

4. Přenosová vedení

Těžiště programu ATP je ve zpracování modelů přenosových vedení a kabelů. Přenosová vedení lze v programu ATP modelovat mnoha způsoby a to od nahrazení vedení prvkem *RLC* až po procedury Line a Cable Constants, které generují obvodové parametry vedení ze zadaných rozměrů a materiálových konstant.

4.1 Nastavení parametrů modelů

4.1.1 Line/Cable



Pomocí této procedury je možno vygenerovat požadovaný typ vedení postupným zadáváním jednotlivých parametrů. Po volbě **Line/Cable** se objeví roleta s nabídkou počtu fází pro navrhované vedení. Po zvolení počtu fází následuje otevření dialogového okna. Dialogové okno obsahuje dvě záložky **Model** a **Data**.

Model

Uživatel volí typ přenosového vedení v nabídce **System type**:

Overhead Line - venkovní vedení

Single Core Cable - jednožilový kabel

Enclosing Pipe - vícežilový kabel

Data

V záložce data se zadávají rozměry vedení a materiálové konstanty vodičů a izolantů.

4.1.1.1 Overhead Line

Po zvolení venkovního vedení lze nastavit transponované vedení **Transposed**, pro respektování povrchového jevu označení položky **Skin effect**. Volbou **Units** se volí **Metric** – metrická soustava nebo **English** – anglická soustava. ATP umožňuje modelovat vedení pomocí modelů jak se soustředěnými parametry tak s rozloženými parametry.

Soustředěné parametry

π článek (nominal π)

Vlastnosti:

- Vysoká spolehlivost
- Pouze pro poměrně nízkou frekvenci nebo krátké vedení
- Časový krok výpočtu není limitován
- Frekvenčně nezávislý (platí pro zadanou frekvenci)

Rozprostřené parametry

transponovaný model (Clark)

Vlastnosti:

- Efektivnost číselného výpočtu

- Prakticky postačující přesnost většiny výpočtů přechodných dějů v omezeném frekvenčním rozsahu
- Časový krok výpočtu je limitován (musí být kratší než doba chodu vlny po vedení)
- Frekvenčně nezávislý (platí pro zadanou frekvenci)
- Nevhodný pro řešení nesymetrických stavů

netransponovaný model (K. C. Lee)

Vlastnosti:

- Stejně jako předchozí, počítá nesouměrnost vedení a je vhodný pro nesymetrické stavy

frekvenčně závislé modely (J. Marti, Noda, Semlyen)

Vlastnosti:

- Přesnost v širokém frekvenčním rozsahu
- Relativně efektivní číselný výpočet
- Časový krok výpočtu je limitován
- Pro velmi nízké hodnoty frekvencí může být nepřesný

Typ modelu (Bergeron, π , J. Marti, Noda, Semlyen) se nastaví v nabídce **Type**. Položka **Standard data** obsahuje tři parametry. **Rho** je měrná rezistivita země ($\Omega \cdot m$), **Freq. Init** je frekvence, pro kterou budou parametry počítány a **Length**, je délka vedení v závislosti na zvoleném jednotkovém systému km/miles. Pro model Bergeron a π je nastavení v záložce Model ukončeno, avšak při volbě ostatních modelů je nutno nastavit **Freq. SS** odpovídající frekvenci ustáleného stavu a **Freq. matrix** maximální frekvenci při které budou parametry počítány (Hz), **Decades** je počet dekád frekvenčního rozsahu a **Points/Dec.** značí počet bodů v jedné dekádě.

V záložce **Data** je **Phase no** pořadové číslo fáze, v případě zemního vodiče se nastaví 0. U každého vodiče se zadává **React/Resis** – reaktance/odpor vodiče na jeden kilometr délky (Ω/km), **Rout** – vnější poloměr vodiče, poloměr celého vodiče nebo lana (cm), pokud se v předchozí nabídce **Model** nastaví požadavek Skin efektu, je třeba ještě určit vnitřní poloměr vodiče, poloměr ocelové duše vodiče - lana **Rin** (cm). Další tři položky popisují uložení a rozmístění jednotlivých fází a zemních vodičů, kde **Horiz** určuje horizontální vzdálenost lana od středu stožáru (m), **Vtower** je výška lana nad zemí u stožáru (m) a **Vmid** je výška lana nad zemí v místě největšího prověšení (m).

Po ukončení zadávání je možno data uložit volbou **Save as** na dolní tlačítkové liště. Data je možno také importovat z již dříve vytvořených souborů pomocí **Import**. Pro ověření rozmístění jednotlivých vodičů lze použít **View**. Pro kontrolu správnosti zadání jednotlivých parametrů slouží **Verify**. Pokud je vše v pořádku, je možno přistoupit k vygenerování vedení resp. kabelu pomocí příkazu **Run ATP** a volbou **OK**.

4.1.1.2 Single Core Cable

Zadávání parametrů kabelu je podobné jako v předchozím případě. Stejně je nastavení standardních dat v nabídce **Standard data**. Nová je však nabídka **Snaking**, pro kroucený kabel tedy transponovaný. Uložení kabelu se specifikuje v nabídce **Cables in**. Je možné uložení ve vzduchu (**Air**), v zemi (**Ground**) nebo na povrchu země (**Surface**). Označení nabídky **Matrix output** umožňuje získat výslednou impedanci a data

admitanční matice (R , ωL , ωC). Pro volbu **Add G**, **Add C** vyznačí příslušné matice. V záložce **Data** se podobně jako v předchozím případě nastaví parametry týkající se vlastního kabelu. Standardně se nastaví nejprve parametry jádra (**Core**), kde **Rin** je vnitřní poloměr vodiče, **Rout** vnější poloměr vodiče (m). **Rho** je měrný odpor materiálu vodiče ($\Omega \cdot m$), **mu** je poměrná permeabilita materiálu vodiče, **mu (ins)** je poměrná permeabilita izolace vně vodiče a **eps (ins)** je poměrná permitivita izolace vně vodiče. Pro nastavení parametrů pláště a pancíře kabelu je nutné nejprve označit v nabídce **Conductors** položky **Sheath** resp. **Armor**. Celkový poloměr kabelu (vnější izolace) se nastaví v **Total radius** (m).

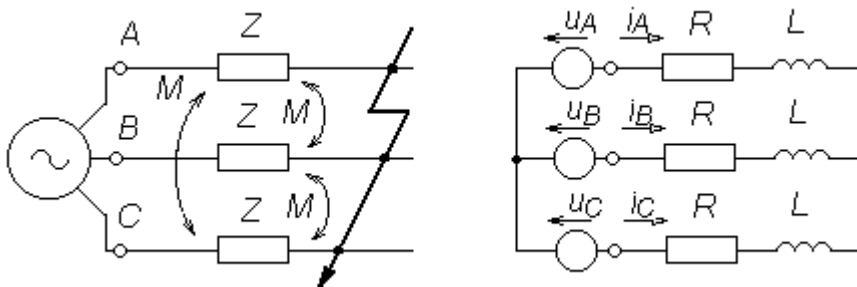
4.1.1.3 Enclosing Pipe

Jedná se o vícežilový kabel ve společném pouzdře. Nová je zde proto nabídka zadávání **Pipe data**, kde se nastaví parametry trubice. **Depth** značí vzdálenost v metrech mezi středem trubice a povrchem země. Význam parametrů **Rin**, **Rout**, **Rins**, **Rho** a **Mu** je totožný jako v předchozím případě s tím rozdílem, že tentokrát se netýkají parametrů kabelu, ale trubice. **Eps(in)** je relativní permitivita vnitřní izolace, tedy izolace mezi kabelem a trubicí, **Eps(out)** je relativní permitivita vnější izolace, izolace kolem trubice. Označením nabídky **infinite thickness** je počítáno s nekonečnou tloušťkou vodivé trubice.

4.2 Provoz vedení

4.2.1 Trojfázový zkrat napájený ideálním napěťovým zdrojem

Je uvažován případ vzniku trojfázového zkratu podle Obr. 4.1. Obvod je napájen ideálním napěťovým zdrojem harmonického napětí.



