

## Vícenásobné nesymetrické poruchy

Pro obvod na obrázku nastanou současně poruchy:

#1 ideální jednopólový zkrat ve fázi A v uzlu 2

#2 ideální jednopólový zkrat ve fázi B v uzlu 3

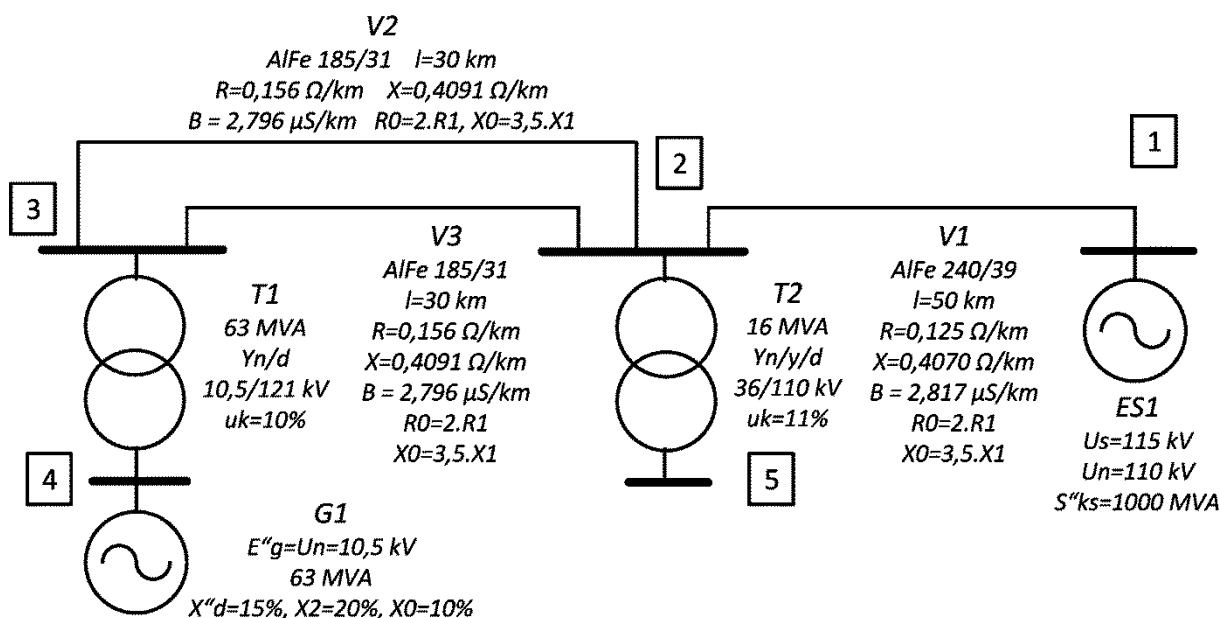
- stanovte poruchové matice  $[Z_{1P}]$ ,  $[Z_{2P}]$  a  $[Z_{0P}]$  a vysvětlete jejich význam
- spočítejte fázory napětí ve fázích A, B, a C v uzlu 2 a 3
- úlohu řešte pomocí řetězení poruch (nejprve poruchu č. #1 a poté poruchu č. #2 s dodatky z předchozího výpočtu) a zkontrolujte výsledky s b)
- modifikujte program solvp.m tak, aby počítal zkraty s vloženou impedancí a vyřešte stejnou úlohu pro zkratové impedance  $Z_{f\#1} = Z_{f\#2} = 0 + j.20 \text{ Ohm}$

Dále vyřešte znovu pro tento obvod jedinou poruchu:

#3 ideální jednopólový zkrat ve fázi C v uzlu 4

- spočítejte fázory napětí ve fázích A, B, a C v uzlu 4 (uzel stroje uzemněn)
- modifikujte zadání úlohy tak, aby došlo k „zemnímu spojení“ a spočítejte napětí jako v e) (uzel stroje neuzemněn)

Řešte v *poměrných* veličinách, transformátor T2 uvažujte pro zjednodušení jako Ynd



# Návod

## I. VOLBA DAT POPISUJÍCÍCH ELEKTRICKOU SÍŤ A PORUCHY

Data popisující elektrickou síť jsou obdobná jako v případě symetrického trojfázového obvodu. Rozdíl je v tom, že musíme takto popsat tři nezávislé složkové obvody se stejnou topologií. Proto data spojená s uzly obsažená v souboru **uzel.dat** vypadají následovně:

```
% poradove    vztazne    proud                uzlova admittance
% cislo       napeti     IR    II        YR1    YI1    YR2    YI2    YR0    YI0
%-----
%              ..        ..        ..        ..        ..        ..        ..        ..        ..        ..
```

Tj. číslo uzlu, vztahné napětí [kV] (výpočet je v poměrných jednotkách), uzlový proud [kA] a uzlová admittance sousledná, zpětná a netočivá [S].

