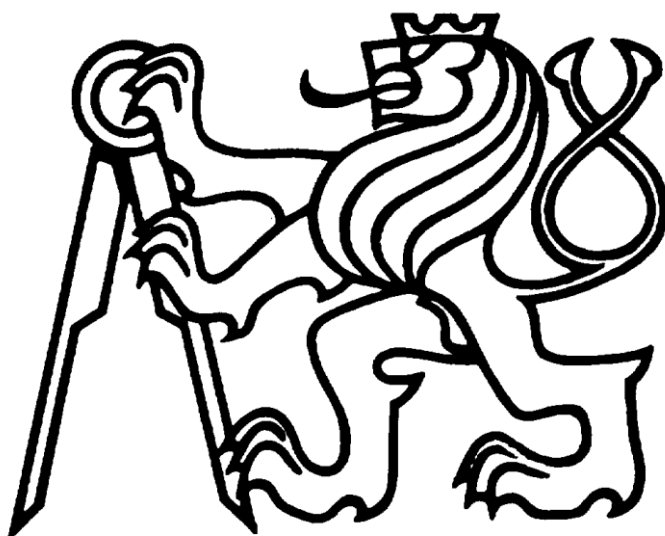


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY**



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**PORUCHY PŘERUŠENÍ FÁZE PŘI NAPÁJENÍ JADERNÉ  
ELEKTRÁRNY**

**OPEN PHASE CONDITION OF A NUCLEAR POWER PLANT  
POWER SUPPLY**

**Autor:** Bc. Ondřej Matějka

**Vedoucí práce:** Ing. Stanislav Bouček

Praha, 2018



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Matějka** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **420218**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Poruchy přerušení fáze při napájení jaderné elektrárny**

Název diplomové práce anglicky:

**Open Phase Condition of a Nuclear Power Plant Power Supply**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište metodu analýzy nesymetrických poruch v elektrizační soustavě a chování základních prvků elektrizační soustavy
2. Popište vlastní spotřebu Jaderné elektrárny Temelín a namodelujte ji
3. Výpočtem stanovte vliv přerušení fáze na vlastní spotřebu Jaderné elektrárny Temelín během provozu i odstávky
4. Určete vliv poruchy na vlastní spotřebu elektrárny a možnosti detekce poruchy

Seznam doporučené literatury:

- [1] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. Přejídné jevy v elektrizačních soustavách. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1987.  
[2] TLUSTÝ, Josef. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.  
[3] DOLEŽAL, Jaroslav. Jaderné a klasické elektrárny. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.  
[4] Elektrická schémata Jaderné elektrárny Temelín

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Stanislav Bouček, katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.01.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**  
Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Stanislav Bouček  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 22. 5. 2018

.....  
Bc. Ondřej Matějka

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Stanislavu Boučkovi za odborné vedení mé práce a cenné rady, které mi během vypracovávání poskytl. Děkuji také pracovníkům Jaderné elektrárny Temelín za poskytnutí všech potřebných podkladů a osobní konzultace.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá poruchami přerušení fáze při napájení vlastní spotřeby jaderné elektrárny. Nejprve rozebírá problematiku nesymetrických poruch a metody výpočtu parametrů soustavy při poruše přerušení fáze. Následně je rozebírán vliv jednotlivých zařízení elektrizační soustavy i zařízení vlastní spotřeby jaderné elektrárny při této poruše. Tyto znalosti jsou použity pro výpočet napěťových a proudových poměrů na rozvodnách vlastní spotřeby při této poruše v Jaderné elektrárně Temelín. Na základě zjištěných napětí i proudů jsou analyzovány dopady poruchy a možnosti její detekce.

## **Klíčová slova**

porucha, přerušení fáze, vlastní spotřeba, jaderná elektrárna, Temelín, elektrizační soustava, nesymetrie

## **Abstract**

This thesis deals with the open phase condition on a nuclear power plant power supply. Firstly, asymmetrical failures are summarized together with calculation methods for the description of the open phase condition. Then, the influence of individual electrical power supply devices during the open phase condition is described. The presented theory is subsequently applied to a voltage and current calculation for the electrical substation of the Temelín nuclear power plant. Finally, the results of this calculation are used to analyze the possible impact of such a failure as well as the possible means of its detection.

## **Key words**

failure, open phase condition, power supply, nuclear power plant, Temelín, electrical grid, asymmetry

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>PORUCHY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH</b> .....	<b>8</b>
2.1	Složková soustava.....	8
2.2	Složkové parametry prvků elektrizační soustavy.....	10
2.2.1	Náhradní schémata transformátorů pro netočivou složku .....	10
2.2.2	Zpětná a netočivá složka asynchronních motorů .....	12
2.2.3	Určení složkových parametrů venkovního vedení .....	12
2.3	Poruchy typu přerušeni fáze .....	13
2.3.1	Bezporuchový stav .....	14
2.3.2	Přerušeni jedné fáze.....	15
2.3.3	Přerušeni dvou fází.....	16
<b>3</b>	<b>NAPÁJENÍ VLASTNÍ SPOTŘEBY JADERNÉ ELEKTRÁRNY</b> .....	<b>18</b>
3.1	Přerušeni fáze a jaderná elektrárna .....	18
3.2	Vlastní spotřeba Jaderné elektrárny Temelín.....	19
3.2.1	Znamé parametry prvků vlastní spotřeba potřebné pro výpočet.....	19
3.3	Elektrické ochrany ETE a jejich nastavení .....	25
3.3.1	Ochrany vedení 400 kV .....	25
3.3.2	Ochrany blokového transformátoru.....	26
3.3.3	Ochrany odbočkového transformátoru .....	26
3.3.4	Ochrany rezervního transformátoru .....	26
3.3.5	Ochrany rozveden vlastní spotřeba a spotřebičů .....	26
3.3.6	Podpětové vypínání.....	27
3.3.7	Automatika zásoků rezervy .....	27
<b>4</b>	<b>POSTUP VÝPOČTU PORUCHY PŘERUŠENÍ FÁZE</b> .....	<b>28</b>
4.1	Zjednodušující předpoklady pro výpočet.....	28
4.2	Parametry prvků .....	29
4.3	Model vlastní spotřeba .....	31
4.3.1	Model sousledné složky.....	32
4.3.2	Model zpětné složky .....	33
4.3.3	Model netočivé složky.....	35
4.4	Schémat ve složkách.....	35
4.4.1	Zjednodušení schémat .....	37
<b>5</b>	<b>VÝSLEDNÉ DOPADY PORUCHY</b> .....	<b>39</b>
5.1	Porucha při provozu a pracovním napájení.....	39
5.2	Porucha při odstávce a pracovním napájení .....	44
5.2.1	Za blokovým transformátorem .....	44
5.2.2	Před blokovým transformátorem .....	44
5.3	Porucha na rezervním zdroji napájení.....	50
5.3.1	Za rezervním transformátorem .....	50
5.3.2	Před rezervním transformátorem .....	51
5.4	Shrnutí výsledných dopadů různých poruch .....	57
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>59</b>
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	62
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	63



# 1 Úvod

V této práci se budu věnovat poruchám typu přerušení fáze na zařízeních a vedeních zajišťující napájení vlastní spotřeby jaderné elektrárny. V práci budou zahrnuta všechna možná místa poruchy při různých provozních stavech elektrárny s výjimkou poruchy na zařízeních a vedeních vyvedení výkonu elektrárny během provozu elektrárenského bloku.

Toto téma jsem si vybral na základě konzultace v Jaderné elektrárně Temelín, kde mi byla tato problematika představena. Při vzniku této poruchy v jiných jaderných elektrárnách nedošlo ke správné reakci elektrických ochran, která vedla k nepředvídaným provozním stavům, které musely být řešeny až manuálním zásahem personálu elektrárny. Protože dopady tohoto typu poruchy velmi záleží na konkrétní koncepci napájení vlastní spotřeby dané elektrárny, nelze uplatnit závěry z analýzy této poruchy u jiných elektráren s jinou koncepcí a je třeba provést analýzu pro každou elektrárnu zvlášť. Proto bude v této práci po teoretickém úvodu následovat analýza této poruchy, konkrétně v Jaderné elektrárně Temelín, a její možné následky na vlastní spotřebě této elektrárny.

Nejprve bude rozebrána problematika řešení nesymetrických poruch v elektrizační soustavě. Bude vysvětlen rozklad nesymetrického třífázového systému do složkové soustavy a možnosti využití této transformace. Následně budou popsány parametry prvků elektrizační soustavy po transformaci do složkové soustavy. Zvláště bude brán zřetel na vliv transformátorů, asynchronních motorů a elektrických vedení.

Dále se budu zabývat již konkrétně poruchami typu přerušení fáze, mezi které patří přerušení jedné fáze a přerušení dvou fází. Obě poruchy budou popsány rovnicemi charakterizujícími tuto poruchu a z nich budou následně vyvozeny vlastnosti poruchy po transformaci do složkové soustavy, možnost využití náhradních schémat ve složkové soustavě a jejich vzájemné zapojení při různých typech poruchy. V teoretické části bude ještě rozebíráno připojení jaderné elektrárny do elektrizační soustavy, přes jaké transformátory a vedení probíhá napájení vlastní spotřeby elektrárny. Konečně bude popsán charakter vlastní spotřeby během odstávky i během provozu, a jaký vliv mají parametry vlastní spotřeby při poruše.

V praktické části této práce budou poruchy typu přerušení fáze při napájení vlastní spotřeby Jaderné elektrárny Temelín analyzovány. Konkrétně budou určeny napěťové a proudové poměry na přípojnicích vlastní spotřeby. Bude analyzován vliv velikosti zatížení rozvodu vlastní spotřeby spolu s vlivem parametrů asynchronních motorů. Z těchto poznatků bude vycházet vyhodnocení poruchy a její vliv na elektrické parametry vlastní spotřeby elektrárny. Pro všechny možnosti poruchy bude určeno, jaký mají dopad na napájení vlastní spotřeby a jak velké nebezpečí pro elektrárnu představují.

## 2 Poruchy v elektrizačních soustavách

V elektrizačních soustavách se mohou vyskytovat dva typy poruch způsobujících nesymetrické provozní stavy, místní nesymetrie příčná (zkraty, zemní spojení) a místní nesymetrie podélná (přerušeni fáze) [1, s. 98].

Tyto poruchy lze modelovat zapojením obecného nesymetrického příčného nebo podélného článku v místě poruchy a řešit tak všechny příčné nebo podélné poruchy obecně s dosazením pro konkrétní poruchu až na konci výpočtu. Toto obecné řešení vede ke komplikovaným vztahům a výhodnější je provádět řešení zvlášť pro jednotlivé typy místní nesymetrie. Pro daný typ nesymetrie budeme vždy vycházet ze znalosti obvodu doplněným o tři rovnice, které popisují charakter místní nesymetrie [1, s. 98].

### 2.1 Složková soustava

Při řešení nesymetrických poruch v třífázových soustavách v ustáleném stavu se využívá transformace veličin reprezentovaných fázory a popsanych komplexními čísly (dále v textu budou značeny tučně) ze standardně používané fázové soustavy  $a$ - $b$ - $c$  do složkové soustavy  $0$ - $1$ - $2$ . Ve fázové soustavě veličiny s indexy  $a$ ,  $b$ ,  $c$  reprezentují veličiny příslušející konkrétní fázi a nejsou nijak vzájemně závislé. Při transformaci z fázové do složkové soustavy dochází k rozkladu tří fázorů na tři symetrické složky (každá je složena ze tří fázorů), jejichž součet se rovná velikosti fázorů ve fázové soustavě. Sousední složka (index 1) je složena ze tří fázorů odpovídající symetrické soustavě se shodným směrem otáčení jako soustava. Zpětná složka (index 2) také odpovídá symetrické soustavě, ale fázory  $b$  a  $c$  jsou prohozené, její směr otáčení je opačný. Netočivá (nulová) složka (index 0) je složena ze tří identických fázorů se stejnou velikostí i fázovým posunem. Každá z těchto tří složek je při výpočtech reprezentovaná pouze prvním referenčním fázorem [2, s. 244].