Obr. 4.1 Trojfázový zkrat napájený ideálním napěťovým zdrojem

Pro fázi A platí:

$$u_A(t) = U_m \sin(\omega \cdot t + \alpha) \quad (4.1)$$

kde U_m je amplituda sinusovky napětí, α je úhel fázoru napětí referenční fáze v okamžiku $t = 0$.

V souladu s Obr. 4.1 platí diferenciální napěťová rovnice:

$$u_A(t) = R \cdot i_A(t) + L \frac{di_A(t)}{dt} + M \left(\frac{di_B(t)}{dt} + \frac{di_C(t)}{dt} \right) \quad (4.2)$$

Po zjednodušení lze psát a pro výsledný proud pak platí rovnice:

$$u_A(t) = R \cdot i_A(t) + L_K \frac{di_A(t)}{dt} \quad \text{pro } t \geq 0 \quad (4.3)$$

$$L_K = L - M \quad (4.4)$$

$$i_A(t) = i_{Au}(t) + i_{Av}(t) \quad (4.5)$$

kde $i_{Au}(t)$ je partikulární řešení úplné rovnice 4.2. Je označováno jako **ustálená složka** výsledného proudu fáze A a představuje střídavou periodickou složku zkratového proudu. Pro ideální napěťový zdroj, má ustálený zkratový proud konstantní amplitudu a jeho frekvence je dána frekvencí zdroje. $i_{Av}(t)$ je obecné řešení úplné rovnice 4.2. Nazývá se přechodnou složkou výsledného proudu a představuje stejnosměrnou aperiodickou složku zkratového proudu. Její častější označení je **volný proud**. Stejnosměrná složka zkratového proudu doznívá s časovou konstantou $\tau_K = L_K/R$. Počáteční hodnota této složky je závislá na rozdílu velikostí předcházejícího ustáleného provozního stavu a ustáleného zkratového proudu. Maximální velikost stejnosměrné složky zkratového proudu závisí jak na úhlu α tak na velikosti proudu předcházejícího provozního stavu. Pro složku $i_{Au}(t)$ platí:

$$i_{Au}(t) = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) \quad (4.6)$$

kde Z_K je impedance zkratového obvodu:

$$Z_K = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L_K)^2} \quad (4.7)$$

φ_K je úhel zkratové impedance:

$$\varphi_K = \arctan \frac{L_K}{R} \quad (4.8)$$

Pro složku $i_{Av}(t)$ platí:

$$i_{Av}(t) = (i_{A[u]}(0) - i_{Au}(0)) e^{-\frac{t}{\tau_K}} \quad (4.9)$$

kde $i_{A[u]}(t)$ je proud předcházejícího provozního stavu v čase $t = 0$ a τ_K časová konstanta.

Řešení programem ATP

Je uvažováno jednoduché 110 kV vedení AlFe6 120 mm² o délce 20 km. K 3fázovému zkratu dojde ve vzdálenosti 10 km od zdroje. Pro nastavení parametrů ideálního zdroje s frekvencí je nutné nejprve určit velikost amplitudy fázové hodnoty napětí **Amp**, pro kterou platí:

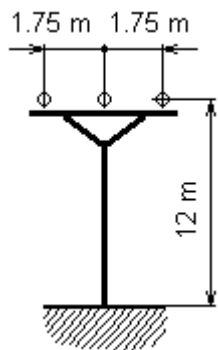
$$U_{\max} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = \frac{110}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 89,815 \text{ kV} \quad (4.10)$$

Vedení je modelováno pomocí procedury Line Constants s uvážením Skin efektu a je nahrazeno frekvenčně nezávislým modelem π s parametry podle Tab. 4.1. Není uvažováno prověšení lana a platí **Vtower = Vmid**.

Tab. 4.1 Parametry přenosového vedení 110 kV, AlFe6 120 mm² o délce 20 km

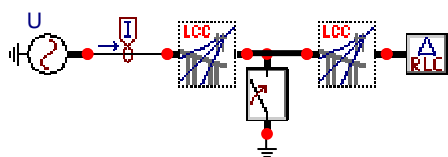
Phase no číslo fáze	Rin (cm) poloměr ocelové duše vodiče	Rout (cm) vnější poloměr vodiče-lana	Resis (Ω/km) odpor vodiče na jeden kilometr délky	Horiz (m) Horizontální vzdálenost lana od středu stožáru	Vtower (m) výška lana nad zemí u stožáru	Vmid (m) výška lana nad zemí v místě největšího prověšení
1	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

Měrná rezistivita země **Rho** 100 Ω·m, frekvence **Freq. Init** 50 Hz a délka poloviny vedení **Length** 10 km. kljkl

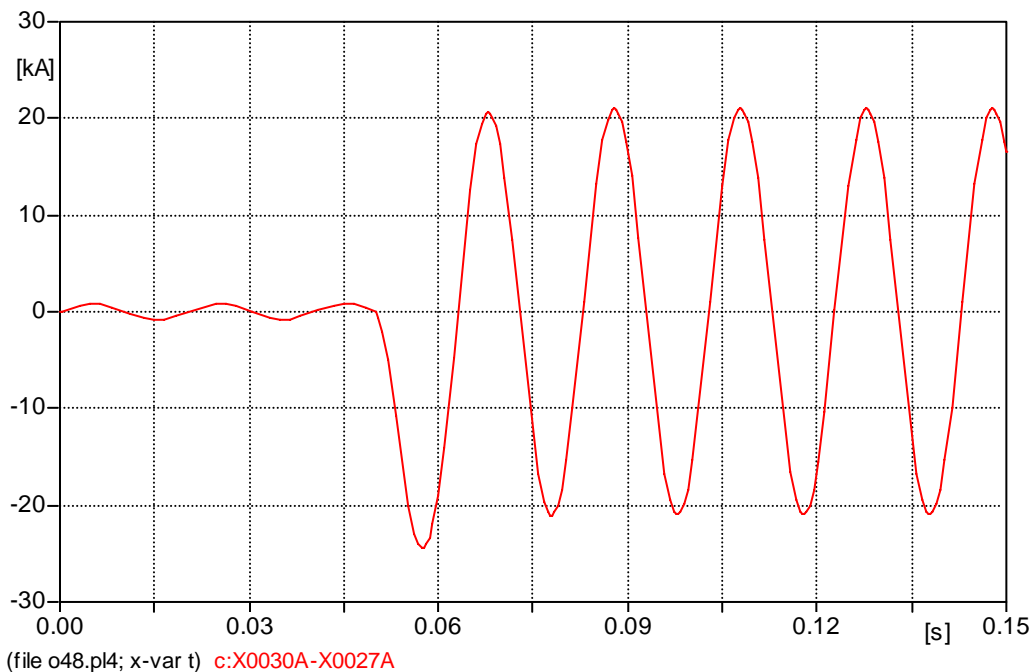


Obr. 4.2 Rozmístění vodičů na stožáru

Zátěž je realizována pomocí 3fázového RLC obvodu v zapojení trojúhelník s parametry $R1 = R2 = R3 = 300 \Omega$ a $L1 = L2 = L3 = 0,1 \text{ mH}$. Průběh proudu je sledován ve větvi fáze A.



Obr. 4.3 Schéma zapojení v AtpDraw pro 3fázový kovový zkrat napájený ideálním zdrojem napětí



Obr. 4.4 Průběh proudu před a po zkratu ve fázi A

Zkrat nastal v čase 50 ms při průchodu proudu ve fázi A nulou a zkratový proud má stejnosměrnou, rychle tlumenou složku. Nárazový zkratový proud činí 24,4 kA.

V případě 3 fázového zkratu se jednalo o tzv. symetrický zkrat. Tento druh zkratu je u venkovních vedení spíše ojedinělý. Častěji dochází k tzv. nesymetrickým zkratům.