Data spojená s větvemi jsou zapsány v souboru **vetev.dat** následovně:

```
% poradove  spojene uzly   sousl. a zp. impedance  netoc. impedance  převod
% cislo     ZU      KU      R1      X1      B1      R0      X0      B0      TR      TI
%-----
%              ..        ..        ..        ..        ..        ..        ..        ..        ..        ..
```

Tj. číslo větve, ZU – počáteční uzel ( $k$ ), KU – konečný uzel ( $m$ ), podélný odpor a reaktance v sousledné a zpětné soustavě [ $\Omega$ ], kapacitní svod v sousledné a zpětné soustavě [větš. v  $\mu\text{S}$ ], podélný odpor a reaktance v netočivé soustavě [ $\Omega$ ], kapacitní svod v netočivé soustavě [větš. v  $\mu\text{S}$ ], poměrný komplexní převod transformátoru [-].

Data spojená s poruchami jsou zapsány v souboru **scenar.dat** následovně:

```
% poradove          faze          1. uzel    2. uzel    poruchova impedance
% cislo            1-a, 2-b, 3-c    brany      brany      R          X
%-----
%              ..              ..              ..              ..              ..              ..
```

Tj. číslo poruchy, fáze, počáteční uzel brány poruchy ( $k$ ), konečný uzel brány poruchy ( $l$ , poz. Jestliže  $l = 0$ , pak je druhý uzel zem), poruchová impedance vložená mezi tyto uzly.

## II. TVORBA SCHÉMATU SOUSLEDNÉ A ZPĚTNÉ SLOŽKOVÉ SOUSTAVY

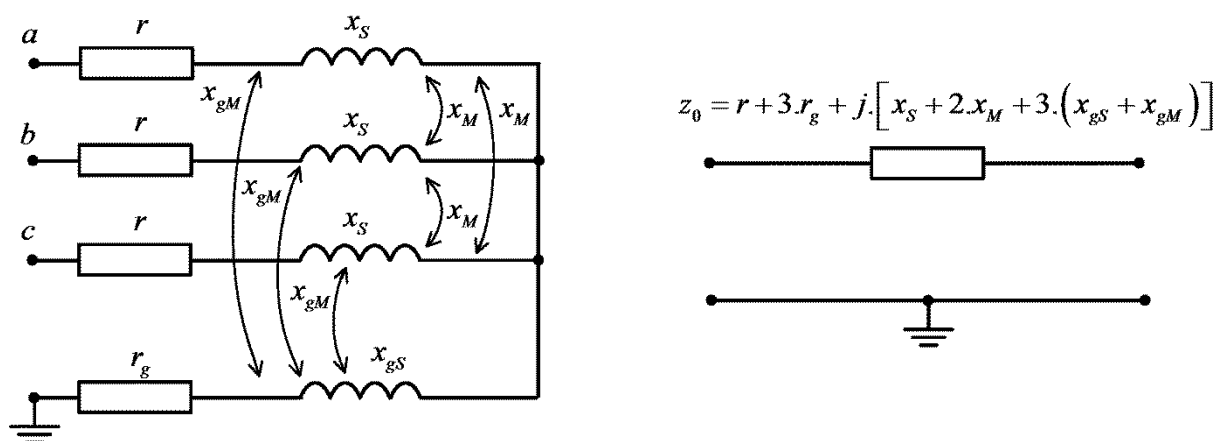
Tvorba obou složkových schémat je obdobná jako v předchozím případě (pro trojfázovou síť bez nesymetrií). Protože se u obou složek uzavírají proudy v uzlu, **obě složková schémata jsou na způsobu uzemnění uzlu a impedanci zemní cesty nezávislá.**

Schéma zpětné složkové soustavy se liší většinou jinou **zpětnou impedancí synchronních generátorů** a u komplexního převodu transformátoru tím, že **převod je ve zpětné soustavě komplexně sdružený k převodu v sousledné soustavě.**

## III. TVORBA SCHÉMATU NETOČIVÉ SLOŽKOVÉ SOUSTAVY

Schéma netočivé soustavy se od obou předchozích zásadně liší, protože je třeba uvažovat zpětnou cestu fázových proudů až k referenční zemi (místě, kde netočivou impedanci měříme).