Z těchto předpokladů lze odvodit transformační matici  $\mathbb{T}$  [1, s. 80] a pro transformaci veličiny (zde například napětí) platí vztah:

$$\mathbb{U}_{abc} = \mathbb{T} \cdot \mathbb{U}_{120}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U}_a \\ \mathbf{U}_b \\ \mathbf{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} & 1 \\ \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

kde jsme zavedli otočení fázoru o  $120^\circ$ :

$$\mathbf{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (3)$$

Opačnou transformaci dostaneme ze vztahu (2) vynásobením zleva inverzní maticí  $\mathbb{T}^{-1}$ :

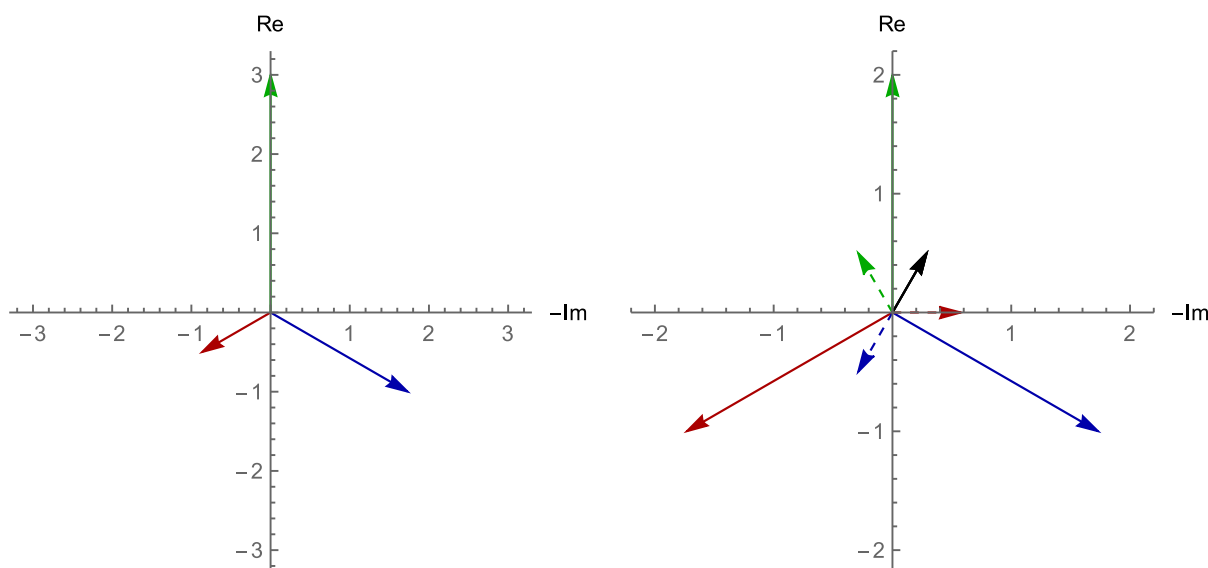
$$\mathbb{U}_{120} = \mathbb{T}^{-1} \cdot \mathbb{U}_{abc}, \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{U}_a \\ \mathbf{U}_b \\ \mathbf{U}_c \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Příklad transformace nesymetrických fázových napětí do složkové soustavy (Obr. 1):

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \cdot a^2 \\ 1 \cdot a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 - 1,73j \\ -0,5 + 0,87j \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ -1 - 1,73j \\ -0,5 + 0,87j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0,5 + 0,29j \\ 0,5 - 0,29j \end{pmatrix} \quad (7)$$



Obr. 1 – Vlevo fázory nesymetrických napětí fází a, b, c, vpravo složky sousledná (plná), zpětná (přerušovaná) a netočivá (černá, fázory splývají)

V tomto příkladu je nesymetrické trojfázové napětí definované vztahem (6) a zobrazené na Obr. 1 vlevo převedené do složkové soustavy pomocí transformace (5). Výsledné fázory sousledné, zpětné a netočivé složky jsou vypočítány (7) a zobrazeny na Obr. 1 vpravo. Na obrázku jsou zobrazeny všechny fázory všech fází, při výpočtech se počítá pouze s fázorem fáze a (Na Obr. 1 vpravo zeleně a černě).

Dále můžeme tuto transformaci aplikovat na rovnici popisující úbytek napětí na obecném symetrickém podélném článku:

$$\begin{pmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z & Z' & Z' \\ Z' & Z & Z' \\ Z' & Z' & Z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

a dostaneme rovnici ve tvaru [4, s. 244]:

$$\begin{pmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z - Z' & 0 & 0 \\ 0 & Z - Z' & 0 \\ 0 & 0 & Z + 2Z' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Ze vztahu (9) je vidět největší výhoda této transformace, v matici popisující symetrický podélný článek jsou členy mimo diagonálu nulové. Tím se tato maticová rovnice po rozepsání zjednoduší na tři vzájemně nezávislé rovnice. Můžeme tak vytvořit pro každou složku nezávislé náhradní schéma. Tyto tři schémata můžeme pro různé typy poruchy podle vztahů vzniklých z transformace tří charakteristických rovnic dané poruchy propojit v místě poruchy.

Tím nám vznikne jedno schéma, ze kterého zjistíme požadované složkové proudy nebo napětí, které můžeme jednoduše transformovat zpět na fázové hodnoty.

Tato metoda je však kvůli využití superpozice použitelná pouze na lineární soustavy s lineárními prvky. Nelinearity mohou v systému vzniknout zejména přesycováním magnetických obvodů, k čemuž dochází například při běhu transformátoru naprázdno. Protože celá transformace vychází z transformování fázorů, je omezena pouze na harmonický ustálený stav a nelze s její pomocí určit průběhy veličin během přechodného děje při vzniku poruchy.

## **2.2 Složkové parametry prvků elektrizační soustavy**

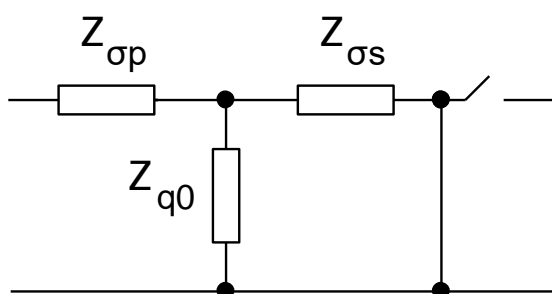
Již bylo ukázáno, jak lze transformovat do složkové soustavy obecný podélný symetrický článek, jako je například transponované vedení. Obecně platí, že všechny netočivé statické prvky mají stejné parametry sousledné i zpětné složky [1, s. 86]. U transformátorů je nutné určit chování vůči netočivé složce, které se značně liší v závislosti na zapojení transformátoru a konstrukci magnetického obvodu. Až z této znalosti můžeme stanovit náhradní schéma pro netočivou složku [1, s. 87-88].

### **2.2.1 Náhradní schémata transformátorů pro netočivou složku**

Protože existuje mnoho různých kombinací konstrukce a zapojení vinutí transformátoru, zde rozeberu pouze ty, které jsou použity při napájení vlastní spotřeby v Jaderné elektrárně Temelín. Jako pracovní zdroj při napájení vlastní spotřeby během odstávky bloku se používá blokový transformátor a dva trojvinutové odbočkové transformátory. Během provozu je vlastní spotřeba napájena také těmito odbočkovými transformátory, které odebírají část vyrobeného výkonu generátorem. Jako rezervní zdroje se využívají dva trojvinutové transformátory napájené vlastním vedením 110 kV.

Blokový transformátor se skládá ze tří jednofázových jednotek, takže nevzniká žádná magnetická vazba mezi vinutími jednotlivých fází. Zapojení vinutí transformátoru je YNd1. Při přiložení netočivé složky napětí na stranu vyššího napětí proud díky zapojení do uzemněné hvězdy proteče. Protože nejsou vinutí magneticky svázaná, může se magnetický tok uzavírat a přetransformovat na stranu nižšího napětí, stejně jako pro souslednou složku. Na straně nižšího napětí je vinutí zapojeno do trojúhelníku. Po přivedení stejných transformovaných napětí na sekundární a terciární vinutí začne vinutími protékat proud, který se může v trojúhelníku uzavírat dokola a netočivá složka se nešíří dále.

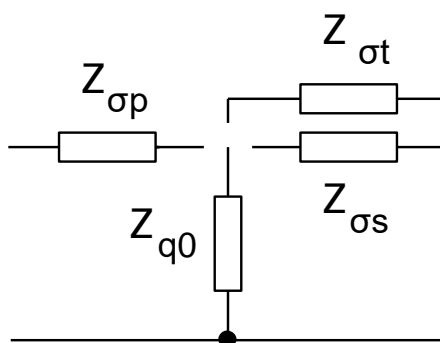
Při připojení netočivého napětí na svorky na straně nižšího napětí zapojeného do trojúhelníku nevznikne na vinutích žádné napětí (netočivá složka má sdružené napětí nulové). Žádný proud vinutími neprochází a ze strany nižšího napětí se tak netočivá složka nemůže šířit vůbec. Náhradní schéma netočivé složky tohoto transformátoru (Obr. 2) tedy odpovídá souslednému schématu se zkratem za transformátorem a odpojenou stranou nižšího napětí [1, s. 88].



Obr. 2 – Náhradní schéma blokového transformátoru pro netočivou složku, zleva vyšší napětí

Ze schématu (Obr. 2) lze odvodit, že impedance transformátoru ze strany vstupního napětí bude odpovídat součtu rozptylových reaktancí primárního a sekundárního vinutí a jejich odporu  $Z_{\sigma p} + Z_{\sigma s}$  (příčnou impedanci  $Z_{q0}$  kvůli vysoké hodnotě oproti podélné impedanci lze s malou chybou zanedbat), což je stejná hodnota impedance jako u sousledné složky (zde se také příčná magnetizační větev z důvodu vysoké impedance zpravidla zanedbává).

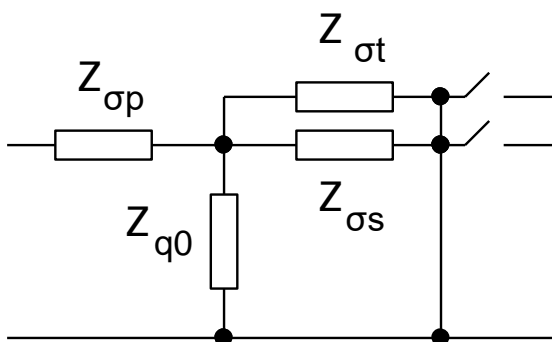
Dva odbočkové transformátory jsou trojvinuťové třífázové jádrové transformátory se zapojením vinutí Dd0d0. Protože jsou všechna vinutí zapojená do trojúhelníku, tak při připojení netočivého napětí na jednotlivých vinutích není žádné napětí a transformátorem žádný netočivý proud nepoteče. V náhradním schématu se tak chová uzel transformátoru, jako kdyby byl rozpojený.



Obr. 3 – Náhradní schéma odbočkových transformátorů pro netočivou složku, zleva vyšší napětí

Zde je zřejmé, že kvůli náhradnímu schématu (Obr. 3) s rozpojeným uzlem bude impedance transformátoru ze všech stran nekonečná.

Dva rezervní transformátory jsou také trojvinuťové třífázové jádrové transformátory se zapojením vinutí YNd1d1.



Obr. 4 – Schéma rezervních transformátorů pro netočivou složku, zleva strana vyššího napětí

V tomto případě (Obr. 4) bude příčná impedance  $Z_{q0}$  při připojení netočivé složky menší, protože magnetické obvody nejsou nezávislé a magnetické toky se nemohou sousedními sloupky uzavírat. I přes to je tato impedance  $Z_{q0}$  stále řádově vyšší než podélná, a proto ji je opět možno zanedbat. Netočivá impedance transformátoru ze vstupní strany bude dána sériovou kombinací primární rozptylové reaktance a odporu, místo sekundární reaktance a odporu musíme ovšem uvažovat s paralelní kombinací sekundární a terciární reaktance a odporu  $z_{\sigma p} + (z_{\sigma s} \parallel z_{\sigma t})$ .

## 2.2.2 Zpětná a netočivá složka asynchronních motorů

U asynchronních motorů je při jmenovitém chodu skluz  $s \approx 0$ , pro zpětnou složku je pak odpovídající skluz  $s \approx 2$ . Protože se parametry motoru pro hodnoty skluzu  $s = 1$  až 2 příliš nemění, lze nahradit parametry motoru zpětné složky záběrnými parametry motoru, kdy je skluz  $s = 1$  [1, s. 96]. Záběrný proud se u asynchronních motorů pohybuje v rozmezí 4 až 7 násobku jmenovitého proudu [7, s. 87]. Protože je reaktance při tomto skluzu mnohem vyšší než odpor vinutí, lze zjednodušeně tento proud uvažovat jako čistě induktivní.

Pro netočivou složku platí, že pokud nemají motory uzemněný uzel, což bude v našem případě splněno, tak jak při zapojení statorového vinutí do trojúhelníku, tak při zapojení statorového vinutí do hvězdy je při připojení netočivého napětí nulové napětí mezi fázemi. Netočivá složka proudu proto motorem nebude procházet a statorové vinutí motoru bez uzemněného uzlu se bude chovat vůči netočivé složce jako rozpojené.

