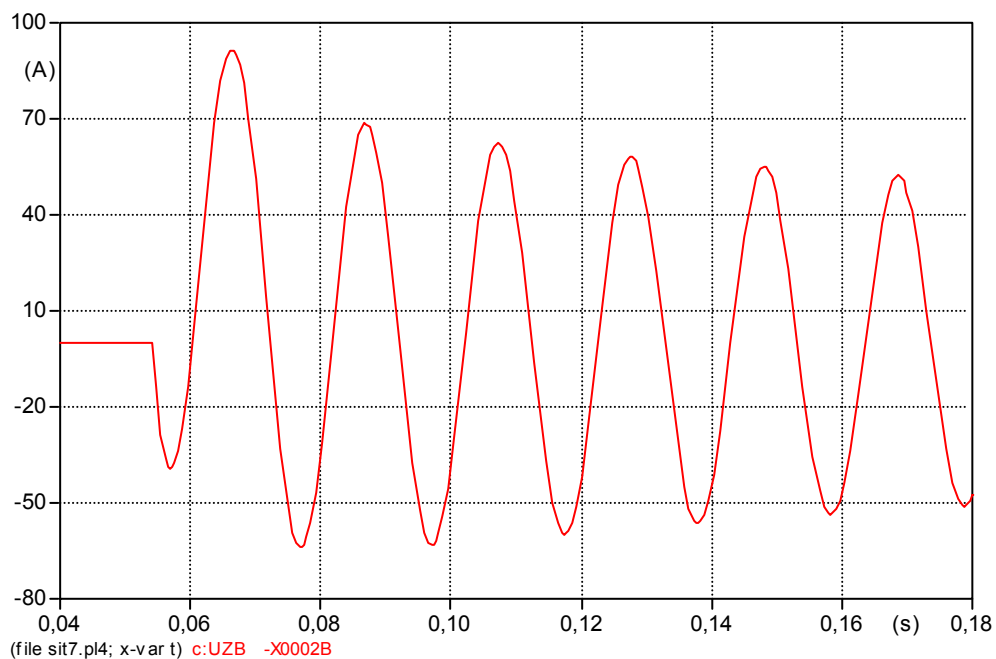
$$I_r \leq \frac{I''_{k2\min}}{k_C \cdot p_p} = \frac{60,8}{1,5 \cdot p_p} = 40,5 / p_p \text{ (A)}$$

Pro simulaci 2fázového zkratu bylo vytvořeno schéma v prostředí ATPDraw odpovídající modelu části elektrizační soustavy, ve které bylo následně provedeno samotné měření. Výchozí schéma matematického modelu v prostředí ATPDraw je na obr. 8.35.

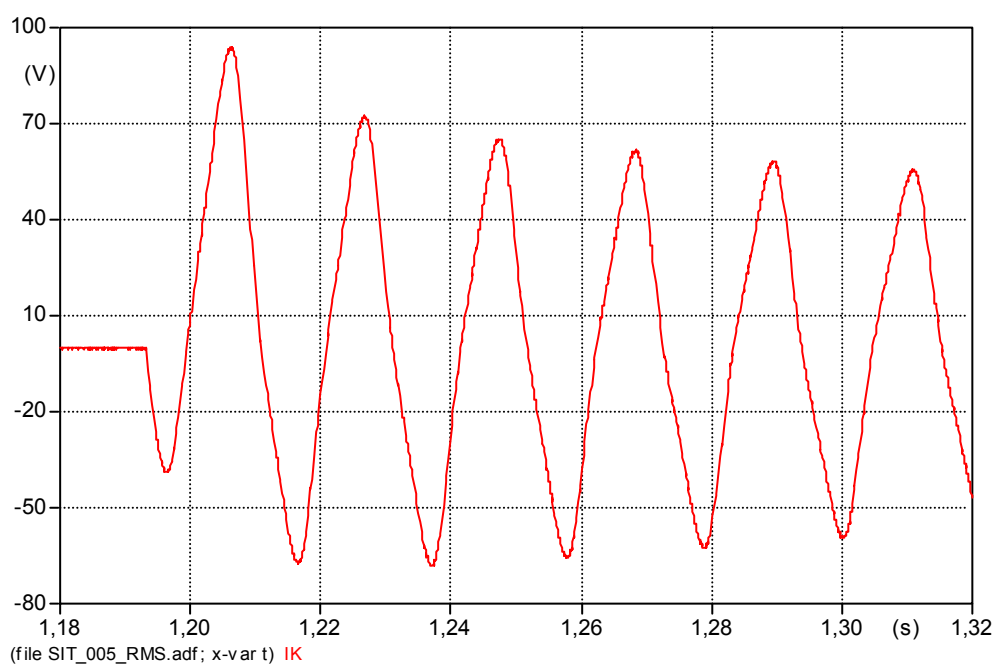


Obr. 8.35 Schéma pro simulaci 2fázového zkratu v prostředí ATPDraw.