Pro vedení a kabely je výchozí i netočivé schéma zobrazeno na následujícím obrázku.



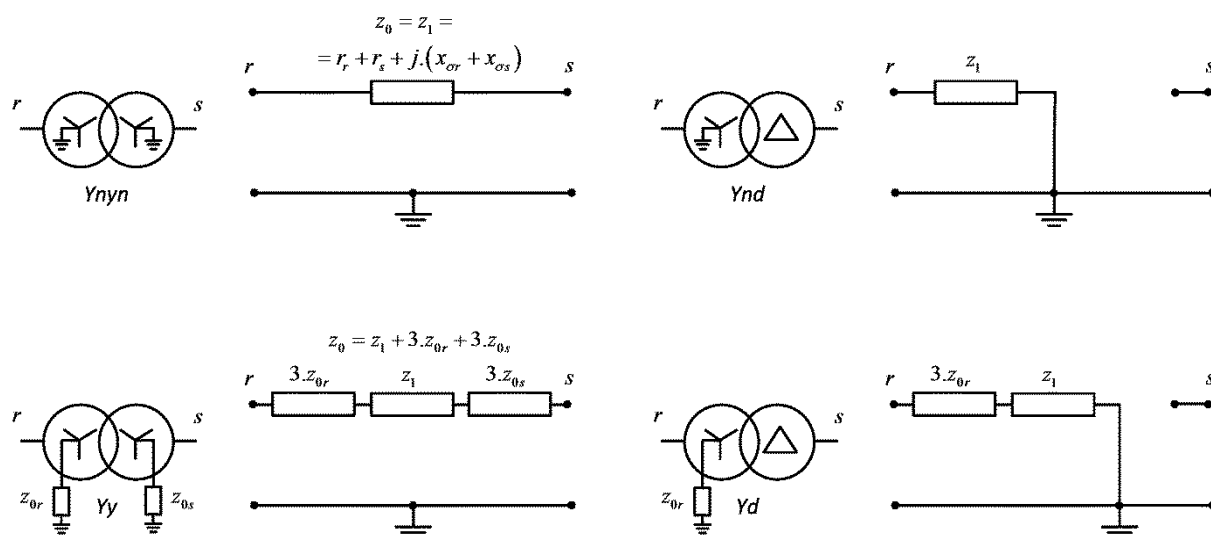
U impedance zpětné cesty se uplatňuje zejména vliv následujících faktorů:

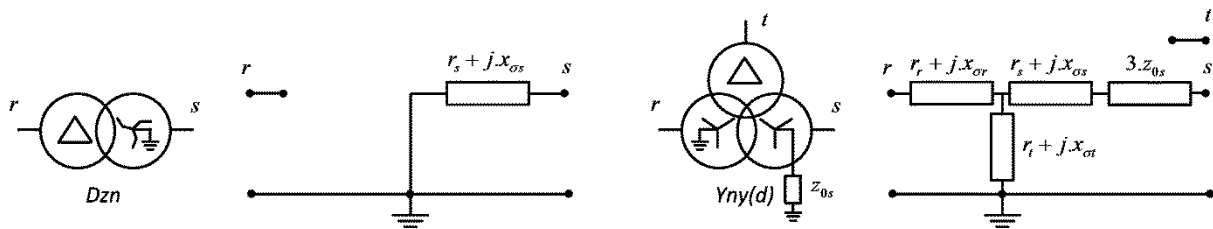
- vedení proudu zemí (Rudenberg)
- vedení proudu zemními lany
- vedení proudu stíněním kabelů
- vedení proudu vyrovnávacími vodiči u kabelů

Určení netočivé impedance vedení i kabelů výpočtem je proto značně obtížné, protože obvykle neznáme přesně vodivost půdy po celé délce vedení (jde i o nehomogenitu vodivosti do hloubky, náhodné vodiče pod vedením atd.). Proto často vycházíme z měření. Pro typická vedení vvn a zvn většinou platí:

$$r_0 \approx 2.r_1 \text{ a } x_0 \approx 3,5.x_1$$

U transformátorů je netočivé schéma závislé na jejich zapojení a na způsobu uzemnění uzlu. Na následujícím obrázku je přehled nejběžnějších zapojení:

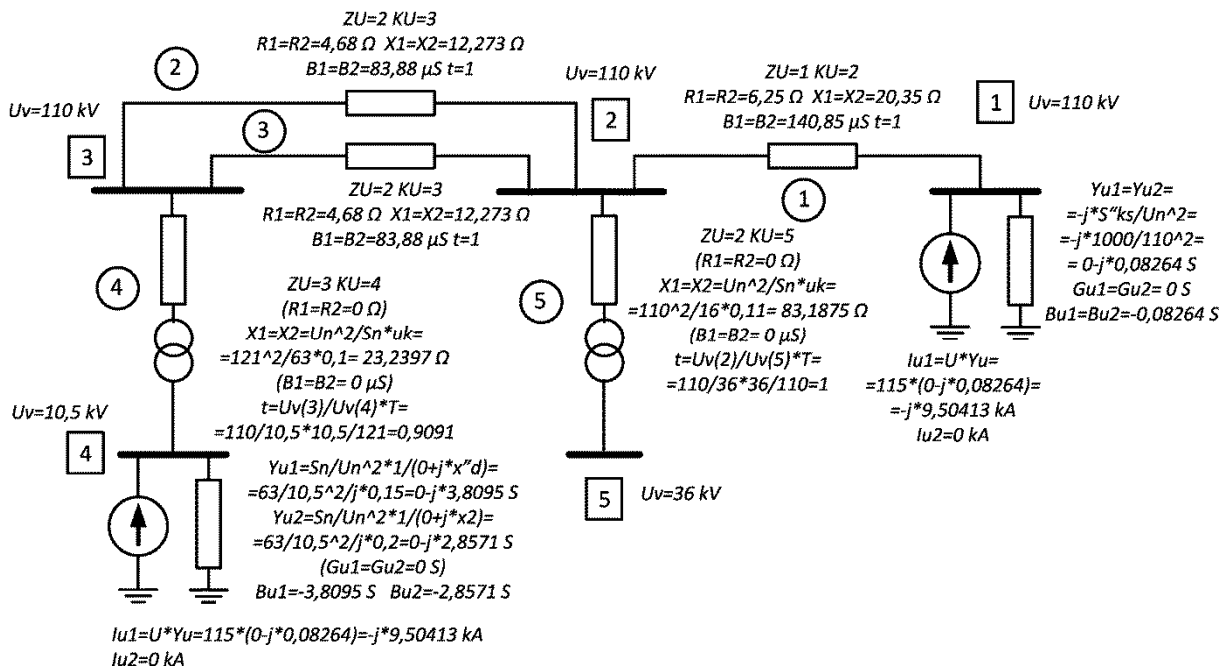




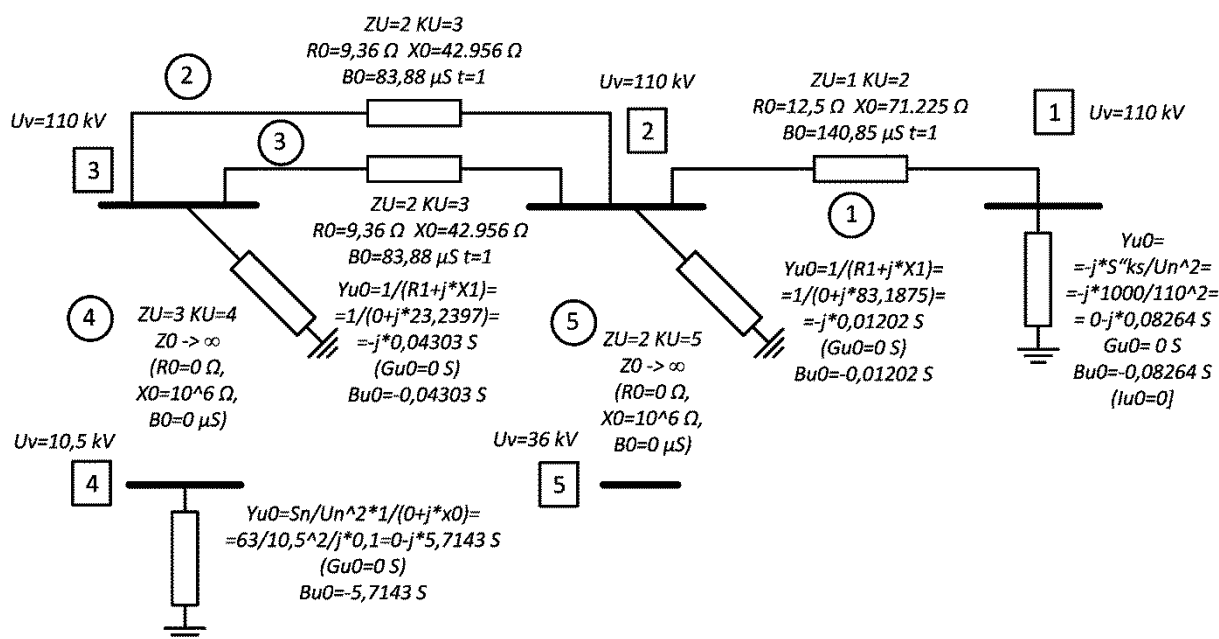
Poslední obrázek představuje netočivé schéma trojvinutového transformátoru používaného v distribučních soustavách (např. 110/22 kV nebo 110/35 kV). Terciár většinou nebývá vůbec vyveden a slouží jako tzv. symetrizační člen. Docílí se tak výrazné snížení prostupu netočivé složky. U soustav s vysokoimpedančním uzemněním uzlu se tak chová podobně jako Ynd.