## 2.2.3 Určení složkových parametrů venkovního vedení

Při užití  $n$  svazkových vodičů oproti jednomu vodiči na fázi se výpočet liší pouze v činiteli  $\xi$  a poloměru vodiče  $r$ . Místo nich se musí počítat s ekvivalentními hodnotami, které vypočítáme z následujících vztahů [8, s. 316-319]:

$$\xi_e = \sqrt[n]{\xi}, \quad (10)$$

$$r_e = R \cdot \sqrt[n]{\frac{n}{R} \cdot r}, \quad (11)$$

kde  $n$  je počet vodičů ve svazku,  $R$  je poloměr svazku a  $r$  je poloměr jednoho vodiče ve svazku. U trojsvazku ( $n = 3$ ) mezi vzdáleností vodičů  $a$  (vrcholů rovnostranného trojúhelníku) a poloměru svazku  $R$  (vzdálenosti vrcholu od středu) platí tento vztah (obdobný sdruženému a fázovému napětí):

$$R = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

S použitím hodnot  $\xi_e$  a  $r_e$  místo hodnot  $\xi$  a  $r$  můžeme použít vztahy pro jeden fázový vodič [8, s. 319].

Následující vztahy platí pouze pro transponovaná vedení nebo vedení krátká (což dále počítaná 3 km dlouhá vedení splňují) [8, s. 54]. Sousedná a zpětná impedance jednoho kilometru vedení jsou stejné a vypočítají se podle [1, s. 91]:

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2 = R_v + j \cdot 0,145 \log \frac{d_s}{\xi \cdot r}, \quad (13)$$

kde  $R_v$  je rezistence kilometru vedení,  $r$  je poloměr svazku,  $\xi$  je korekční činitel (pro AlFe lana roven 0,81) a  $d_s$  je střední geometrická vzdálenost vodičů, která se určí podle:

$$d_s = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{AC} \cdot d_{BC}}, \quad (14)$$

kde  $d_{AB}$ ,  $d_{AC}$  a  $d_{BC}$  jsou vzdálenosti mezi fázovými vodiči. Při použití zemnicích lan se v nich při průchodu sousledné a zpětné složky indukují minimální proudy, proto s nimi není třeba ve výpočtu počítat [1, s. 92].

Netočivá impedance kilometru vedení se vypočítá podle tohoto vztahu:

$$\mathbf{Z}_0 = R_v + 3R_g + j \cdot 0,145 \log \frac{D_g^3}{\xi \cdot r \cdot d_s^2}, \quad (15)$$

kde  $R_g = 0,05$  je rezistence země na jeden kilometr a  $D_g$  je hloubka fiktivního zpětného vodiče (při neznámém podloží se doporučuje volit 1000 m) [1, s. 91].

Velikost netočivé impedance použití zemnicích lan významně ovlivňuje, při použití jednoho zemnicího lana se hodnota koriguje takto:

$$\mathbf{Z}_0^{(1z)} = \mathbf{Z}_0 - 3 \frac{\mathbf{Z}_{Mz}^2}{\mathbf{Z}_z}, \quad (16)$$

$$\mathbf{Z}_{Mz} = R_g + j \cdot 0,145 \log \frac{D_g}{d_z}, \quad (17)$$

$$\mathbf{Z}_z = R_z + R_g + j \cdot 0,145 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r_z}, \quad (18)$$

kde  $d_z$  je střední geometrická vzdálenost zemnicího lana od fázových vodičů,  $R_z$  je reaktance zemnicích lan a  $r_z$  je poloměr zemnicího lana.

Při použití dvou zemnicích lan se velikost netočivé složky určí takto:

$$\mathbf{Z}_0^{(2z)} = \mathbf{Z}_0 - 3 \frac{\mathbf{Z}_{M2z}^2}{\mathbf{Z}_{2z}}, \quad (19)$$

$$\mathbf{Z}_{M2z} = R_g + j \cdot 0,145 \log \frac{D_g}{d_{2z}}, \quad (20)$$

$$\mathbf{Z}_{2z} = \frac{R_z}{2} + R_g + j \cdot 0,145 \log \frac{D_g}{\sqrt{r_z \cdot d_{2z}}}, \quad (21)$$

kde  $d_{2z}$  je střední geometrická vzdálenost obou zemnicích lan od všech fázových vodičů a  $d_{zz}$  je vzdálenost zemnicích lan od sebe.

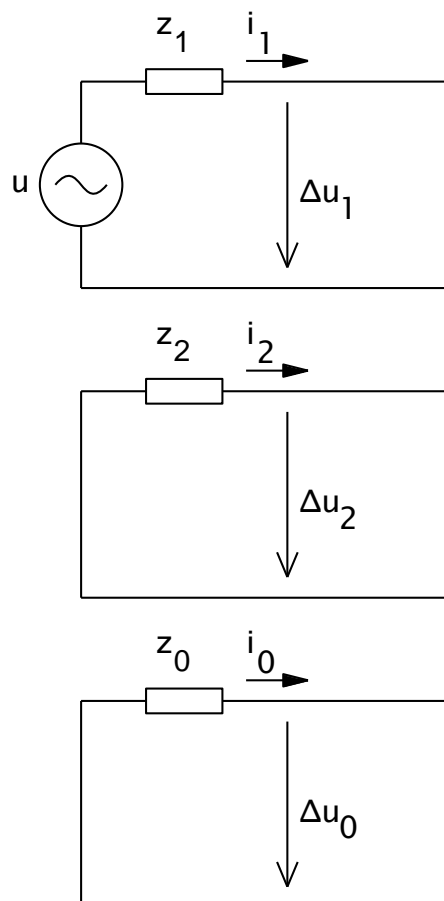
## 2.3 Poruchy typu přerušení fáze

Podstata poruchy přerušení fáze spočívá v tom, že se fázový vodič rozpojí, následkem čehož přestane vodičem protékat proud. Protože vodič není nadále spojen, může existovat

mezi rozpojenými konci vodiče nenulové napětí. Důležité je, že nedojde ke spojení ani jednoho rozpojeného vodiče s jiným fázovým vodičem nebo se zemí. Pak by porucha byla charakteru nejen podélného typu, ale i příčného (zkrat). Pro každou fázi platí, že je v místě poruchy buď spojena (je zde nulový rozdíl napětí) nebo rozpojena (fází teče nulový proud).

### 2.3.1 Bezporuchový stav

Ve výpočtech bude třeba pro srovnání určit napětí a proudy  $i$  v bezporuchovém stavu. V elementárním obvodu za předpokladu symetrického trojfázového napájení z tvrdého zdroje napětí (zdroj napětí obsahuje pouze souslednou složku a jeho vnitřní impedance je ve všech složkách nulová) platí náhradní schéma v jednotlivých složkách na Obr. 5. Pokud je v bezporuchovém stavu předpokládána celá soustava symetrická, musí mít při napájení pouze sousledným napětím proud pouze souslednou složku. Zpětná a netočivá složka proudu musí být nulová, stejně tak napětí budou ve všech místech symetrická. Protože není žádná fáze nikde přerušena, bude rozdíl napětí „v místě poruchy“ ve všech složkách nulový.



Obr. 5 – Náhradní schéma zapojení složek při bezporuchovém chodu

Pro určení všech složkových proudů a rozdílů napětí tedy platí následující rovnice:

- Sousledný proud: 
$$i_1 = \frac{u}{z_1} \quad (22)$$

- Zpětný a netočivý proud: 
$$i_2 = i_0 = 0 \quad (23)$$

- Rozdíl napětí v místě poruchy: 
$$\Delta u_1 = \Delta u_2 = \Delta u_0 = 0 \quad (24)$$



## 2.3.2 Přerušení jedné fáze

Prvním typem poruchy přerušení fáze je přerušení jedné fáze. Charakteristické rovnice pro náhradní nesymetrický článek při přerušení fáze  $a$  jsou:

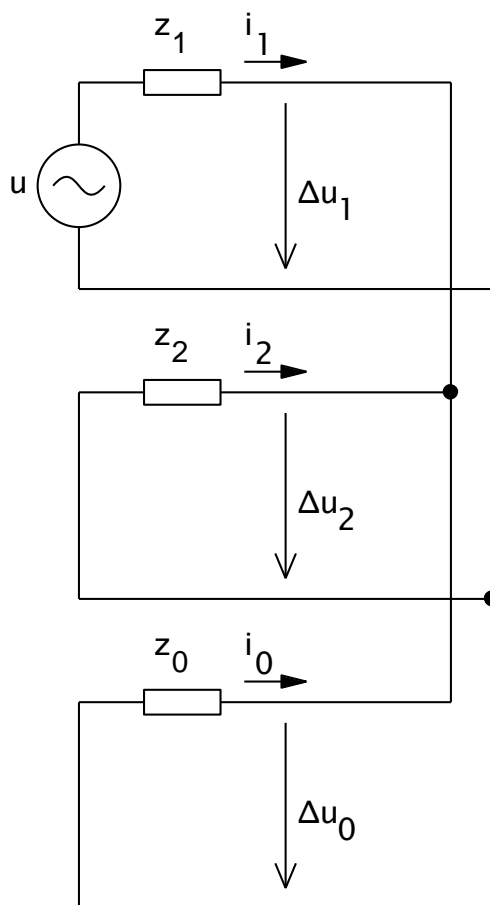
$$I_a = 0, \quad \Delta U_b = 0, \quad \Delta U_c = 0 \quad (25)$$

Rovnice (25) vyjadřují, že je fáze  $a$  přerušena (teče jí nulový proud) a že zbylé dvě fáze  $b$  a  $c$  přerušeny nejsou (je v místě poruchy na těchto vodičích nulový rozdíl napětí). Při transformaci úbytků napětí (jeden o neznámé velikosti a dva nulové) do složkové soustavy podle vztahu (5) dostaneme:

$$\begin{pmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta U_a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \Delta U_a \\ \frac{1}{3} \Delta U_a \\ \frac{1}{3} \Delta U_a \end{pmatrix} \quad (26)$$

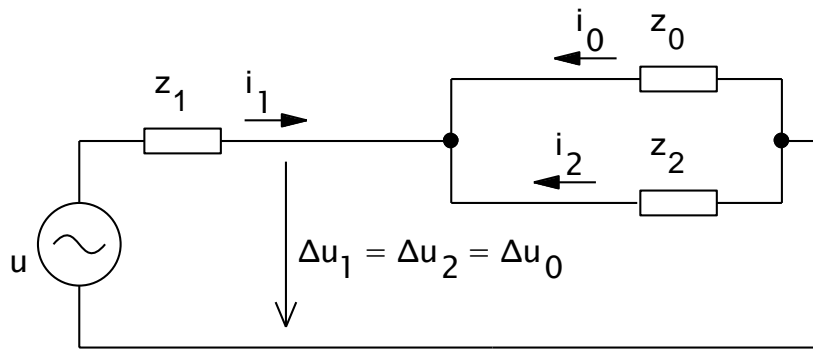
Všechny tři úbytky napětí mají ve složkové soustavě stejnou velikost, při konstrukci náhradního schématu tak spojíme náhradní schéma soustavy v jednotlivých složkách v místě poruchy paralelně (paralelní zapojení zajišťuje stejný rozdíl napětí v místě).

Pro elementární trojfázový obvod, tvořený pouze zdrojem sousledného napětí a jednou impedancí, u které známe její velikosti ve složkové soustavě, dostaneme zapojení dle Obr. 6.



Obr. 6 – Náhradní schéma zapojení složek při přerušení jedné fáze

Náhradní schéma na Obr. 6 můžeme zjednodušit do podoby na Obr. 7, kde je již vidět, že je splněna výchozí podmínka, že rozdíl napětí v místě poruchy je ve všech složkách stejný.