Metoda souměrných složek

V 3fázových soustavách lze každou hvězdicí nesymetrických fázorů nahradit složením symetrických fázorů soustavy sousledné, zpětné a netočivé. Pokud je zvolena fáze A jako referenční, platí:

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_1 + U_2 + U_0 \\
 U_B &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0 \\
 U_C &= a U_1 + a^2 U_2 + U_0
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

$$a = e^{j120^\circ}
 \tag{4.12}$$

Po označení:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} \quad \mathbf{U}_F = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{pmatrix}
 \tag{4.13}$$

je možno soustavu přepsat do maticového tvaru:

$$\mathbf{U} = \mathbf{F}\mathbf{U}_F \quad (4.14)$$

kde pro matici \mathbf{F} platí:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Protože determinant matice \mathbf{F} je různý od nuly, je možno provést její inverzi a přejít od fázových hodnot k hodnotám stejnosměrných složek:

$$\mathbf{U}_F = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{U} \quad (4.16)$$

kde pro inverzní matici \mathbf{F}^{-1} platí:

$$\mathbf{F}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

Symetrické články v podmínkách nesymetrického provozního stavu

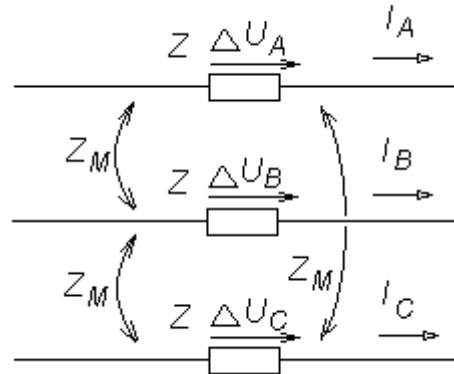
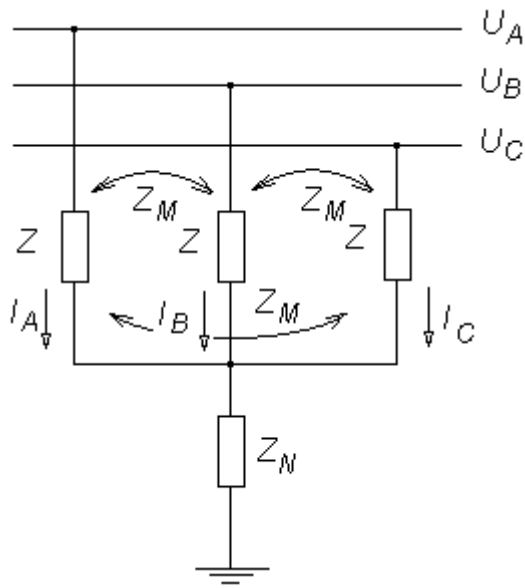
Budou zde uvedeny rozborů nesymetrických provozních stavů s omezením na případy jediné místní nesymetrie, tj. platí předpoklad, že nesymetrie je způsobena jediným nesymetrickým článkem a ostatní články ES jsou symetrické. Síť mezi zdroji a místem nesymetrie je možno vyjádřit kombinací symetrických pasivních článků zapojených podélně a příčně.

Zapojení pro **příčný symetrický článek** odpovídají následující rovnice:

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z}\mathbf{I} + \mathbf{Z}_N\mathbf{I} \quad (4.18)$$

pro jednotlivé matice platí:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z \end{pmatrix} \quad \mathbf{Z}_N = \begin{pmatrix} Z_N & Z_N & Z_N \\ Z_N & Z_N & Z_N \\ Z_N & Z_N & Z_N \end{pmatrix} \quad (4.19)$$



Obr. 4.5a Zapojení příčného symetrického článku Obr. 4.5b Zapojení podélného symetrického článku

Po přechodu k souměrným složkám platí :

$$\mathbf{U}_F = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{F} \mathbf{I}_F + \mathbf{F}^{-1} \mathbf{Z}_N \mathbf{F} \mathbf{I}_F = \mathbf{Z}_P \mathbf{I}_F \quad (4.20)$$

$$\mathbf{I}_F = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} \quad \text{Proudy } I_1, I_2, I_0 \text{ jsou složkové proudy sousledné, zpětné a netočivé.} \quad (4.21)$$

$$\mathbf{Z}_P = \begin{pmatrix} Z - Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z + 2Z_M + 3Z_N \end{pmatrix} \quad \mathbf{Z}_P \text{ je matice složkových impedancí příčného článku.} \quad (4.22)$$

Zapojení pro **podélný symetrický článek** odpovídají následující rovnice:

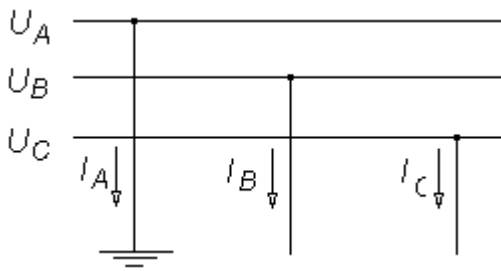
$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{Z} \mathbf{I} \quad (4.23)$$

odtud pro souměrné složky:

$$\Delta \mathbf{U}_F = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{F} \mathbf{I}_F = \mathbf{Z}_s \mathbf{I}_F \quad (4.24)$$

$$\mathbf{Z}_s = \begin{pmatrix} Z - Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z + 2Z_M \end{pmatrix} \quad \mathbf{Z}_s \text{ je matice složkových impedancí podélného článku} \quad (4.25)$$

4.2.2 Jednofázový zkrat



Obr. 4.6 Schématické znázornění jednofázového zkratu

Jedná se o nesymetrii příčnou a z výše uvedeného obrázku je zřejmé, že platí:

$$U_A = I_B = I_C = 0 \quad (4.26)$$

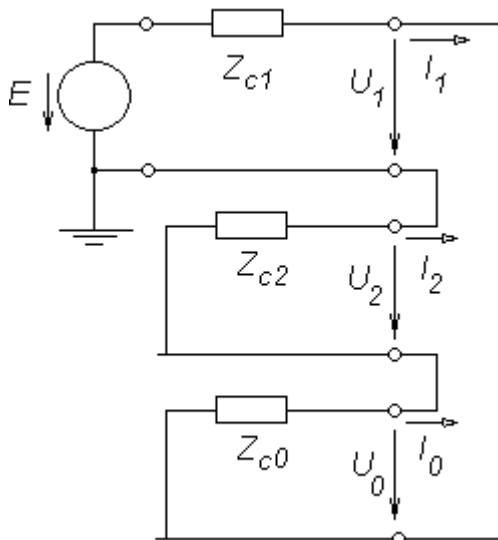
Přechodem ke složkovým veličinám platí pro složkové proudy rovnice:

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{I} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} I_A \\ I_A \\ I_A \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

Z rovnice plyne:

$$I_1 = I_2 = I_0 = 1/3 I_A \quad (4.28)$$

Je možno sestavit náhradní složkové schéma:



Obr. 4.7 Náhradní složkové schéma pro jednofázový zkrat

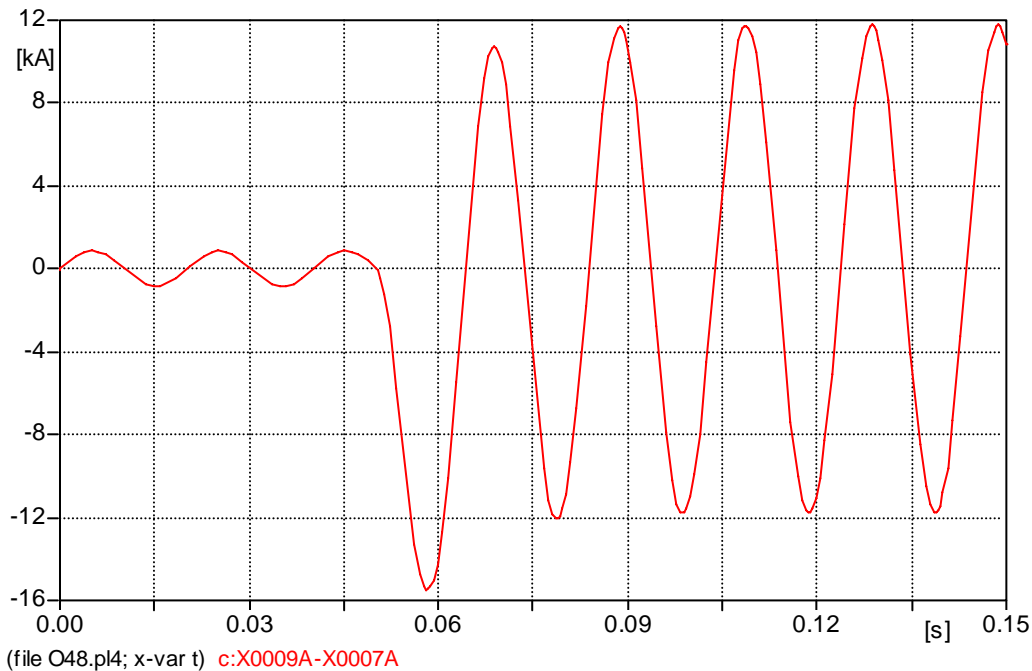
Pro složková napětí platí:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= (Z_{c2} + Z_{c0})I_1 \\
 U_2 &= -Z_{c2}I_1 \\
 U_0 &= -Z_{c0}I_1
 \end{aligned}
 \tag{4.29}$$

Z_{c1} , Z_{c2} , Z_{c0} jsou celkové impedance složkové soustavy sousledné, zpětné a netočivé.