#### IV. ZPRACOVÁNÍ PRVKŮ SCHÉMATU

Pro toto schéma zpracujeme prvky pro souslednou a zpětnou soustavu:



Pro netočivou složkovou soustavu obdržíme:



## Výsledky

a) Poruchové matice  $[Z_{1P}]$ ,  $[Z_{2P}]$  a  $[Z_{0P}]$  (řešení v p.u. pro vztažná napětí dle schématu)

$$\begin{aligned}
 [Z_{1P}] &= \begin{bmatrix} 2.5111e-004 + 1.8003e-003i & 1.6792e-004 + 1.6352e-003i \\ 1.6792e-004 + 1.6352e-003i & 2.5630e-004 + 1.9479e-003i \end{bmatrix} \\
 [Z_{2P}] &= \begin{bmatrix} 2.7249e-004 + 1.8986e-003i & 1.9682e-004 + 1.7519e-003i \\ 1.9682e-004 + 1.7519e-003i & 2.9479e-004 + 2.0863e-003i \end{bmatrix} \\
 [Z_{0P}] &= \begin{bmatrix} 1.5982e-004 + 1.7942e-003i & -1.4288e-005 + 9.3180e-004i \\ -1.4288e-005 + 9.3180e-004i & 4.6044e-005 + 1.4129e-003i \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

b) Napětí v uzlech 2 a 3:

$$\begin{aligned}
 \hat{U}_{A2} &= 0 + j.0 = 0 \angle 0^\circ [p.u.] = 0 \angle 0^\circ [kV] \\
 \hat{U}_{B2} &= -0,2329 - j.0,1721 = 0,2896 \angle -144^\circ [p.u.] = 18,39 \angle -144^\circ [kV] \\
 \hat{U}_{C2} &= -0,6145 + j.0,8029 = 1,0111 \angle 127^\circ [p.u.] = 64,21 \angle 127^\circ [kV] \\
 \hat{U}_{A3} &= 0,2241 - j.0,0376 = 0,2273 \angle -10^\circ [p.u.] = 14,43 \angle -10^\circ [kV] \\
 \hat{U}_{B3} &= 0 + j.0 = 0 \angle 0^\circ [p.u.] = 0 \angle 0^\circ [kV] \\
 \hat{U}_{C3} &= -0,4851 + j.0,8233 = 0,9556 \angle 121^\circ [p.u.] = 60,69 \angle 121^\circ [kV]
 \end{aligned}$$

c) Po výpočtu poruchy #1 jsou dodatkové proudy rovny:

$$\hat{I}_{1\#1}^\Delta = \hat{I}_{2\#1}^\Delta = \hat{I}_{0\#1}^\Delta = -23,407 + j.191,86 [p.u.]$$