Obr. 7 – Zjednodušené náhradní schéma zapojení složek při přerušení jedné fáze

Ze zapojení složek na Obr. 7 lze odvodit následující složkové proudy a rozdíly napětí:

- Sousedný proud: 
$$i_1 = \frac{u}{z_1 + \frac{z_2 \cdot z_0}{z_2 + z_0}} \quad (27)$$
- Zpětný proud: 
$$i_2 = -\frac{u - i_1 \cdot z_1}{z_2} \quad (28)$$
- Netočivý proud: 
$$i_0 = -\frac{u - i_1 \cdot z_1}{z_0} \quad (29)$$
- Rozdíl napětí ve všech složkách: 
$$\Delta u_1 = \Delta u_2 = \Delta u_0 = u - i_1 \cdot z_1 \quad (30)$$

### 2.3.3 Přerušení dvou fází

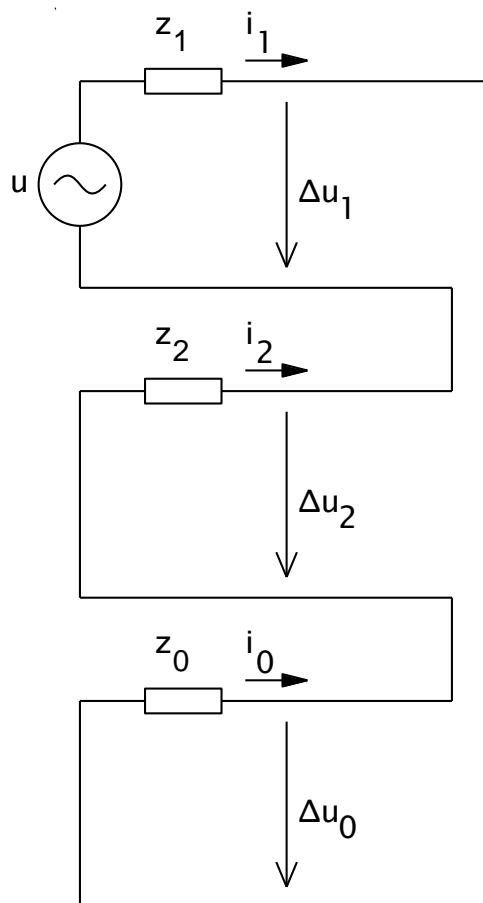
Druhou možností této poruchy je přerušení dvou fází. Charakteristickými rovnicemi při přerušení fází *b* a *c* jsou:

$$I_b = 0, \quad I_c = 0, \quad \Delta U_a = 0 \quad (31)$$

Zde je rovnicemi (31) vyjádřeno, že jsou přerušené fáze *b* a *c* (nulový proud) a fáze *a* přerušena není (nulový rozdíl napětí v místě poruchy). V tomto případě je výhodné transformovat proudy (dva nulové a jeden neznámý) do složkové soustavy analogicky k (26) a dostaneme:

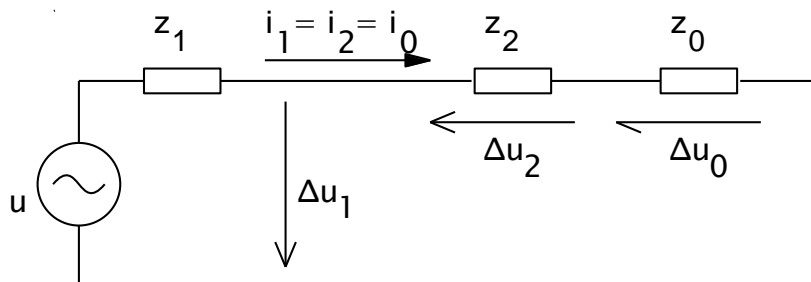
$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} I_a \\ \frac{1}{3} I_a \\ \frac{1}{3} I_a \end{pmatrix} \quad (32)$$

Všechny tři složkové proudy mají stejnou velikost, v náhradním schématu proto zapojíme jednotlivá schémata v místě poruchy do série, čímž bude celým schématem protékat jeden proud o jedné velikosti. Na základě tohoto předpokladu lze opět určit spojení složek elementárního obvodu (Obr. 8).



Obr. 8 – Náhradní schéma zapojení složek při přerušení dvou fází

A opět lze schéma z Obr. 8 zjednodušit do podoby na Obr. 9, kde je vidět splnění podmínky, že proud je ve všech složkách shodný.



Obr. 9 – Zjednodušené náhradní schéma zapojení složek při přerušení dvou fází

Rovnice pro určení složkových rozdílů napětí a proudu jsou v tomto případě přerušení dvou fází následující:

- Všechny složky proudu: 
$$i_1 = i_2 = i_0 = \frac{u}{z_1 + z_2 + z_0} \quad (33)$$
- Sousedný rozdíl napětí: 
$$\Delta u_1 = u - i_1 \cdot z_1 \quad (34)$$
- Zpětný rozdíl napětí: 
$$\Delta u_2 = -i_2 \cdot z_2 \quad (35)$$
- Netočivý rozdíl napětí: 
$$\Delta u_0 = -i_0 \cdot z_0 \quad (36)$$

Z těchto veličin lze transformací ze složkové soustavy podle (2) zjistit proudy při dané poruše v nepřerušovaných fázích a rozdíl napětí mezi jednotlivými konci přerušovaných fází.

## 3 Napájení vlastní spotřeby jaderné elektrárny

Protože budu v této práci analyzovat poruchu přerušení fáze na napájení vlastní spotřeby jaderné elektrárny, potřebuji pro výpočet vytvořit model vlastní spotřeby elektrárny ve složkové soustavě. Pro jeho vytvoření je nutná znalost struktury napájení vlastní spotřeby a jeho chování v jednotlivých složkách. Na začátku této kapitoly budou také shrnuty poznatky s touto poruchou z jiných elektráren.

### 3.1 Přerušení fáze a jaderná elektrárna

Ke dvěma poruchám typu přerušení fáze došlo v roce 2012 měsíc po sobě na prvním a druhém bloku jaderné elektrárny Byron v USA. V obou případech byla porucha způsobená vadným izolátorem, na kterém byl zavěšen vodič velmi vysokého napětí napájející vlastní spotřebu elektrárny ze sítě. Koncepte elektrické části této elektrárny má v pracovním režimu část vlastní spotřeby napájenou přímo ze sítě a část odbočkou od generátoru.

Při první poruše na druhém bloku došlo k přerušení fáze na části vlastní spotřeby napájené přímo ze sítě. Tato porucha způsobila nesymetrické rozložení napětí i proudů (proudy se ve dvou neporušených fázích zvýšily). U napětí v neporušených fázích k významnější změně nedošlo, elektrické ochrany proto nezareagovaly a neodpojily vlastní spotřebu od tohoto nesymetrického napájení. Ochrany určitých důležitých pohonů a zařízení v elektrárně však na nesymetrii zareagovaly a zařízení odepnuly. Elektrárna kvůli tomu byla automaticky odstavena, a i část vlastní spotřeby napájená odbočkou z generátoru byla přepnuta na napájení s přerušenou fází. To problémy ještě zvýšilo a až po několika minutách operátoři problém diagnostikovali, ručně odpojili vlastní spotřebu od nesymetrického napájení a celá vlastní spotřeba byla přepnuta na záložní systém napájení [4], [5], [6].

Druhá porucha byla obdobná, ale na straně sítě došlo i ke zkratu, který byl správně rozpoznán, vlastní spotřeba byla tím pádem hned od nesymetrického napájení ze sítě odpojena.

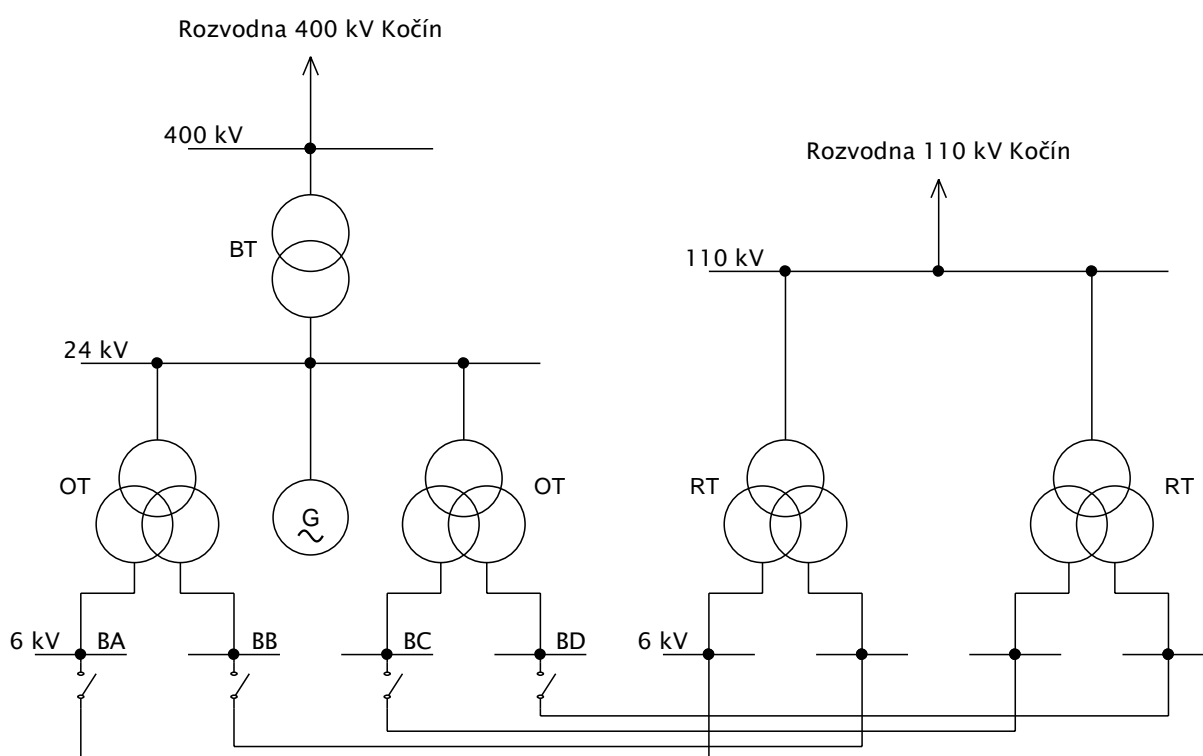
Ke třetí významnější poruše došlo ve švédské jaderné elektrárně Forsmark 3. Během odstávky a údržbových prací na generátoru došlo k chybnému vyslání pokynu blokovému vypínači 400 kV. Signál k vypnutí nebyl kvůli jiné chybě doručen vypínači jedné fáze a došlo tak k vypnutí pouze dvou fází. Následkem byl vznik nesymetrických poměrů na vlastní spotřebě elektrárny.

Na tento stav zareagovaly ochrany čerpadel zajišťující residuální chlazení paliva během odstávky. Zároveň však nedošlo ke stejnému vyhodnocení ochranami spouštějícími dieselgenerátory, na nouzové napájení nebyla vlastní spotřeba přepnuta a palivo nebylo chlazeno. Celá situace byla vyřešena obdobně jako v elektrárně Byron až po několika minutách ručním zásahem operátorů. Protože v tomto případě byla elektrárna již odstavena, tak by bez zajištění chlazení k přehřátí chladiva došlo až v řádu dnů [4].

## 3.2 Vlastní spotřeba Jaderné elektrárny Temelín

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.1, vlastní spotřeba elektrárny Temelín je napájena odbočkovými transformátory, které jsou napájeny vlastním generátorem při provozu nebo linkou 400 kV a blokovým transformátorem při odstávce (které při chodu generátoru slouží k vyvedení výkonu) z rozvodny 400 kV Kočín. Tento způsob napájení je označován jako pracovní. Jako zdroj rezervního napájení slouží rezervní transformátory, které jsou napájeny vlastní linkou 110 kV z rozvodny 110 kV Kočín. Dalším možným nouzovým zdrojem napájení jsou dieselgenerátory, vyhodnocování poruchy přerušení fáze při jejich běhu by však bylo odlišné a zaměřovalo by se na analýzu chování těchto dieselgenerátorů a jejich ochran. To není cílem této práce a tímto případem se dále nebudu zabývat.

Na spolehlivost napájení vlastní spotřeby jaderných elektráren jsou kladeny vysoké nároky, zejména kvůli nutnosti nepřetržitého odvodu tepla z aktivní zóny reaktoru ve všech provozních i mimořádných stavech. Zajištění napájení rozveden vlastní spotřeby a dalších připojených zařízení je monitorováno systémem elektrických ochran a díky napojeným automatickým řídicím systémům nedojde ke ztrátě napájení i při různých poruchových stavech a jejich kombinacích.