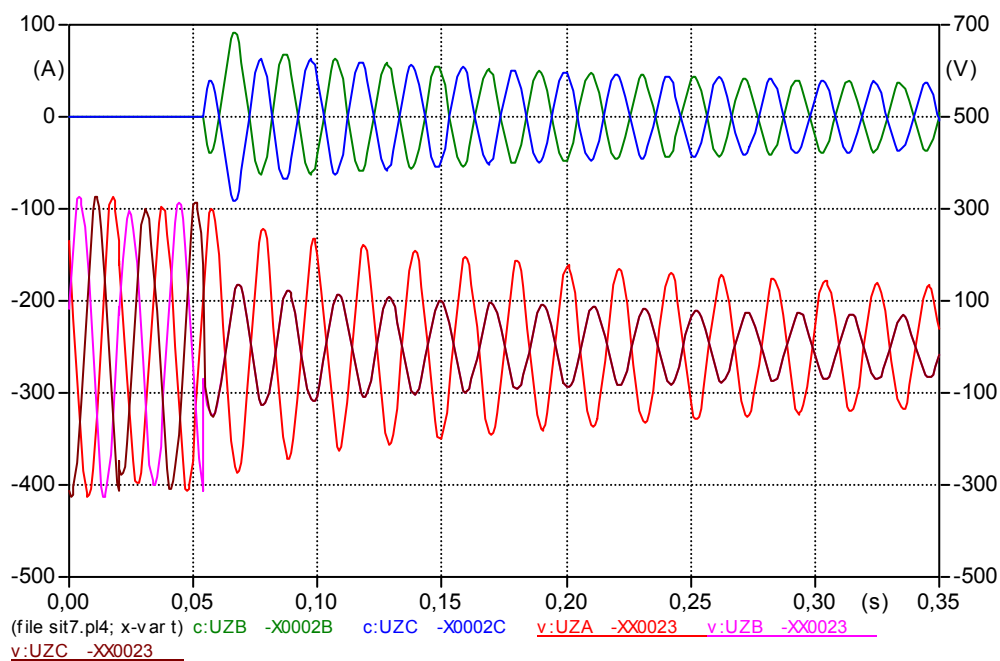
Stykačem S2 je v čase 20 ms připojen nenabuzený asynchronní generátor přes transformátor a vedení do místa zkratu, v čase 54 ms je spínačem S1 simulován 2fázový zkrat. Na obr. 8.36 je zobrazen výsledný simulovaný průběh proudu, na obr. 8.37 je pro srovnání zobrazen naměřený průběh proudu. Simulované průběhy napětí v místě zkratu a zkratového proudu jsou uvedeny na obr. 8.38.



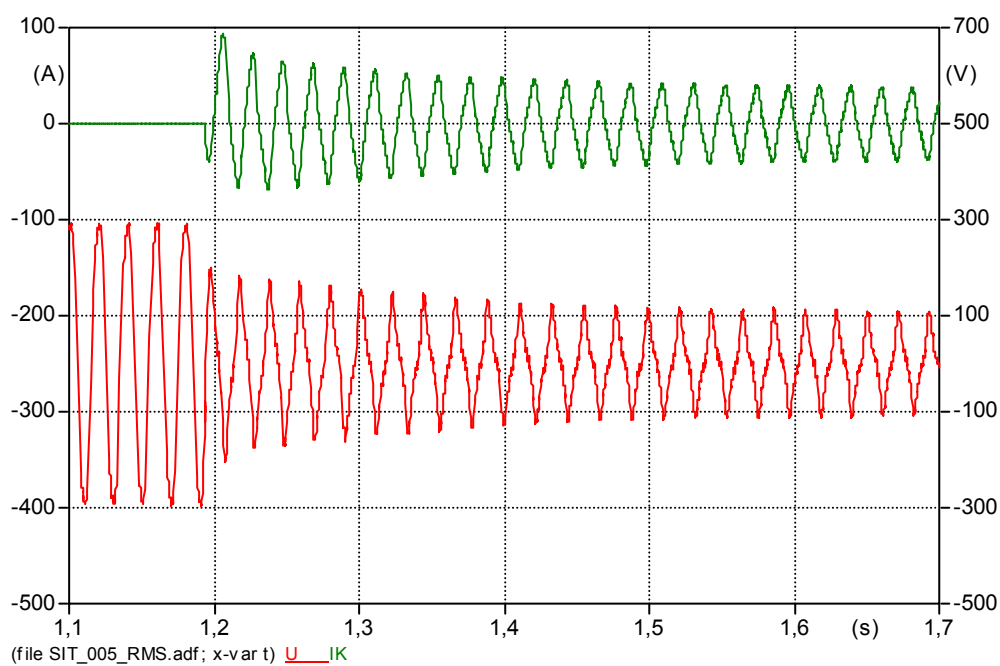
Obr. 8.36 Simulovaný průběh proudu 2fázového zkratu.



Obr. 8.37 Naměřený průběh proudu 2fázového zkratu.



Obr. 8.38 Simulované průběhy napětí v místě zkratu a zkratový proud.



Obr. 8.39 Naměřený průběh napětí jedné fáze v místě zkratu, průběh zkratového proudu.