Po doplnění poruchy #2 do scénáře poruch a zakomentování řádků nulující předchozí výsledky, básové proudy  $\hat{I}_1^\oplus$ ,  $\hat{I}_2^\oplus$  a  $\hat{I}_0^\oplus$  a dodatkové proudy  $\hat{I}_1^\Delta$ ,  $\hat{I}_2^\Delta$  a  $\hat{I}_0^\Delta$ , obdržíme:

$$\hat{I}_1^{\oplus} = \hat{I}_2^{\oplus} = \hat{I}_0^{\oplus} = \begin{bmatrix} 23,407 - j \cdot 191,86 \\ 0 \end{bmatrix} [p.u.]$$

$$\hat{I}_1^{\Delta} = \begin{bmatrix} 3,36 + j \cdot 184,22 \\ -46,73 + j \cdot 188,69 \end{bmatrix} \quad \hat{I}_2^{\Delta} = \begin{bmatrix} 3,36 + j \cdot 184,22 \\ -140,04 - j \cdot 134,81 \end{bmatrix}$$

$$\hat{I}_0^{\Delta} = \begin{bmatrix} 3,36 + j \cdot 184,22 \\ 186,77 - j \cdot 53,87 \end{bmatrix} [p.u.]$$

Tyto dodatkové proudy jsou identické, jako když se počítaly #1 a #2 najednou, další výsledky proto musí být stejné jako v b).

Pozn. poruchy by bylo možné počítat separátně a následně sloučit injektované proudy  $\hat{I}_{\#1}^{\Delta}$  a  $\hat{I}_{\#2}^{\Delta}$  (resp. dodatková napětí  $\hat{U}_{\#1}^{\Delta}$  a  $\hat{U}_{\#2}^{\Delta}$ ) pouze pokud by byly matice  $[\mathbf{Z}_{1P}]$ ,  $[\mathbf{Z}_{2P}]$  a  $[\mathbf{Z}_{0P}]$  **diagonální** (tj. mezi poruchami není žádná vazba)! To ale není tento případ.

- d) Řešení pro  $Z_{f\#1} = Z_{f\#2} = 0 + j \cdot 20$  spočívá v doplnění rovnice v programu na:

$$\hat{I}_1^{\Delta} = \{3 \cdot [\mathbf{Z}_f]_d + [\mathbf{Z}_{\Sigma}]\}^{-1} \cdot (\hat{U}_{\Sigma} - 3 \cdot [\mathbf{Z}_f]_d \cdot \hat{I}_1^{\oplus})$$

Výsledky jsou potom:

$$\begin{aligned} \hat{U}_{A2} &= 0,4888 - j \cdot 0,0027 = 0,4888 \angle 0^{\circ} [p.u.] = 31,04 \angle 0^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{B2} &= -0,3300 - j \cdot 0,5504 = 0,6417 \angle -121^{\circ} [p.u.] = 40,75 \angle -121^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{C2} &= -0,5827 + j \cdot 0,8684 = 1,0458 \angle 124^{\circ} [p.u.] = 66,41 \angle 124^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{A3} &= 0,6124 - j \cdot 0,0224 = 0,6128 \angle 2^{\circ} [p.u.] = 38,91 \angle 2^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{B3} &= -0,1958 - j \cdot 0,4676 = 0,5069 \angle -113^{\circ} [p.u.] = 32,19 \angle -113^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{C3} &= -0,5117 + j \cdot 0,8815 = 1,0192 \angle 120^{\circ} [p.u.] = 64,72 \angle 120^{\circ} [kV] \end{aligned}$$

- e) Fázory napětí ve fázích A, B, a C v uzlu 4 pro poruchu #3:

$$\begin{aligned} \hat{U}_{A4} &= 1,0372 + j \cdot 0,0453 = 1,0382 \angle 3^{\circ} [p.u.] = 6,29 \angle 3^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{B4} &= -0,5341 - j \cdot 0,8495 = 1,0035 \angle -122^{\circ} [p.u.] = 6,08 \angle -122^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{C4} &= 0 + j \cdot 0 = 0 \angle 0^{\circ} [p.u.] = 0 \angle 0^{\circ} [kV] \end{aligned}$$