Obr. 10 – Zjednodušené schéma napájení vlastní spotřeby bloku Jaderné elektrárny Temelín

### 3.2.1 Známé parametry prvků vlastní spotřeby potřebné pro výpočet

Jak je zřejmé z Obr. 10, je vlastní spotřeba pomocí dvou trojvinutových odbočkových transformátorů rozdělena mezi čtyři rozvodny (BA, BB, BC, BD). Modelové zatížení rozveden vlastní spotřeby je během odstávky:

- Rozvodna BA:  $P_{BA} = 2,6 \text{ MW}, Q_{BA} = 1,5 \text{ MVar}, S_{BA} = 2,6 + 1,5j \text{ MVA}$  (37)

- Rozvodna BB:  $P_{BB} = 0 \text{ MW}, Q_{BB} = 0 \text{ MVar}, S_{BB} = 0 \text{ MVA}$  (38)

- Rozvodna BC:  $P_{BC} = 2,9 \text{ MW}, Q_{BC} = 1,9 \text{ MVar}, S_{BC} = 2,9 + 1,9j \text{ MVA}$  (39)

- Rozvodna BD:  $P_{BD} = 0 \text{ MW}, Q_{BD} = 0 \text{ MVar}, S_{BD} = 0 \text{ MVA}$  (40)

Rozvodny BB a BD nejsou významně zatíženy a ve výpočtu nebudou zahrnuty. U rozvodu BA a BC je možné určit impedance pro souslednou složku, pokud předpokládáme při tomto zatížení jmenovité napětí  $U_n = 6,3 \text{ kV}$  na těchto rozvodnách:

$$Z_{BA} = \frac{U_n^2}{S_{BA}^*} = \frac{6,3^2}{2,6 - 1,5j} = 11,45 + 6,61j \Omega \quad (41)$$

$$Z_{BC} = \frac{U_n^2}{S_{BC}^*} = \frac{6,3^2}{2,9 - 1,9j} = 9,58 + 6,27j \Omega \quad (42)$$

Při jmenovitém provozu mimo odstávku je zatížení následující:

- Rozvodna BA:  $P_{BA} = 11,2 \text{ MW}, Q_{BA} = 6,4 \text{ MVar}, S_{BA} = 11,2 + 6,4j \text{ MVA}$  (43)

- Rozvodna BB:  $P_{BB} = 11,8 \text{ MW}, Q_{BB} = 9,1 \text{ MVar}, S_{BB} = 11,8 + 9,1j \text{ MVA}$  (44)

- Rozvodna BC:  $P_{BC} = 9,9 \text{ MW}, Q_{BC} = 6,3 \text{ MVar}, S_{BC} = 9,9 + 6,3j \text{ MVA}$  (45)

- Rozvodna BD:  $P_{BD} = 12,2 \text{ MW}, Q_{BD} = 9,4 \text{ MVar}, S_{BD} = 12,2 + 9,4j \text{ MVA}$  (46)

A sousledné impedance jsou následující:

$$Z_{BA} = \frac{U_n^2}{S_{BA}^*} = \frac{6,3^2}{11,2 - 6,4j} = 2,67 + 1,53j \Omega \quad (47)$$

$$Z_{BB} = \frac{U_n^2}{S_{BB}^*} = \frac{6,3^2}{11,8 + 9,1j} = 2,11 + 1,63j \Omega \quad (48)$$

$$Z_{BC} = \frac{U_n^2}{S_{BC}^*} = \frac{6,3^2}{9,9 - 6,3j} = 2,85 + 1,82j \Omega \quad (49)$$

$$Z_{BD} = \frac{U_n^2}{S_{BD}^*} = \frac{6,3^2}{12,2 - 9,4j} = 2,04 + 1,57j \Omega \quad (50)$$

Parametry blokového transformátoru (BT) jsou:

- Jmenovitý výkon: 3x400 MVA
- Převod napětí: 24 / 420 kV
- Převod proudu: 16666 / 1650 A
- Spojení vinutí: YNd1
- Napětí nakrátko: 14 % ± 10 %
- Ztráty nakrátko: 750 kW + 10 %

Parametry odbočkového transformátoru (OT) jsou:

- Jmenovitý výkon: 63 / 31,5 / 31,5 MVA
- Převod napětí: 24 ± 4x4 % / 6,3 / 6,3 kV
- Převod proudu: 1516 / 2887 / 2887 A
- Spojení vinutí: Dd0d0
- Napětí nakrátko: 8,57 / 8,75 / 16,6 %

- Ztráty nakrátko: 123,7 / 128,2 / 277,2 kW

Parametry rezervního transformátoru (RT) jsou:

- Jmenovitý výkon: 63 / 31,5 / 31,5 MVA
- Převod napětí: 110 ± 4x4 % / 6,3 / 6,3 kV
- Převod proudu: 331 / 2887 / 2887 A
- Spojení vinutí: YNd1d1
- Napětí nakrátko: 9,34 / 9,25 / 18,44 %
- Ztráty nakrátko: 122,1 / 117,3 / 271,1 kW

Soustava vlastní spotřeby na úrovni 6,3 kV je provozována jako nepřímá uzemněná, to znamená, že na každé rozvodně (BA, BB, BC, BD) je uzemňovací transformátor se zapojením vinutí YNd11. Uzel primární hvězdy těchto transformátorů je přizemněn přes odpor 100 Ω. Sekundární strana pracuje naprázdno.

Parametry uzemňovacího transformátoru (UT) jsou:

- Jmenovitý výkon: 231 kVA
- Převod napětí: 6 000 ± 2,5 % / 77 V
- Převod proudu: 22,2 / 1732 A
- Spojení vinutí: YNd11
- Napětí nakrátko: 9,4 %

Parametry odporníku jsou:

- Odpor: 100 ± 3 % Ω
- Napětí: 6 000 V
- Proud: 60 A / 10 s

Soustava 400 kV i 110 kV bude uvažována jako tvrdá, tedy držící stále konstantní napětí. Protože zde nejsou počítány zkratové proudy, ale nesymetrické proudy přibližně odpovídající normálním proudům vlastní spotřeby, bude pro rozvodnu 400 kV Kočín i 110 kV Kočín odběr oproti ostatním odběrům téměř zanedbatelný a změna napětí v rozvodně zcela nevýznamná.

Dále jsou potřebné parametry vedení 400 kV i 110 kV, parametry pro netočivou složku nejsou však snadno dostupné, a proto budou vypočítány ze známých typů stožárů a vodičů:

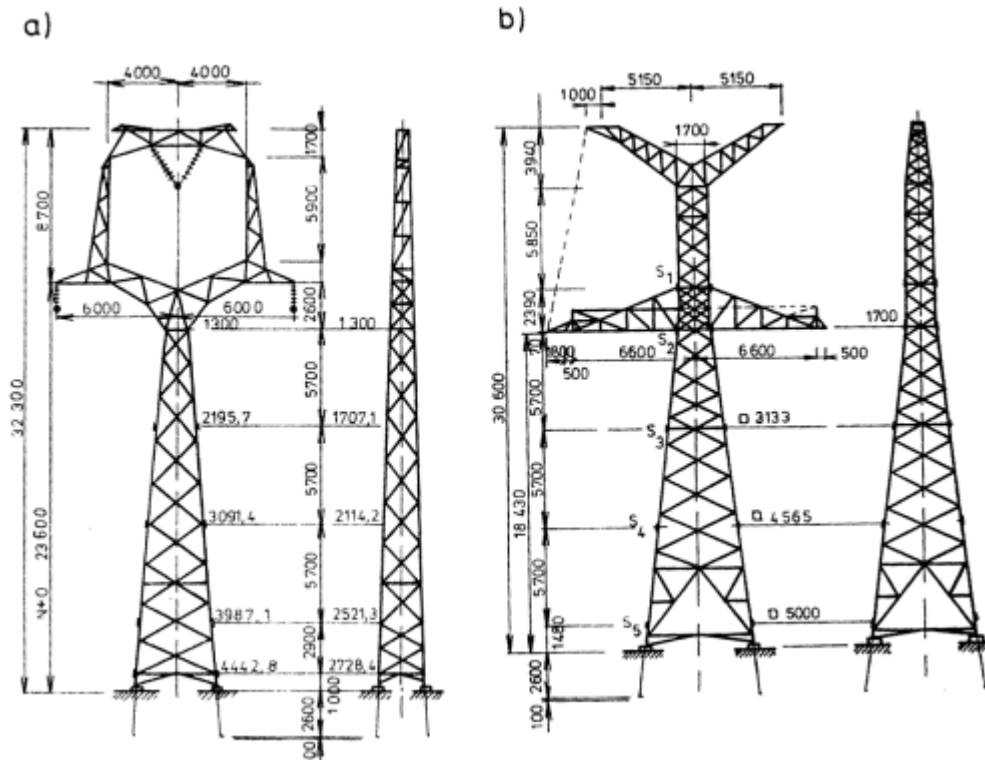
Vedení 400 kV:

- Délka trasy: 3 km
- Typ stožáru: Delta
- Typ fázového vodiče: 3 x trojsvazek AlFe 450/52
- Poloměr vodiče AlFe 450/52: 14,7 mm
- Vzdálenost vodičů svazkového vodiče: 0,4 m
- Typ zemnicího lana: 1 x AlFe 180/59, 1 x OPWG/24 (s optickými vlákny)
- Poloměr zemnicích lan: 10,2 mm

- Rezistance zemního lana: 0,167 Ω/km
- Délka závěsu izolátorů: 3 m

Znamé sousledné parametry vedení:

- Sousledná provozní reaktance: 0,2974 Ω/km
- Sousledná provozní rezistance: 0,02153 Ω/km



Obr. 11 – Stožár Delta použitý pro vedení 400 kV na trase Temelín-Kočín (a-nosný, b-výztužný) [9]

Dosažením těchto hodnot a vzdáleností z Obr. 11 do vzorců z kap. 2.2.3 určím nejprve souslednou a zpětnou impedanci, následně i netočivou impedanci tohoto vedení:

- Rezistance trojsvazku:  $R_p = 0,02153 \Omega/\text{km}$  (51)

- Ekvivalentní činitel  $\xi$ :  $\xi_e = \sqrt[3]{\xi} = \sqrt[3]{0,81} = 0,932$  (52)

- Poloměr svazku:  $R = \frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,231 \text{ m}$  (53)

- Ekvivalentní poloměr:  $r_e = 0,231 \sqrt[3]{\frac{3}{0,231} \cdot 0,0147} = 0,133 \text{ m}$  (54)

- Střední geometrická vzdálenost fází:  $d_s = \sqrt[3]{12 \cdot (6^2 + 8,7^2)} = 11,0 \text{ m}$  (55)

- Sousledná a zpětná reaktance:  $X_1 = X_2 = 0,145 \log \frac{11}{0,932 \cdot 0,133} = 0,283 \Omega/\text{km}$  (56)

Vypočítaná hodnota sousledné reaktance (56) se od známé hodnoty liší pouze o 5 %, což je pro další výpočty zejména orientačního charakteru přesnost dostatečná. Dále bude počítáno s hodnotou sousledné reaktance dodané v podkladech k práci (0,2974 Ω/km), tento



výpočet sloužil pouze k validaci tohoto postupu z konfigurace stožárů. Výpočet netočivé impedance tohoto vedení:

- $X_0$  bez zemnicích lan:  $X_{0bez} = 0,145 \log \frac{1000^3}{0,932 \cdot 0,133 \cdot 11^2} = 1,134 \Omega/\text{km}$  (57)

- $Z_0$  bez zemnicích lan:  $Z_{0bez} = R_v + 3R_g + j X_{0bez} = 0,172 + 1,134j \Omega/\text{km}$  (58)

- Vlastní reaktance lan:  $X_{2z} = 0,145 \log \frac{1000}{\sqrt{0,0102 \cdot 8}} = 0,514 \Omega/\text{km}$  (59)

- Vlastní impedance lan:  $Z_{2z} = \frac{R_z}{2} + R_G + j \cdot X_{2z} = 0,133 + 0,514j \Omega/\text{km}$  (60)

- Vzdálenost lan a fází:  $d_z = \sqrt[6]{(4^2 + 3^2)(2^2 + 11,7^2)(6^2 + 11,7^2)} = 9,21 \text{ m}$  (61)

- Vzájemná reaktance lan a fází:  $X_{m2z} = 0,145 \log \frac{1000}{9,21} = 0,295 \Omega/\text{km}$  (62)

- Vzájemná impedance lan a fází:  $Z_{m2z} = R_G + j \cdot X_{m2z} = 0,05 + 0,295j \Omega/\text{km}$  (63)

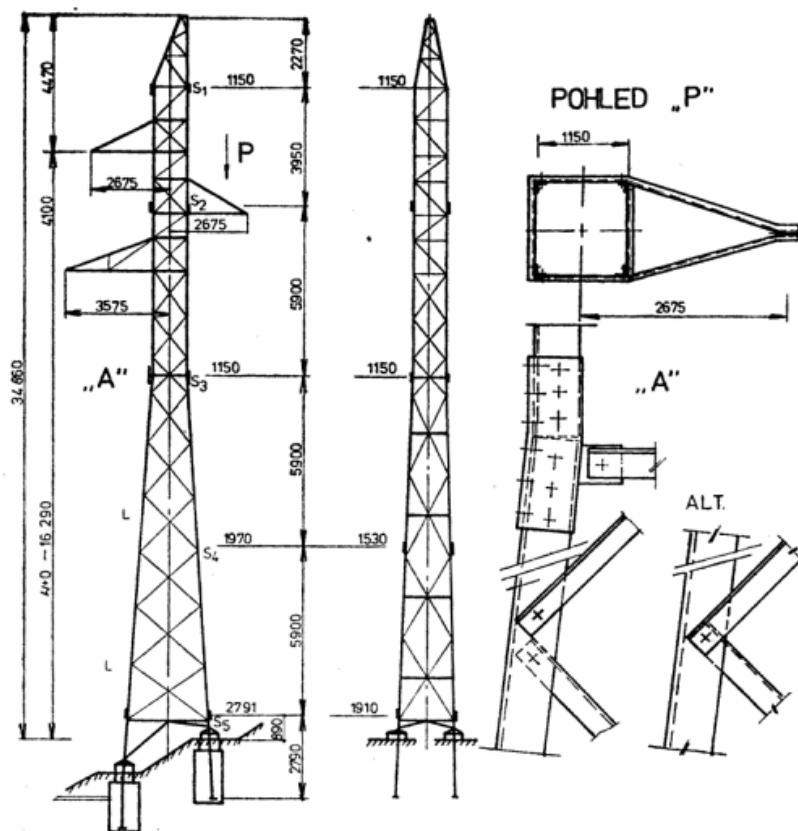
- Netočivá impedance:  $Z_{0v400} = Z_{0bez} - 3 \frac{Z_{m2z}^2}{Z_{2z}} = 0,13 + 0,629j \Omega/\text{km}$  (64)