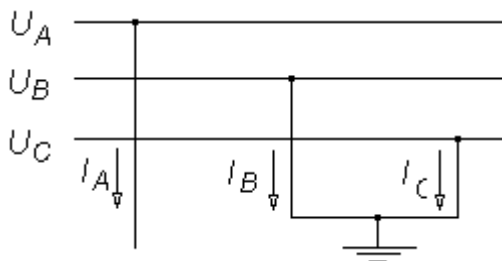
Řešení programem ATP

K řešení je použit obvod z předchozího příkladu (viz. Obr. 4.3), kde je v čase 50 ms spojena fáze A se zemí.



Obr. 4.8 Průběh proudu před a po 1fázovém zkratu ve fázi A

4.2.3 Dvoufázový zemní zkrat



Obr. 4.9 Schématické znázornění 2fázového zemního zkratu

Z výše uvedeného obrázku je zřejmé, že platí:

$$I_A = U_B = U_C = 0 \tag{4.30}$$

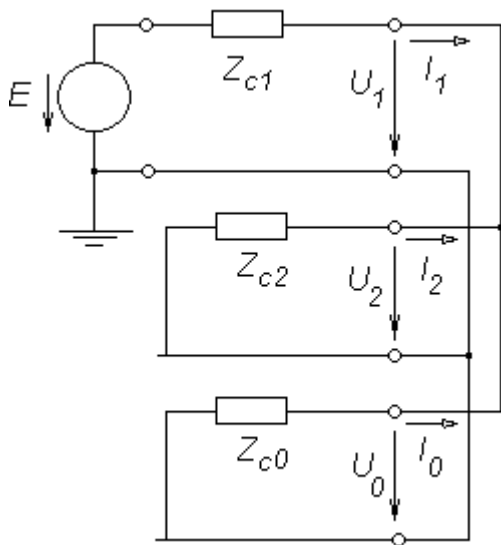
Přechodem ke složkovým veličinám platí pro složkové napětí rovnice:

$$\mathbf{U}_F = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{U} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} U_A \\ U_A \\ U_A \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

Z rovnice plyne:

$$U_1 = U_2 = U_0 = 1/3 U_A \quad (4.32)$$

Je možno sestavit náhradní složkové schéma:



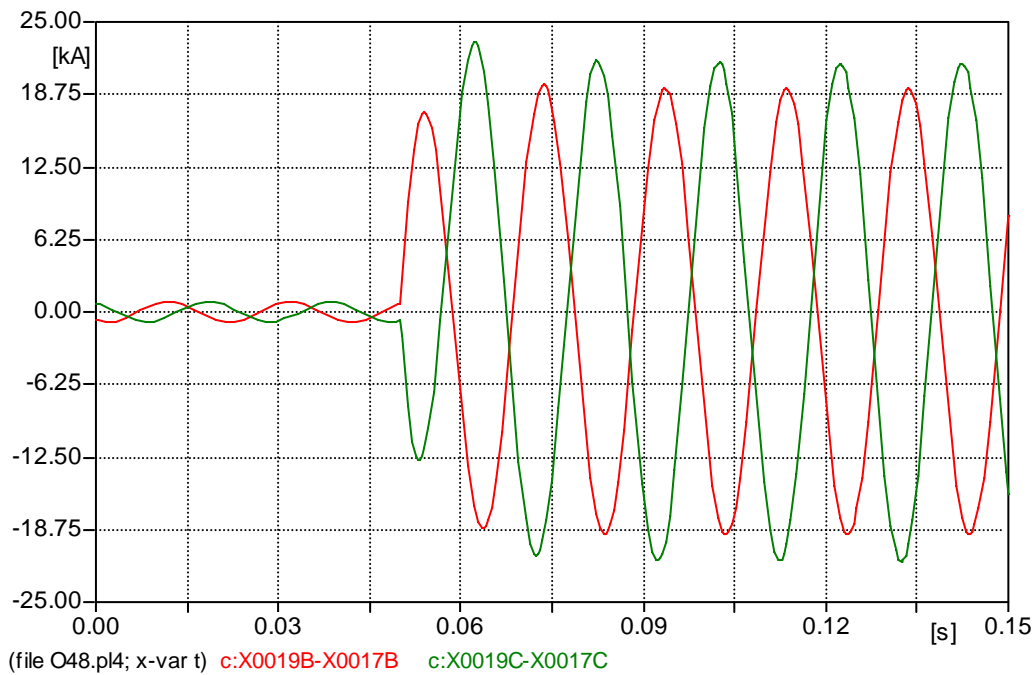
Obr. 4.10 Náhradní složkové schéma pro 2fázový zemní zkrat

Pro složkové proudy lze pomocí vzorců pro proudový dělič určit:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E}{Z_{c1} + \frac{Z_{c2}Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}}} \\ I_2 &= -\frac{Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}} I_1 \\ I_0 &= -\frac{Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c0}} I_1 \end{aligned} \quad (4.33)$$

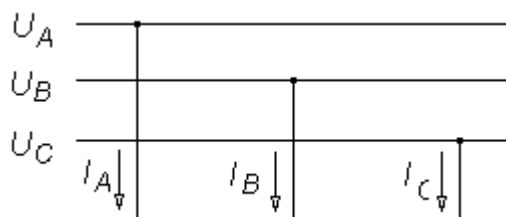
Řešení programem ATP

K řešení je použit obvod z předchozího příkladu (viz. Obr. 4.3), kde je v čase 50 ms v souladu s Obr. 4.9 spojena fáze B a fáze C se zemí.



Obr. 4.11 Průběh proudu před a po 2fázovém zemním zkratu ve fázi B a C

4.2.4 Dvoufázový zkrat



Obr. 4.12 Schématické znázornění 2fázového zkratu

Z výše uvedeného obrázku je zřejmé, že platí:

$$I_A = 0 \quad U_B = U_C \quad I_B = -I_C \quad (4.34)$$

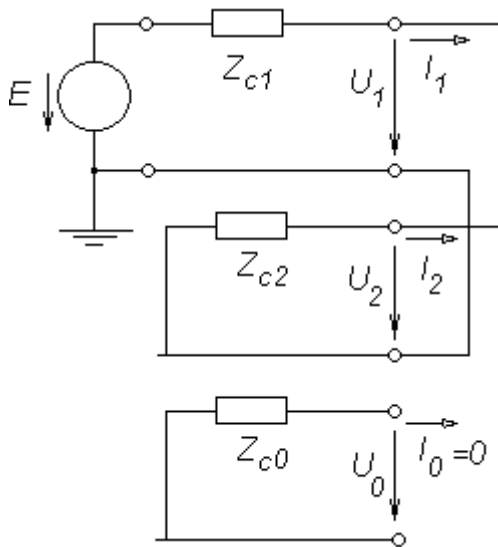
Přechodem ke složkovým veličinám platí pro složkové proudy rovnice:

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{I} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} j\sqrt{3}I_B \\ -j\sqrt{3}I_B \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

Z rovnice plyne:

$$I_1 = -I_2 \quad I_0 = 0 \quad (4.36)$$

Je možno sestavit náhradní složkové schéma:



Obr. 4.13 Náhradní složkové schéma pro 2fázový zkrat

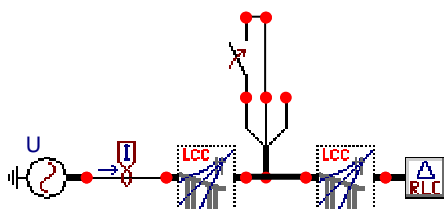
Pro složkové veličiny je možno na základě náhradního schématu na Obr. 4.13 psát:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{c1} + Z_{c2}} \quad I_2 = -I_1 \quad I_0 = 0 \quad (4.37)$$

$$U_1 = U_2 = -Z_{c2}I_2 = Z_{c2}I_1 \quad U_0 = 0 \quad (4.38)$$

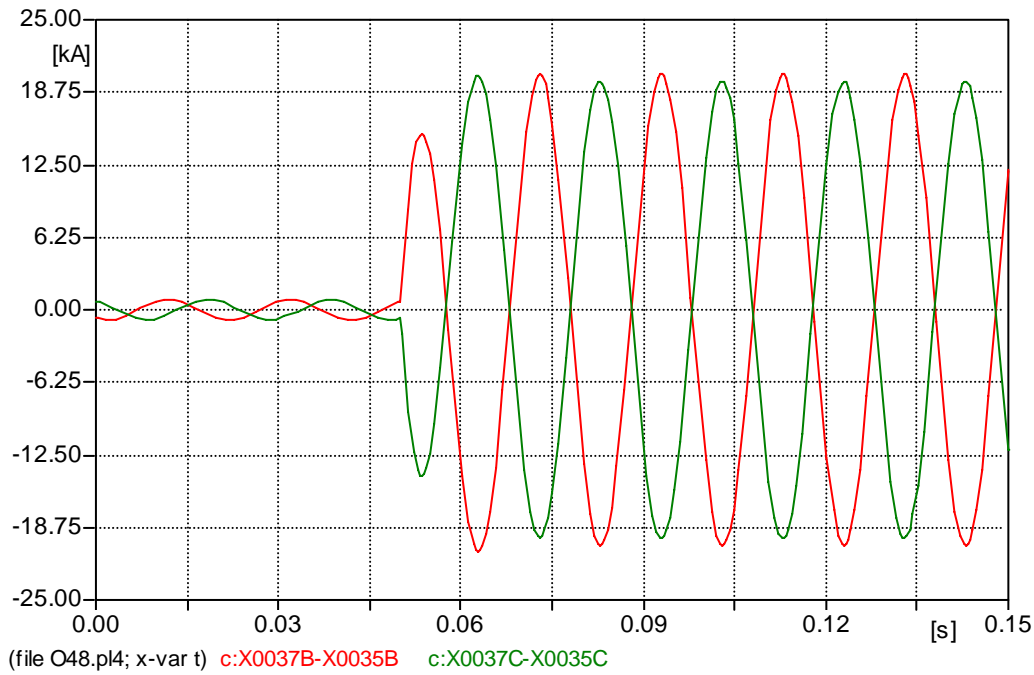
Řešení programem ATP

K řešení je použit obvod z předchozího příkladu (viz. Obr. 4.3), jiné je pouze umístění spínače. V čase 50 ms v souladu s Obr. 4.12 jsou vzájemně spojeny fáze B a fáze C.



Obr. 4.14 Obvod 2fázového zkratu

Mnohdy je účelné znát poměr velikostí zkratových proudů v jednom místě soustavy při různých druzích zkratů. V níže uvedených vzorcích je provedeno porovnání hodnot počátečních rázových proudů nesymetrických zkratů s proudem 3fázového symetrického zkratu. Porovnání budou provedena pro okamžik $t = 0$. Při orientačních výpočtech mohou být zanedbány rezistence a je možno předpokládat symetrické celkové reaktance $x_{c2} = x_{c1}$.



Obr. 4.15 Průběh proudu před a po 2fázovém zkratu ve fázi B a C

Trojfázový zkrat

$$I_{k0}^{(3)} = I_1 = \frac{E''}{X_{c1}} \quad (4.39)$$

Jednofázový zkrat

$$I_{k0}^{(1)} = 3I_1 = \frac{E''}{2X_{c1} + X_{c0}} = \frac{3}{2 + \frac{X_{c0}}{X_{c1}}} I_{k0}^{(3)} \quad (4.40)$$

Dvoufázový zemní zkrat

Při hodnotách (x_{c0}/x_{c1}) blízkých nule platí:

$$I_{k0}^{(2,N)} = \sqrt{3} I_{k0}^{(3)} \quad (4.41)$$

Při hodnotách (x_{c0}/x_{c1}) blízkých nekonečnu platí:

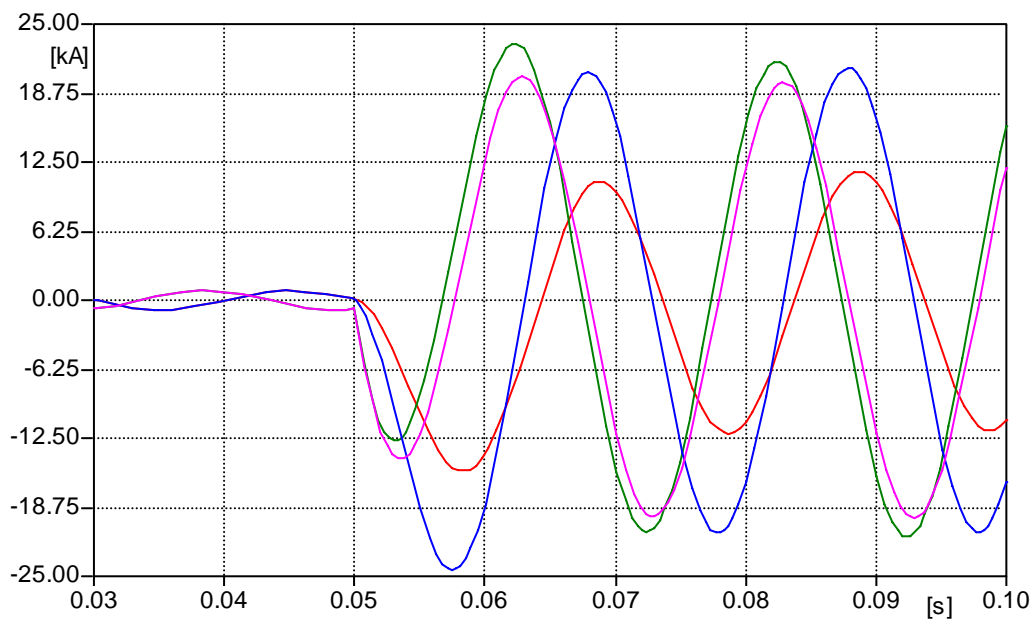
$$I_{k0}^{(2,N)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k0}^{(3)} \quad (4.42)$$

Poměr reaktancí x_{c0}/x_{c1} se může měnit od 0 až do nekonečna, proto může zkratový proud nabývat hodnot:

$$I_{k0}^{(1)} = (0 \div 1,5) I_{k0}^{(3)} \quad (4.43)$$

Dvoufázový zkrat

$$I_{k0}^{(2)} = \sqrt{3} I_1 = \frac{E''}{2X_{c1} + X_{c0}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k0}^{(3)} \quad (4.44)$$



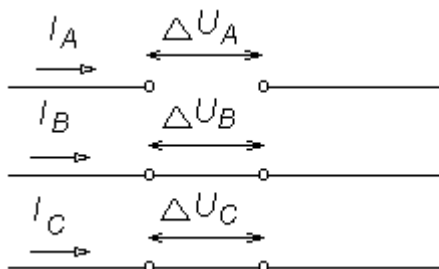
(file o48.pl4; x-var t) c:X0009A-X0007A c:X0019C-X0017C c:X0030A-X0027A
c:X0037C-X0035C

X0009A-X0007A 1fázový zkrat, X0019C-X0017C 2fázový zemní zkrat, X0037C-X0035C 2fázový zkrat,
X0030A-X0027A 3fázový zkrat.

Obr. 4.16 Srovnání průběhů proudů při různých druzích zkratů

4.2.5 Přerušení jedné fáze

Přerušení jedné fáze lze chápat jako zapojení nesymetrického podélného článku (viz. Obr. 4.5b) v místě poruchy, charakterizovaného úbytky napětí v jednotlivých fázích.