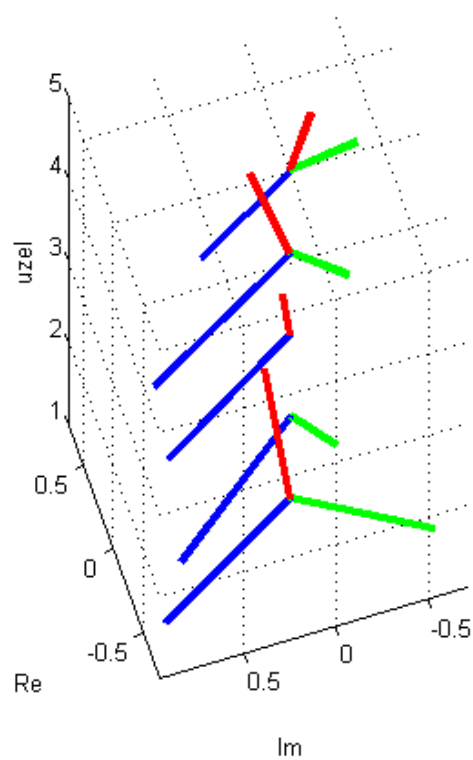
- f) Fázory napětí ve fázích A, B, a C v uzlu 4 pro poruchu #3 s modifikovaným schématem:

$$\begin{aligned} \hat{U}_{A4} &= 1,4766 - j \cdot 0,8562 = 1,7069 \angle -30^{\circ} [p.u.] = 10,35 \angle -30^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{B4} &= -0,0033 - j \cdot 1,7069 = 1,7069 \angle -90^{\circ} [p.u.] = 10,35 \angle -90^{\circ} [kV] \\ \hat{U}_{C4} &= 0 + j \cdot 0 = 0 \angle 0^{\circ} [p.u.] = 0 \angle 0^{\circ} [kV] \end{aligned}$$

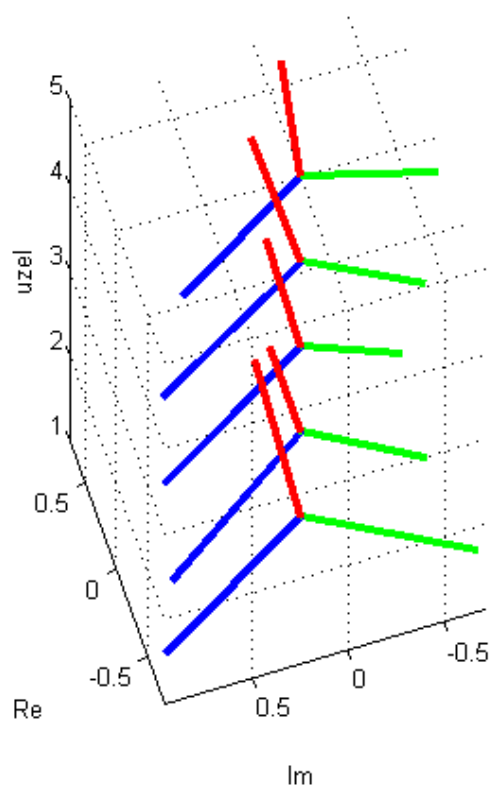
Napětí nepostížených fází dosahuje téměř hodnoty sdruženého napětí (nižší hodnota je dána úbytkem, protože stroj pracuje do sítě). Toto zapojení je pro napěťovou hladinu vn typické (přesněji používá se tzv. vysokoimpedanční uzemnění uzlu).

## Komentář

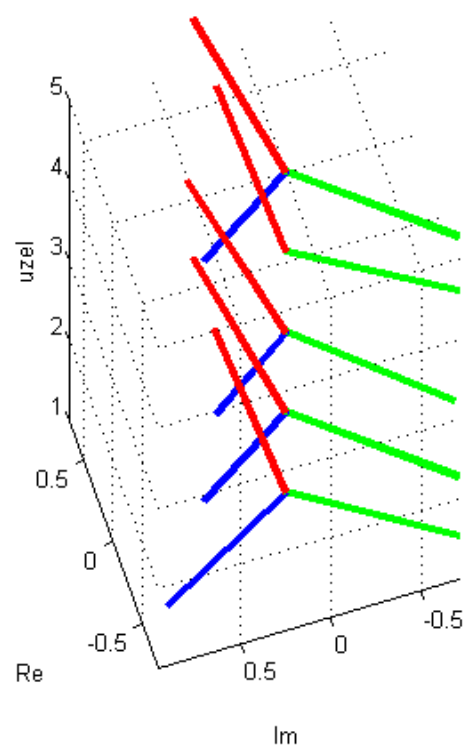
Grafické řešení úlohy a), b) a c):



Grafické řešení úlohy d):



Grafické řešení úlohy e):



Grafické řešení úlohy f):