Vedení 110 kV:

- Délka trasy: 3 km
- Typ stožáru: Soudek s vynecháním konzol
- Typ fázového vodiče: 3 x AIFe 680/83
- Poloměr vodiče AIFe 680/83: 17,9 mm
- Typ zemnicího lana: 1 x AIFe 180/59
- Poloměr zemnicího lana: 10,2 mm
- Délka závěsu izolátorů: 2 m

Znamé sousledné parametry vedení:

- Sousledná provozní reaktance: 0,3661  $\Omega/\text{km}$
- Sousledná provozní rezistance: 0,0424  $\Omega/\text{km}$



Obr. 12 – Stožár Soudek s vynecháním konzol použitý pro vedení 110 kV na trase Temelín-Kočín [9]

Tyto hodnoty a vzdálenosti z Obr. 12 opět dosadím do vzorců z kap. 2.2.3 a určím nejprve souslednou a zpětnou impedanci, následně i netočivou impedanci tohoto vedení:

- Rezistance vodiče:  $R_v = 0,0424 \Omega/\text{km}$  (65)

- Střední geometrická vzdálenost fází:  $d_s = \sqrt[6]{(0,9^2 + 3,6^2) \cdot (6,2^2 + 1,7^2) \cdot (5,3^2 + 1,7^2)}$  (66)  
 $d_s = 5,1 \text{ m}$

- Sousledná a zpětná reaktance:  $X_1 = X_2 = 0,145 \log \frac{5,23}{0,81 \cdot 0,0179} = 0,369 \Omega/\text{km}$  (67)

Zde se hodnota sousledné reaktance od známé hodnoty liší dokonce jen o 1 %, opět tak lze tento postup výpočtu s touto konfigurací stožárů považovat za správný. Výpočet netočivé impedance tohoto vedení:

- $X_0$  bez zemnicích lan:  $X_{0bez} = 0,145 \log \frac{1000^3}{0,81 \cdot 0,0179 \cdot 5,1^2} = 1,37 \Omega/\text{km}$  (68)

- $Z_0$  bez zemnicích lan:  $Z_{0bez} = R_v + 3R_g + j X_{0bez} = 0,193 + 1,37j \Omega/\text{km}$  (69)

- Vlastní reaktance lana:  $X_z = 0,145 \log \frac{1000}{0,81 \cdot 0,0102} = 0,737 \Omega/\text{km}$  (70)

- Vlastní impedance lana:  $Z_z = R_z + R_G + j \cdot X_z = 0,217 + 0,737j \Omega/\text{km}$  (71)

- Vzdálenost lana a fází:  $d_z = \sqrt[6]{(6,5^2 + 2,7^2)(8,2^2 + 2,7^2)(9,9^2 + 3,6^2)}$  (72)  
 $d_z = 8,62 \text{ m}$

- Vzájemná reaktance lana a fází:  $X_{mz} = 0,145 \log \frac{1000}{8,62} = 0,299 \Omega/\text{km}$  (73)

- Vzájemná impedance lana a fází:  $Z_{mz} = R_G + j \cdot X_{mz} = 0,05 + 0,299j \Omega/\text{km}$  (74)

- Netočivá impedance:  $Z_{0v110} = Z_{0bez} - 3 \frac{Z_{mz}^2}{Z_z} = 0,177 + 1,007j \Omega/\text{km}$  (75)

### 3.3 Elektrické ochrany ETE a jejich nastavení

Účelem elektrických ochran je chránit elektrická zařízení před nepříznivými důsledky abnormálních provozních stavů. Elektrické ochrany jsou navrženy vždy tak, aby se oblasti chránění vzájemně překrývaly. Pro nejvážnější druhy poruch musí být každé zařízení (chráněný úsek) vybaveno hlavní ochranou, která zajistí selektivní vypnutí. Při selhání hlavní ochrany musí zajistit vypnutí poruchy místní nebo vzdálená záložní ochrana. Ta působí s delší dobou působení a není od ní vyžadována stoprocentní selektivita, může tedy vypnout i více zařízení (chráněných úseků) než by bylo nezbytně nutné. V případě méně závažných poruchových stavů (přetížení, nesymetrie) je úkolem ochran předat informaci signalizováním na příslušná místa [10].

Porucha přerušení fáze způsobuje nesymetrie a mění proudové a napěťové poměry ve fázích, může být tedy detekována jako nesymetrie, jako proudové přetížení (ne ve všech fázích), tak jako podpětí (ne ve všech fázích). Dále se proto budu zabývat ochranami, které jsou určeny k odhalování nesymetrií, přetížení a podpětí a jejich funkci budu dále analyzovat.

V práci předpokládám, že nedojde k poruše přerušení fáze na vyvedení výkonu z elektrárny. Proto zde nebudou zahrnuty ochrany chránící proti nesymetrii generátor, protože nesymetrie bude pouze na vlastní spotřebě, která činí přibližně 5 % vyráběného výkonu. Z možných elektrických ochran se proto zaměřím na ochrany chránící vedení 110 kV a 400 kV (případá v úvahu pouze při odstávce), poté na ochrany chránící transformátory a samotnou vlastní spotřebu.

#### 3.3.1 Ochrany vedení 400 kV

Hlavní ochrana vedení 400 kV je podélná rozdílová ochrana, která srovnává amplitudy i fáze proudů v jednotlivých fázových vodičích. Proud je měřen v průchodkách blokového transformátoru a na vývodu 400 kV z rozvodny Kočín, komunikace je zajištěna optickou (záloha metalickou) cestou. Tato ochrana slouží jako hlavní ochrana před zkraty na vedení vyvedení výkonu 400 kV. Ochrana není doplněna o vzájemné srovnání proudů v jednotlivých fázích, proudovou nesymetrii při přerušení fáze na vedení proto nedokáže nijak rozpoznat.

Ochrana je zálohována distanční (impedanční) ochranou, která měří impedanci smyčky směrem z rozvodny Kočín. Zkrat je zde detekován poklesem impedance (poměru napětí a proudu), při selhání rozdílové ochrany působí se zpožděním tato ochrana. Při přerušení fáze

dojde k velkému nárůstu impedance jedné smyčky (kvůli nulovému proudu touto fází), zafungování ochrany zde bude záležet na jejím konkrétním nastavení na tento stav [10].

### **3.3.2 Ochrany blokového transformátoru**

Blokový transformátor je vybaven dvěma rozdílovými ochranami (hlavní a záložní), které fungují stejně jako rozdílové ochrany vedení. Ty zde také nejsou doplněny vzájemným porovnáním naměřených fázových proudů, nesymetrie proto odhalit nedokážou. Dále je transformátor vybaven nadproudovou ochranou, která však vzhledem k malým proudům při odstávce oproti jmenovitým proudům při provozu nemůže zvýšení proudů vlivem nesymetrie zaznamenat. Nadproudová ochrana nádoby také z principu své funkce nesymetrie nemůže nijak detekovat. Dále je zde i nadproudová ochrana směrem na stranu vlastní spotřeby při vypnutém vypínači, ta by nesymetrii z principu funkce bez doplnění také neměla poznat.

Poruchu by mohla odhalit nadproudová ochrana v nulovém uzlu transformátoru, která je primárně určena jako záložní ochrana jednofázových zkratů. Při přerušení fáze budou protékající proudy řádově menší než při zkratu a bude záležet na nastavení citlivosti dané ochrany a aktuálním zatížení vlastní spotřeby [10].

### **3.3.3 Ochrany odbočkového transformátoru**

Hlavní ochranou odbočkového transformátoru je také rozdílová ochrana, která měří fázové proudy na primární straně a na všech vývodech rozveden příslušných danému transformátoru. Jako záloha je distanční (impedanční) ochrana, která se „dívá“ ze strany vyššího napětí (24 kV) směrem přes transformátor na stranu nižšího napětí (6,3 kV). Pro tyto ochrany a detekci nesymetrických poměrů v síti platí stejné závěry jako u blokového transformátoru [10].

### **3.3.4 Ochrany rezervního transformátoru**

Linka 110 kV rezervního napájení je chráněna impedanční ochranou, hlavní ochrana samotného transformátoru je opět rozdílová ochrana, záložní ochranou je primární impedanční ochrana. Oba vývody z transformátoru jsou chráněny vlastními (sekundárními) impedančními ochranami. Dále je rezervní transformátor vybaven nadproudovou ochranou ze strany primárního vinutí, nadproudovou nádobovou zemní ochranou. Pro ochrany platí opět obdobné předpoklady uvedené výše [10].

### **3.3.5 Ochrany rozveden vlastní spotřeby a spotřebičů**

Pracovní i rezervní přívody rozveden jsou chráněny impedančními a proudovými ochranami. Dále jsou vývody na transformátory 6,3/0,4 kV chráněny ochranami proti nadproudu, zkratu, proudovou zemní ochranou a automatikou selhání vypínačů. Vývody k pohonům jsou chráněny ochranou nadproudou, zkratovou, proudovou zemní ochranou a zpožděnou ochranou proti nesymetrii. Největší pohony jsou navíc chráněny ještě rozdílovou

ochranou. Pokud se tedy nesymetrie projeví i na rozvodně vlastní spotřeby 6,3 kV, pak by měla zpožděná ochrana proti nesymetrii u těchto pohonů zapůsobit [10].

### **3.3.6 Podpět'ové vypínání**

Různé spotřebiče vlastní spotřeby jsou rozděleny do skupin, které jsou odpojeny při trvání daného podpětí po danou dobu. První skupina podpět'ového vypínání reaguje na podpětí 0,6 násobku jmenovitého napětí po dobu 0,5 s. Při nesymetrické poruše dochází k různým poklesům napětí v různých fázích, proto je zde rozhodující způsob měření (fázové nebo sdružené napětí) a vyhodnocení (1 ze 3, 2 ze 3 nebo 3 ze 3) [10].

### **3.3.7 Automatika zásoku rezervy**

Automatika zásoku rezervy zjišťuje, zda je na rezervním napájení napětí minimálně 0,8 násobku jmenovitého. Zde bude opět velmi záležet na způsobu měření a vyhodnocení, jak při nesymetrických stavech tato automatika zafunguje [10].

## 4 Postup výpočtu poruchy přerušení fáze

V této části budu vycházet z teoretických předpokladů odvozených pro poruchy přerušení fáze a z uvedených parametrů elektrických zařízení, přes které je vlastní spotřeba ETE napájena. K následnému výpočtu zde bude uvedeno několik zjednodušujících předpokladů, které budou jednotlivě rozebrány.

### 4.1 Zjednodušující předpoklady pro výpočet

Vzhledem ke změnám napěťových a proudových poměrů transformátory je nutné provádět výpočet v poměrných jednotkách. Jako vztažné hodnoty si zvolím vztažné napětí 6,3 kV, protože pro výsledky bude důležité vztahování k napěťovým poměrům na rozvodnách vlastní spotřeby, a vztažný výkon 126 MVA, protože je to dvojnásobek jmenovitého výkonu odbočkového i rezervního transformátoru, tedy maximální možný zdánlivý výkon dvojice transformátorů napájející vlastní spotřebu. Proud v poměrných jednotkách bude při hodnocení poruchy vždy vztahován k proudu v bezporuchovém stavu, proto zde volba velikosti vztažného výkonu nehraje nijak významnou roli.

Převody transformátorů s možností přepínání odboček ponechám na základních hodnotách tak, aby napěťové hladiny transformátorů navazovaly, což zjednoduší výpočet v poměrných jednotkách. Ve skutečnosti jsou při různém zatížení přepnuty na transformátorech různé odbočky, což však pouze mírně změní velikost napětí i proudu na rozvodnách vlastní spotřeby. Protože při všech výpočtech budu provádět srovnání i se stavem bez poruchy, mohu výsledek s bezporuchovým stavem porovnat a tím určit relativní změnu parametrů. Podle velikosti napětí v bezporuchovém stavu určím, jak je pokles napětí významný a jak velké chyby se zanedbáním přepínání odboček dopustím. Pro většinu případů předpokládám, že vliv tohoto zjednodušení nebude příliš vysoký a pro zjednodušené určení napěťových a proudových parametrů bude zanedbatelný.