Obr. 4.17 Schématické znázornění přerušení jedné fáze

Podle Obr. 4.17 je možno psát:

$$I_A = 0 \quad \Delta U_B = \Delta U_C \quad (4.45)$$

Po porovnání rovnic pro 2fázový zemní zkrat je zřejmá shoda, proto bude i podobný postup při odvození výsledných vztahů pro složkové napětí a proudy:

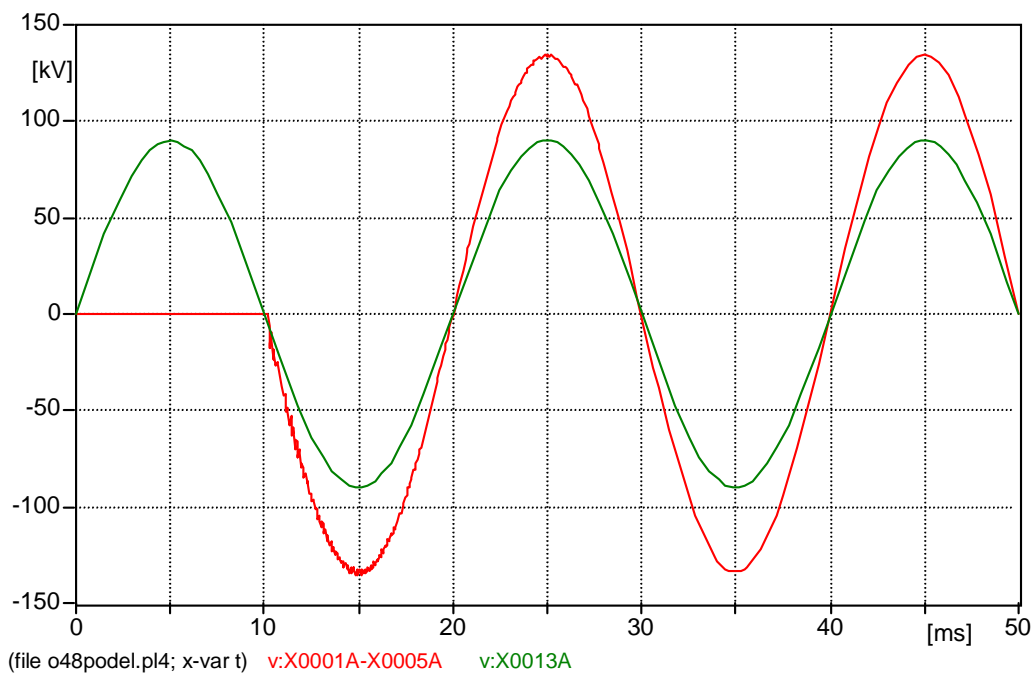
$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_0 = 1/3 \Delta U_A \quad (4.46)$$

$$I_1 = \frac{E}{Z_{c1} + \frac{Z_{c2}Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}}}$$

$$I_2 = -\frac{Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}} I_1 \quad (4.47)$$

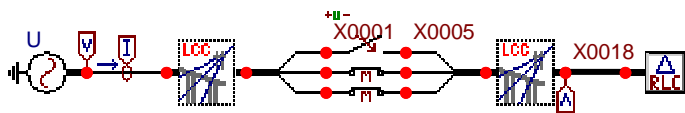
$$I_0 = -\frac{Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c0}} I_1$$

Řešení programem ATP

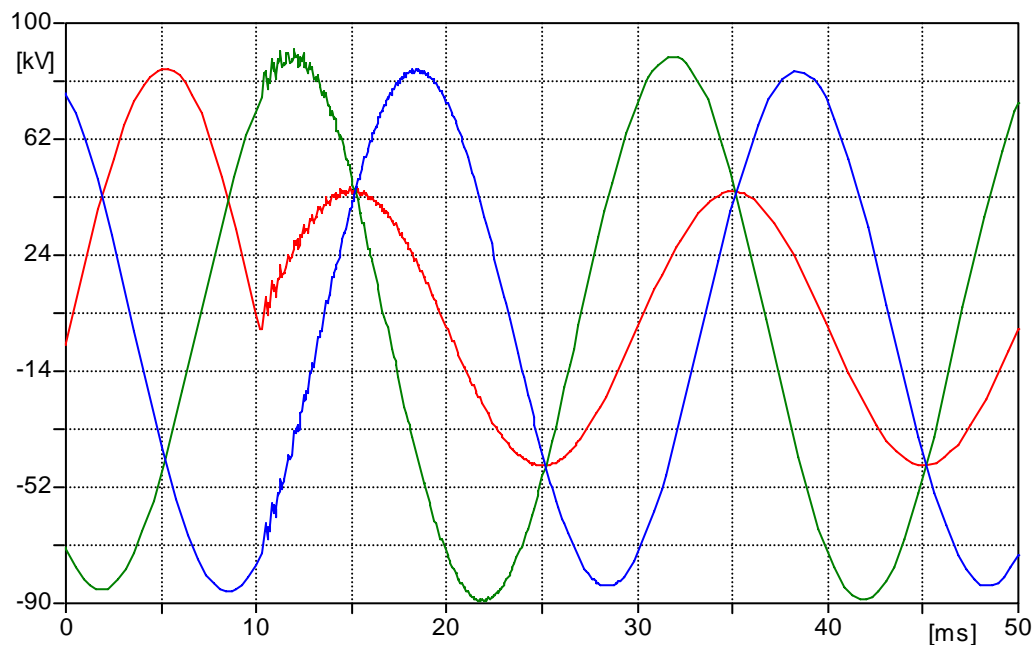


Obr. 4.18 Časová závislost zotaveného napětí v místě přerušení a napětí zdroje

K řešení je opět jako v předchozích případech využito parametrů vedení obvodu na Obr. 4.3. V čase 10 ms je přerušena fáze A (Viz. Obr. 4.19. Je snímán průběh zotaveného napětí v místě přerušení (XX0001A-XX0005A), proudy procházející obvodem (XX0013-XX0011), napětí na zátěži (XX0018A-C) a napětí zdroje (XX0013A).

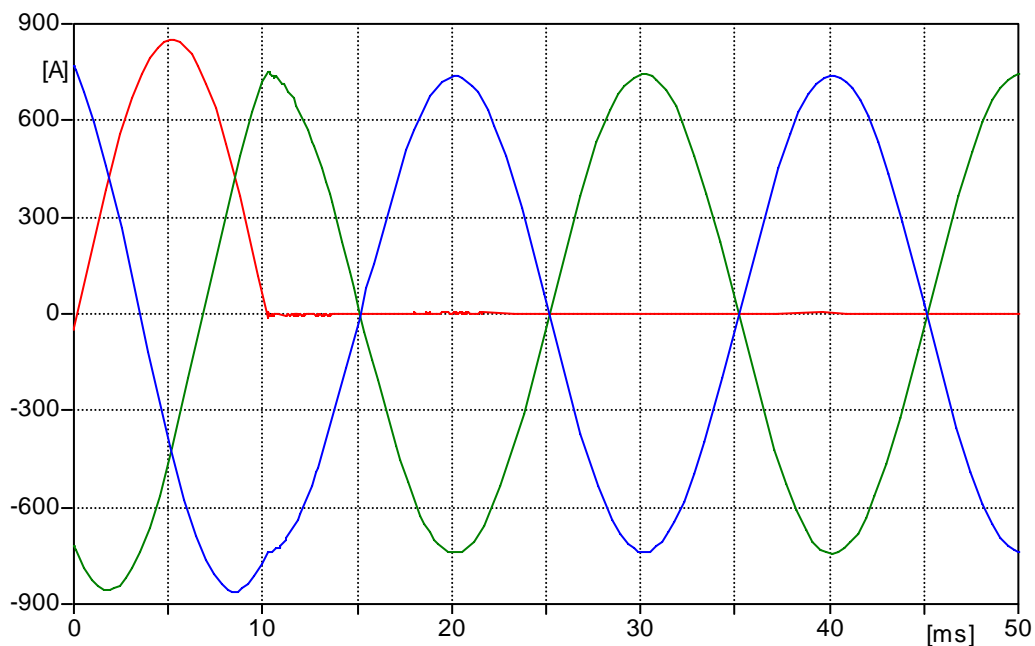


Obr. 4.19 Obvod přerušení jedné fáze



(file o48podel.pl4; x-var t) v:X0018A v:X0018B v:X0018C

Obr. 4.20 Časová závislost napětí na zátěži při přerušení fáze A



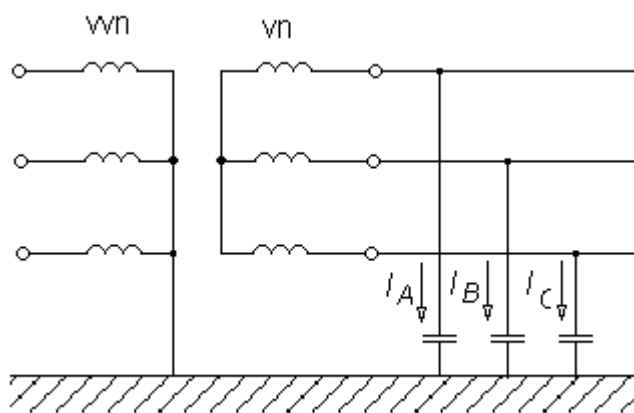
(file o48podel.pl4; x-var t) c:X0013A-X0011A c:X0013B-X0011B c:X0013C-X0011C