Soustavy 400 kV a 110 kV budu uvažovat jako zdroj tvrdého symetrického napětí. Protože při přerušení fáze nedochází na rozdíl od zkratu k dramatické změně odebíraného výkonu, lze k tomuto zjednodušení přistoupit. Větší vliv na výpočet bude mít kolísání napětí v soustavě. To ve výpočtu nebude zohledněno a bude vždy počítáno s napětím 420 kV u soustavy 400 kV a 110 kV u soustavy 110 kV. Tyto hodnoty byly zvoleny opět pro návaznost na napěťové hladiny transformátorů tak, aby v obou případech bylo poměrné napětí soustavy 1. Rozdílné napětí v síti oproti těmto hodnotám je ve skutečnosti také kompenzováno přepínáním odboček, jehož problematika je popsána v předchozím odstavci. Ve výsledku se sice jiné napětí v síti a přepnutí odbočky vykompenzuje, vliv to ale bude mít na úbytek napětí na transformátoru a vedení, při výpočtu tedy na jiné impedance vedení a transformátorů v poměrných jednotkách. Tato změna bude pro zjednodušení výpočtu také zanedbána, kvůli maximálnímu dovolenému kolísání napětí v síti však tato chyba nemůže překročit 5 %.

Při běžném provozu a napájení vlastní spotřeby odbočkovým transformátorem bude jako zdroj tvrdého symetrického napětí 24 kV brán přímo generátor. Protože se práce nezabývá přerušením fáze na vyvedení výkonu, ale pouze na napájení vlastní spotřeby, nebude zde třeba vůbec uvažovat díky tomuto zjednodušení vliv soustavy 400 kV a vyvedení výkonu. Proměnné napětí generátoru je opět vykompenzováno přepínáním odboček a platí proto stejné úvahy jako v předchozím odstavci.

Dalším zjednodušením je sloučení čtyř (příp. dvou) aktivních rozveden vlastní spotřeby, takže bude při výpočtu počítáno pouze s jednou impedancí příslušného transformátoru a jednou impedancí vlastní spotřeby (Obr. 14 a Obr. 15). Tím dojde k zanedbání nerovnoměrného rozložení odběrů v jednotlivých rozvodnách, které ale příliš významné není (viz 3.2.1). Díky tomu tak budou vyšetřovány dopady při poruše na všech rozvodnách zároveň. Při poruše pouze na jedné rozvodně se bude rozložení proudů mezi rozvodnami lišit, a tím budou jiné úbytky napětí na prvcích, kterými společný proud všech rozveden prochází (všechny mimo sekundární vinutí odbočkového/rezervního transformátoru). Při následujících výpočtech se ukáže, že významnější část úbytků napětí je právě na těchto sekundárních vinutích a že zbylé úbytky, které se mohou lišit, jsou zanedbatelné.

## 4.2 Parametry prvků

Určení parametrů v poměrných jednotkách vychází ze vztažení skutečné fyzikální impedance daného prvku ke vztažné impedanci. Pokud mezi místem se zvoleným vztažným napětím a prvkem je transformátor, je nutné převést tyto hodnoty ještě převodem přes transformátor. Při návaznosti napěťových hladin transformátorů (což je v našem případě splněno) se vztahy pro přepočet výrazně zjednoduší.

### Vztažné hodnoty:

- Vztažný výkon:  $S_v = 126 \text{ MVA}$  (76)

- Vztažné napětí:  $U_v = 6,3 \text{ kV}$  (77)

- Vztažná impedance:  $Z_v = \frac{U_v^2}{S_v} = \frac{6,3^2}{126} = 0,315 \Omega$  (78)

- Vztažný proud:  $I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = \frac{126}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 11,5 \text{ kA}$  (79)

### Vzorce pro výpočet poměrných parametrů:

- Poměrná impedance mezi dvěma vinutími transformátoru T:

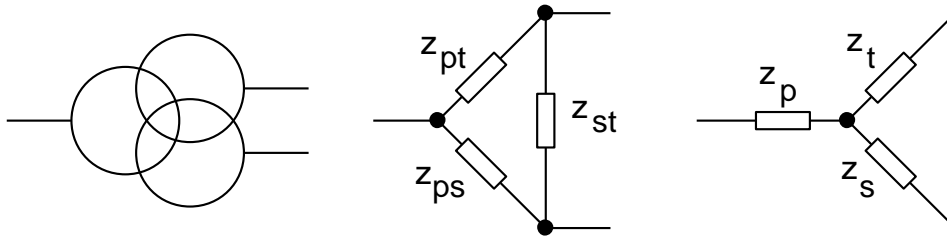
$$z_T = \frac{P_{kT}}{S_T} \cdot \frac{S_v}{S_T} + j \cdot \sqrt{\left(u_{kT} \cdot \frac{S_v}{S_T}\right)^2 - \left(\frac{P_{kT}}{S_T} \cdot \frac{S_v}{S_T}\right)^2}, \quad (80)$$

kde  $P_{kT}$  jsou ztráty nakrátko mezi vinutími,  $S_T$  je jmenovitý výkon sekundárního (příp. terciárního) vinutí a  $u_{kT}$  je napětí nakrátko mezi příslušnými vinutími.

Trojvinuťové transformátory mají tři vinutí pro každou fázi (p – primární, s – sekundární a t – terciární) a parametry nakrátko se u nich udávají mezi dvojicemi vinutí. Výpočet u nich

probíhá stejně jako u dvojvinuťových podle vzorce (80), poté je třeba pro zjednodušení náhradního schématu provést následující transformaci impedancí (Obr. 13):

$$z_p = \frac{z_{ps} + z_{pt} - z_{st}}{2}, \quad z_s = \frac{z_{ps} + z_{st} - z_{pt}}{2}, \quad z_t = \frac{z_{pt} + z_{st} - z_{ps}}{2} \quad (81)$$



Obr. 13 – Schéma transformace impedancí u trojvinuťového transformátoru

- Poměrná impedance vedení:

$$z_{VED} = Z_{VED} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_{VED}^2}, \quad (82)$$

kde  $Z_{VED}$  je impedance kilometru vedení,  $l$  je délka vedení a  $U_{VED}$  je jmenovité napětí vedení.

### Výpočet poměrných parametrů:

Poměrná impedance transformátoru se určí dosazením uvedených štítkových hodnot do vzorce (80), u trojvinuťových transformátorů je navíc provedena transformace podle (81).

Blokový transformátor (BT):

- Jmenovitý výkon:  $S_{BT} = 3 \cdot 400 \text{ MVA} = 1200 \text{ MVA}$  (83)
- Napětí nakrátko:  $u_{kBT} = 0,14$  (84)
- Ztráty nakrátko:  $P_{kBT} = 750 \text{ kW} = 0,75 \text{ MW}$  (85)
- Poměrná impedance:  $z_{BT} = 6,56 \cdot 10^{-5} + 1,47 \cdot 10^{-2} \cdot j$  (86)

Odbočkový transformátor (OT):

- Jmenovitý výkon:  $S_{pOT} = 63 \text{ MVA}$   
 $S_{sOT} = 31,5 \text{ MVA}$   
 $S_{tOT} = 31,5 \text{ MVA}$  (87)
- Napětí nakrátko:  $u_{kpsOT} = 0,0857$   
 $u_{kptOT} = 0,0875$   
 $u_{kstOT} = 0,166$  (88)
- Ztráty nakrátko:  $P_{kpsOT} = 0,1237 \text{ MW}$   
 $P_{kptOT} = 0,1282 \text{ MW},$   
 $P_{kstOT} = 0,1237 \text{ MW}$  (89)
- Poměrná impedance:  $z_{pOT} = -0,0016^* + 0,0145 j$   
 $z_{sOT} = 0,0173 + 0,328 j$   
 $z_{tOT} = 0,0179 + 0,335 j$  (90)

Rezervní transformátor (RT):

- Jmenovitý výkon:  $S_{pRT} = 63 \text{ MVA}$   
 $S_{sRT} = 31,5 \text{ MVA}$   
 $S_{tRT} = 31,5 \text{ MVA}$  (91)



- Napětí nakrátko:  $u_{kpsRT} = 0,0934$   
 $u_{kptRT} = 0,0925$  (92)  
 $u_{kstRT} = 0,1844$
- Ztráty nakrátko:  $P_{kpsRT} = 0,1221$  MW  
 $P_{kpsRT} = 0,1173$  MW, (93)  
 $P_{kstRT} = 0,2711$  MW
- Poměrná impedance:  $z_{pRT} = -0,002^* + 0,0031$  j  
 $z_{sRT} = 0,0175 + 0,370$  j (94)  
 $z_{tRT} = 0,0169 + 0,366$  j

\* Reálná část impedance zde vyšla záporná, což se jeví jako fyzikální nesmysl, protože však tato impedance odpovídající primárnímu vinutí musí být vždy v sérii s impedancí sekundárního nebo terciárního vinutí, tak výsledná reálná část impedance bude vždy kladná a měla by odpovídat fyzikálním vlastnostem v příslušném zapojení.

U vedení určím poměrné sousledné, a netočivé impedance (zpětná je stejná jako sousledná) z impedancí vedení určených v kap. 3.2.1 dle vzorce (82):

Vedení 400 kV (v400):

- Délka vedení:  $l = 3$  km (95)
- Sousledná impedance:  $Z_{1v400} = 0,0215 + 0,2974j$   $\Omega$ /km (96)
- Netočivá impedance:  $Z_{0v400} = 0,1301 + 0,6293j$   $\Omega$ /km (97)
- Poměrná sousledná:  $z_{1v400} = 5,08 \cdot 10^{-5} + 7,026 \cdot 10^{-4}$  j (98)
- Poměrná netočivá:  $z_{0v400} = 3,07 \cdot 10^{-4} + 1,487 \cdot 10^{-3}$  j (99)

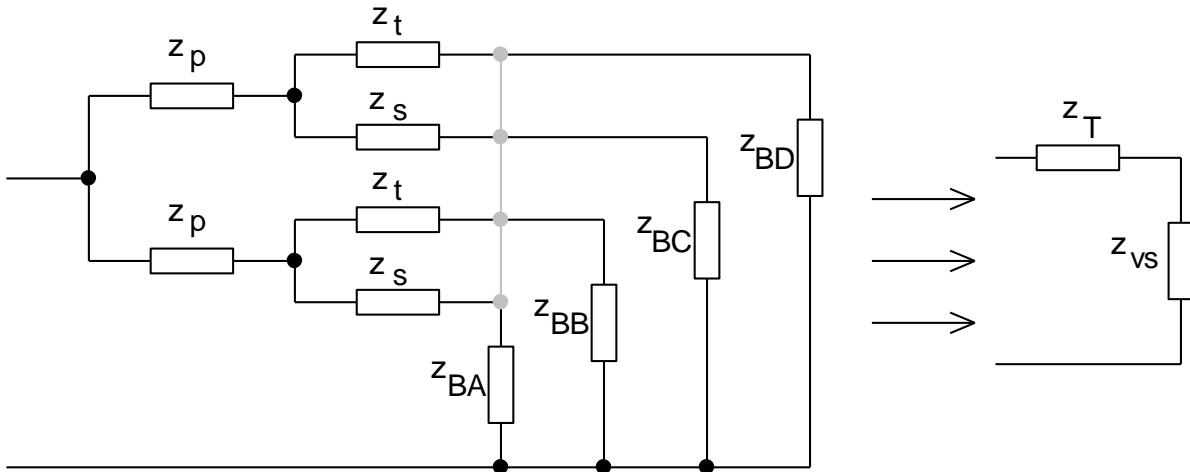
Vedení 110 kV (v110):

- Délka vedení:  $l = 3$  km (100)
- Sousledná impedance:  $Z_{1v110} = 0,0425 + 0,3661j$   $\Omega$ /km (101)
- Netočivá impedance:  $Z_{0v110} = 0,1812 + 0,9794j$   $\Omega$ /km (102)
- Poměrná sousledná:  $z_{1v110} = 1,33 \cdot 10^{-3} + 1,144 \cdot 10^{-2}$  j (103)
- Poměrná netočivá:  $z_{0v110} = 5,66 \cdot 10^{-3} + 3,060 \cdot 10^{-2}$  j (104)

### 4.3 Model vlastní spotřeby

Model vlastní spotřeby vychází z uvedeného zjednodušujícího předpokladu, že bude zanedbáno nesymetrické zatížení jednotlivých rozvodů vlastní spotřeby. Díky tomu lze vytvořit teoretické spojení (Obr. 14 a Obr. 15 světle šedou) mezi jednotlivými aktivními rozvodnami a můžeme tak shrnout impedanci vlastní spotřeby a impedanci předřazeného trojvinuťového transformátoru (odbočkového či rezervního, dle způsobu napájení). Protože jsou během provozu aktivní čtyři rozvodny, ale během odstávky jsou významně zatíženy pouze dvě, budou se lišit pro tyto režimy i impedance transformátorů.