Obr. 4.21 Časová závislost proudů při přerušení fáze A

4.2.6 Zemní spojení

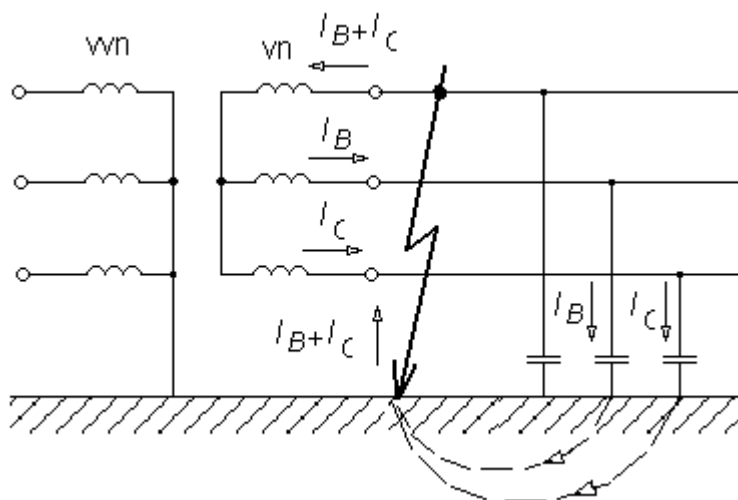
V kapitole 4.2.2 bylo vodivé spojení jedné fáze se zemí nazýváno jednofázový zkrat, ovšem za předpokladu, že k takovému vodivému spojení došlo v sítích provozovaných s přímo uzemněným uzlem. V sítích provozovaných s izolovaným uzlem, popřípadě v sítích kompenzovaných tj. v sítích, jejichž uzel je spojen se zemí přes zhašecí tlumivku nebo u nichž je vytvořen umělý bod pomocí zhašecích transformátorů, může vzniknout **zemní spojení**. Při 1fázovém zkratu je zkratový proud několikanásobně větší než provozní (nebo je blízký provoznímu), dále má induktivní charakter, kdežto v místě zemního spojení prochází pouze malý proud kapacitního charakteru a je nezávislý na vzdálenosti od zdroje.

V izolovaných sítích v ustáleném provozním stavu procházejí kapacitami k zemi kapacitní proudy, jejichž součet při symetrické síti a symetrickém napětí je roven nule (viz. Obr. 4.22).



Obr. 4.22 Schématické znázornění sítě s izolovanou nulou

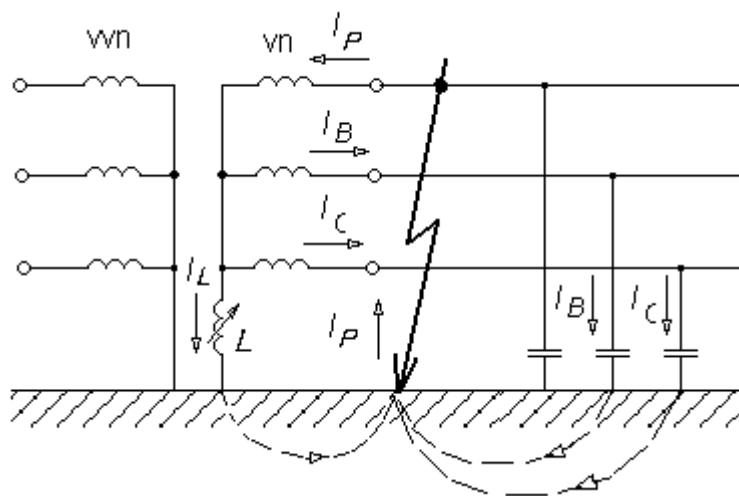
V případě, že dojde v takovéto síti ke spojení některé fáze se zemí, uzavírají se kapacitní proudy zdravých fází přes zem, zemní spojení a vinutí transformátoru. Zemí procházejí proudy, které při rozsáhlejších sítích mohou dosahovat značných velikostí.



Obr. 4.23 Schématické znázornění sítě s izolovanou nulou při zemním spojení

Pokud poruchový proud nepřekročí stanovenou hodnotu, může být síť s izolovaným uzlem ponechána v provozu. Komplikace nastávají při zemním spojení, kdy elektrický oblouk hoří nestabilně, tj. dochází k jeho uhasnutí a opětovnému zapalování (vznikne tzv. přerušované zemní spojení). V těchto případech může být přerušované zemní spojení zdrojem nebezpečných přepětí v síti. V sítích s větší rozlohou, kde poruchový zemní proud přesáhne hodnotu asi 5 A vzniká při zemních spojeních zpravidla oblouk, který se rozroste do značných délek. Bývá velice pohyblivý a téměř vždy zasáhne sousední fáze. Důsledkem toho jsou pak 2nebo 3fázové zkraty. Hořící obloukové zemní spojení přepaluje vodiče a dřevěné stožáry, ničí izolátory.

Účinným prostředkem pro potlačení oblouku v místě zemního spojení je uzemnění nuly transformátoru přes tlumivku, jejíž indukčnost se dá nastavit tak, aby indukční proud jdoucí od ní k místu zemního spojení zde kompenzoval kapacitní proudy zdravých fází a aby tak došlo k uhašení oblouku.



Obr. 4.24 Schématické znázornění vlivu zhašecí tlumivky

Výpočet trvalého zemního spojení

Výpočty zemního spojení se často provádějí ve fázových hodnotách. Jelikož kapacitní reaktance elektrického vedení jsou značně větší než rezistance a indukční reaktance článků, lze tyto rezistance a reaktance zanedbat.

Pro řešení zemního spojení z Obr. 4.24, kde je uvažováno zemní spojení v síti s uzlem transformátoru uzemněným přes zhašecí tlumivku, vychází hodnota poruchového proudu, který protéká zemí:

$$I_p = \frac{X_C - 3X_L}{X_L X_C} E \quad (4.48)$$

Pro nulovou hodnotu poruchového proudu je potřebná velikost indukčnosti tlumivky dána vztahem:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad (4.49)$$

kde C je fázová kapacita izolované sítě.

Řešení programem ATP

Obvod bude sestaven nejprve v souladu s Obr. 4.23, tedy bez použití tlumivky. Ideální zdroj napětí napájí transformátor 110/22 kV. Na sekundární stranu transformátoru je připojeno vedení 22 kV. K zemnímu spojení dojde na konci vedení v čase 3 ms.

Pro nastavení parametrů ideálního zdroje s frekvencí je nutné nejprve určit velikost amplitudy fázové hodnoty napětí **Amp**, která se určila na základě předchozího vztahu (4.10) a jejíž hodnota činí: **Amp** = 89,815 kV.

Byl použit transformátor 110/22 kV, 40 MVA o těchto parametrech: $S_n = 40$ MVA, $u_k = 11,5\%$, $\Delta P_k = 205$ kW, $i_0 = 0,4\%$, $\Delta P_0 = 40$ kW v zapojení Dy. Model transformátoru byl na základě těchto parametrů vygenerován pomocí procedury BCTRAN.

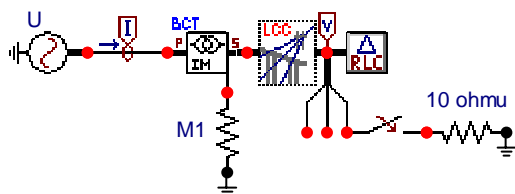
Zátěž je realizována pomocí 3fázového RLC obvodu v zapojení trojúhelník s parametry $R1 = R2 = R3 = 600 \Omega$. Odpor místa zemního spojení má hodnotu 10Ω .

Vedení 22 kV je při řešení zemního spojení modelováno pomocí procedury Line/Cable Constants ekvivalentním π -článkem s uvážením **Skin** efektu s parametry podle Tab. 4.2. Stejně jako v předchozích případech není uvažováno prověšení lana a je zadáno **Vtower** = **Vmid**. Měrná rezistivita země **Rho** je volena $100 \Omega\cdot\text{m}$, frekvence **Freq. Init** 50 Hz a délka vedení **Length** je 100 km.

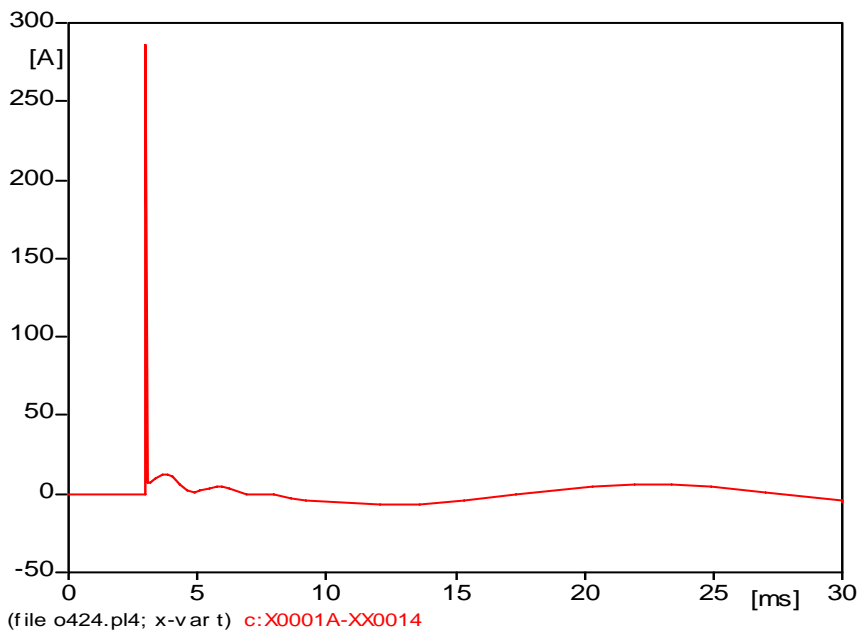
Po vygenerování modelu vedení (**Run ATP**) a uložení (**Save as**) je možno přistoupit k sestavení celkového schématu obvodu podle Obr 4.25.

Tab. 4.2 Parametry vedení 22 kV, AlFe6 95 mm² o délce 100 km

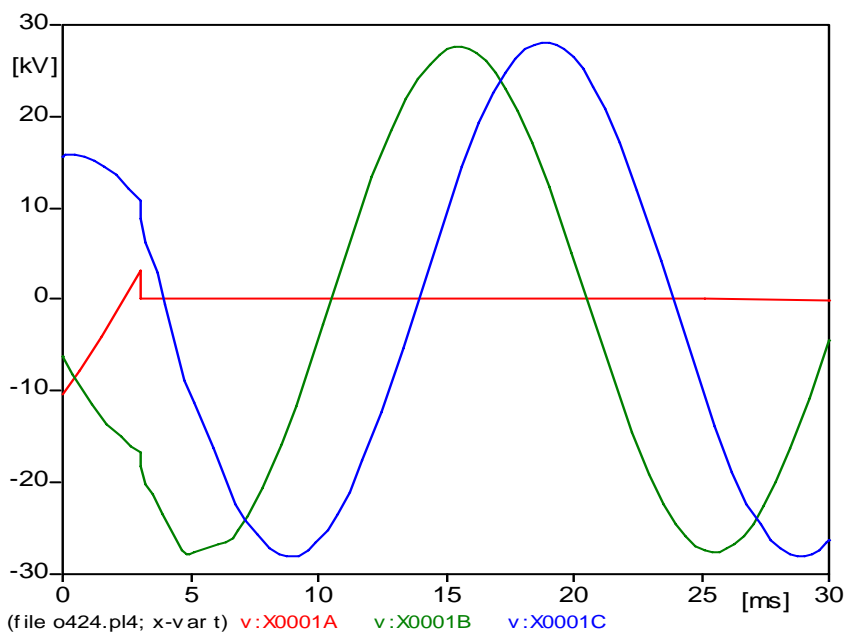
Phase no číslo fáze	Rin (cm) poloměr ocelové duše vodiče	Rout (cm) vnější poloměr vodiče-lana	Resis (Ω/km) odpor vodiče na jeden kilometr délky	Horiz (m) Horizontální vzdálenost lana od středu stožáru	Vtower (m) výška lana nad zemí u stožáru	Vmid (m) výška lana nad zemí v místě největšího prověšení
1	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



Obr. 4.25 Obvod sítě s izolovanou nulou při zemním spojení



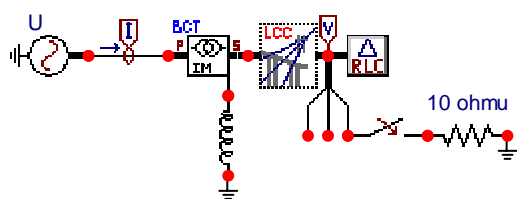
Obr. 4.26 Průběh nekompenzovaného poruchového proudu při zemním spojení



Obr. 4.27 Průběh napětí v místě zemního spojení

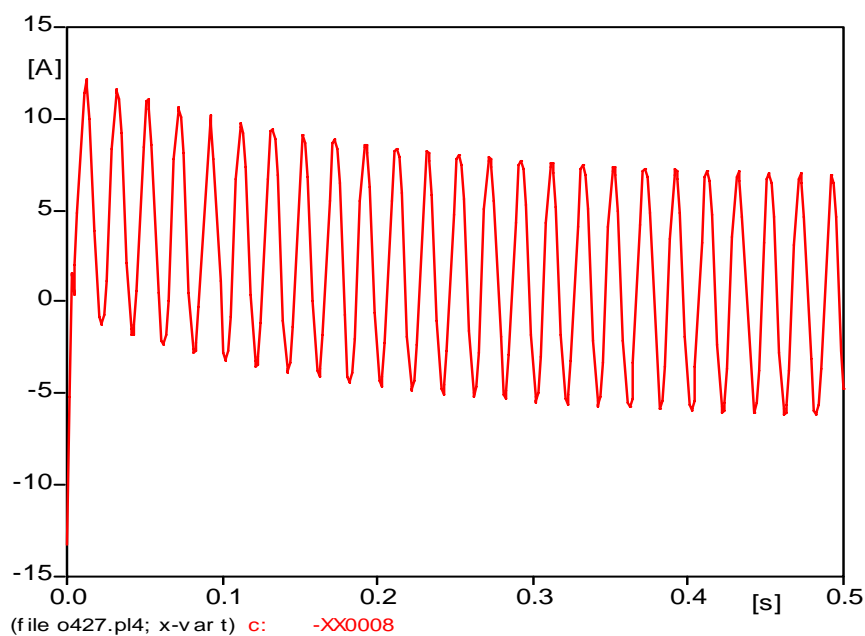
Indukčnost kompenzační tlumivky se určí z amplitudy poruchového proudu $I = 6,7$ odečtené v Obr. 4.26 a z amplitudy napětí $U = 27,6$ odečtené v Obr. 4.27 vztahem:

$$L = \frac{U}{\sqrt{3}I\omega} = \frac{27,6}{\sqrt{3} \cdot 6,7 \cdot 314} = 7,57 \text{ H}$$



Obr. 4.28 Obvod zemního spojení s použitím zhášecí tlumivky

Následným doladěním tlumivky lze dosáhnout prakticky nulové hodnoty poruchového proudu, který měl v tomto případě amplitudu menší než jeden ampér. Tlumivkou přitom protéká střídavý proud s přechodnou stejnosměrnou složkou.



Obr. 4.29 Výsledný průběh proudu kompenzační tlumivkou