### 4.3.1 Model sousledné složky



Obr. 14 – Zjednodušení impedancí při provozu

Výpočet poměrných sousledných impedancí při provozu (jak plyne z Obr. 14):

- vlastní spotřeby: 
$$z_{1VS} = \frac{1}{Z_V} \cdot \frac{1}{\frac{1}{Z_{BA}} + \frac{1}{Z_{BB}} + \frac{1}{Z_{BC}} + \frac{1}{Z_{BD}}} \quad (105)$$

$$z_{1VS} \doteq 1,89 + 1,31j$$

- odbočkového transformátoru: 
$$z_{1OT} = \frac{1}{2} \left( z_{pOT} + \frac{z_{sOT} \cdot z_{tOT}}{z_{sOT} + z_{tOT}} \right) \quad (106)$$

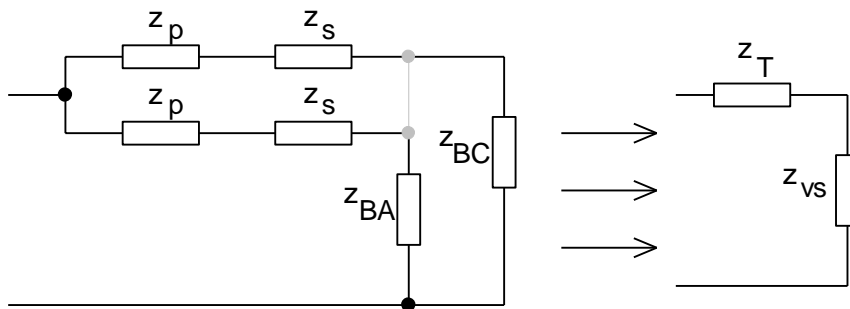
$$z_{1OT} \doteq 0,0036 + 0,0901j$$

- rezervního transformátoru: 
$$z_{1RT} = \frac{1}{2} \left( z_{pRT} + \frac{z_{sRT} \cdot z_{tRT}}{z_{sRT} + z_{tRT}} \right) \quad (107)$$

$$z_{1RT} \doteq 0,0033 + 0,0936j$$

- Součet VS a OT: 
$$z_{1VS+OT} \doteq 1,89 + 1,40j \doteq 2,35 \cdot e^{0,637j} \quad (108)$$

- Součet VS a RT: 
$$z_{1VS+RT} \doteq 1,89 + 1,40j \doteq 2,35 \cdot e^{0,637j} \quad (109)$$



Obr. 15 – Zjednodušení impedancí při odstávce

Výpočet poměrných sousledných impedancí při odstávce (jak plyne z Obr. 15):

- vlastní spotřeby: 
$$z_{1VS} = \frac{1}{Z_V} \cdot \frac{Z_{BA} \cdot Z_{BC}}{Z_{BA} + Z_{BC}} \doteq 16,6 + 10,2j \quad (110)$$

- odbočkového transformátoru: 
$$z_{1OT} = \frac{1}{2} (z_{pOT} + z_{sOT}) \quad (111)$$

$$z_{1OT} = 0,0079 + 0,171j$$

- rezervního transformátoru: 
$$z_{1RT} = \frac{1}{2}(z_{pRT} + z_{sRT}) \quad (112)$$
  

$$z_{1RT} = 0,0078 + 0,187j$$
- Součet VS a OT: 
$$z_{1VS+OT} \doteq 16,6 + 10,4j \doteq 19,6 \cdot e^{0,560j} \quad (113)$$
- Součet VS a RT: 
$$z_{1VS+RT} \doteq 16,6 + 10,4j \doteq 19,6 \cdot e^{0,560j} \quad (114)$$

Jak je z výsledků (108), (109), (113) a (114) vidět, rozdíl mezi impedancemi odbočkového a rezervního transformátoru je minimální a v součtu s vyšší impedancí vlastní spotřeby se téměř neprojeví. Aby byly zahrnuty všechny možné provozní stavy, nejen dva uvedené modelové stavy pro provoz a odstávku, bude dále zkoumána i proměnná velikost impedance vlastní spotřeby mezi těmito stavy. Protože je impedance komplexní veličina, bude v případě proměnné impedance mezi krajními stavy uvažován pro zjednodušení konstantní  $\varphi$ . Hodnota  $\varphi$  v případě provozu je dle (108), (109) rovna 0,637, v případě odstávky dle (113), (114) 0,560. Proto bude pro proměnnou souslednou impedanci uvažována střední hodnota těchto hodnot zaokrouhlená na  $\varphi = 0,6$ .

Proměnná sousledná impedance se bude pohybovat v rozmezí:

$$z_{1VS+T} = (2,35 \div 19,6) \cdot e^{0,6j} \quad (115)$$

Do této hodnoty je už zahrnuta i impedance předřazeného odbočkového nebo rezervního transformátoru, což je učiněno z důvodu, že v krajních případech je aktivní jiný počet jejich vinutí a jejich impedance se tak liší. Takto je tato jejich proměnná impedance zahrnuta do proměnné impedance vlastní spotřeby. Při následujících výpočtech bude s impedancemi těchto transformátorů opět počítáno. Úbytek napětí na těchto transformátorech bude od napětí na vlastní spotřebě se zahrnutým transformátorem odečten, takže výsledné napětí bude pouze na vlastní spotřebě s vyjmutím úbytku na transformátoru.

### 4.3.2 Model zpětné složky

Parametry pro zpětnou složku jsou u transformátorů shodné jako pro souslednou složku, proto budou obě tyto hodnoty dále značeny takto (116):

$$z_{OT} = z_{2OT} = z_{1OT}, \quad z_{RT} = z_{2RT} = z_{1RT}, \quad z_{BT} = z_{2BT} = z_{1BT} \quad (116)$$

Pro vlastní spotřebu je určení zpětné složky impedancí mnohem problematičtější. Vlastní spotřeba je tvořena zejména asynchronními motory, jejichž zpětnou složku lze určit podle kap. 2.2.2. Protože nejsou vždy připojeny všechny motory a jejich skladba se může během provozu i odstávky měnit, místo zjišťování přesných parametrů jednotlivých motorů určím rozpětí zpětných impedancí v poměru k sousledným, v jakém rozmezí se budou vždy pohybovat.

Jako nejnižší možný případ zpětné impedance uvažuji, že z připojených spotřebičů je pouze polovina asynchronních motorů a jejich záběrný proud je na dolní hranici rozmezí záběrných proudů asynchronních motorů, tedy čtyřnásobek jmenovitého proudu. Zbylé netočivé spotřebiče v této nejnižší možné velikosti zpětných proudů uvažuji s nejnižší možnou

zpětnou složkou proudu (rovnou nule). Protože při konstantním napětí je impedance nepřímo úměrná proudu, platí následující:

$$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)_{\min} = \left(\frac{|z_{1VS+T}|}{|z_{2VS+T}|}\right)_{\min} = (z_{1/2})_{\min} = \frac{1}{2} \cdot 4 = 2 \quad (117)$$

V opačném případě uvažují celou spotřebu tvořenou asynchronními motory s nejvyšším obvyklým záběrným proudem, tedy sedminásobkem jmenovitého:

$$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)_{\max} = \left(\frac{|z_{1VS+T}|}{|z_{2VS+T}|}\right)_{\max} = (z_{1/2})_{\max} = 7 \quad (118)$$

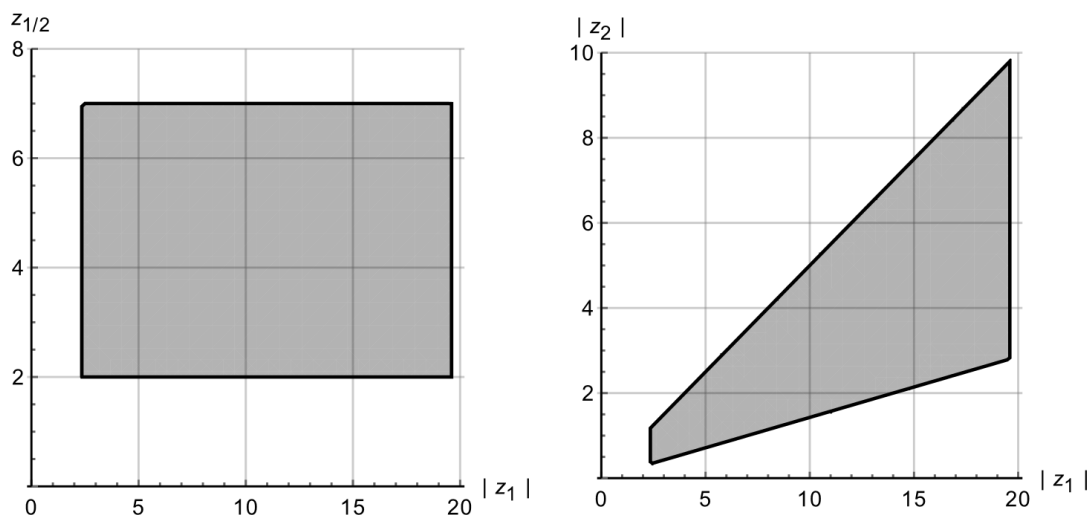
Jak je uvedeno v kap. 2.2.2, je charakter zpětné složky asynchronních motorů téměř čistě induktivní, proto pro určení zpětné složky vlastní spotřeby bude používán následující vztah vycházející z (117) a (118):

$$z_{1/2} = (2 \div 7) \quad (119)$$

$$z_{2VS+T} = \left(\frac{1}{z_{1/2}}\right) \cdot |z_{1VS+T}| \cdot j \quad (120)$$

V závislosti na hodnotě  $z_{1/2}$  v rozmezí daném vztahem (119) budou zjišťovány dopady poruchy. Vztah (120) bude používán při dalších výpočtech při uvažování proměnné sousledné impedance, do které jsou zahrnuty i odbočkový či rezervní transformátor. To může zanechat menší nepřesnost, protože nebude zpětná složka počítána čistě z velikosti impedance vlastní spotřeby, ale protože není přičtená impedance transformátoru významná a zpětná složka se pohybuje ve velkém rozpětí, bude tato nepřesnost zcela zanedbatelná.

Protože je proměnná sousledná impedance i poměr zpětné impedance ku sousledné, bude vyšetřována oblast impedancí vycházející ze vztahů (115) a (119) znázorněná na Obr. 16.



Obr. 16 – Vyšetřovaná oblast velikostí sousledné a zpětné impedance

Při výpočtu poruchy na rezervním napájení bude navíc uvažován stav naprázdno, což je základní stav, ve kterém je rezervní napájení provozováno. Zde budu uvažovat s připojením pouze měřicích transformátorů napětí, které mají velmi vysokou souslednou impedanci induktivního charakteru a zpětnou impedanci stejnou jako souslednou ( $z_{1/2} = 1$ ).

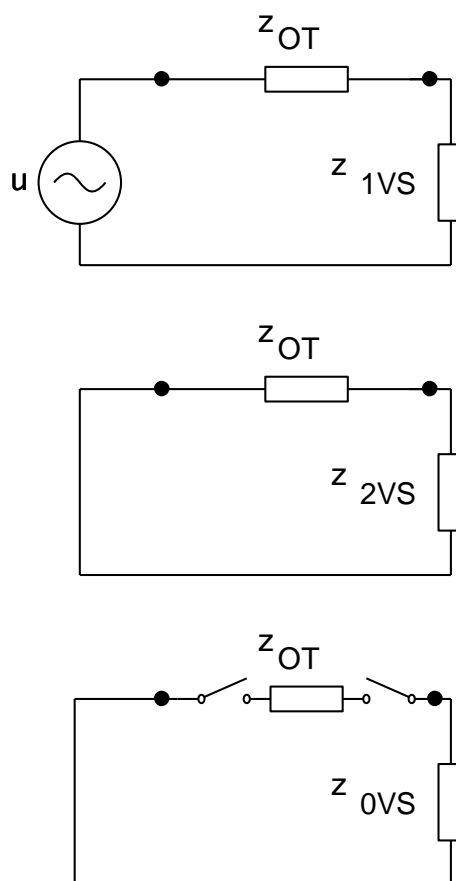
### 4.3.3 Model netočivé složky

Protože se odbočkový a rezervní transformátor chovají na sekundární a terciární straně vůči netočivé složce jako rozpojené, netočivá složka se v části schématu s vlastní spotřebou nemůže uzavírat (jak je zřejmé z Obr. 18 a Obr. 19). Proto není třeba chování vlastní spotřeby vůči netočivé složce modelovat, stejně tak se ve výpočtech nijak neuplatní uzemňovací transformátor, proto nejsou jeho parametry dále určovány a ve schématech není vyznačen.

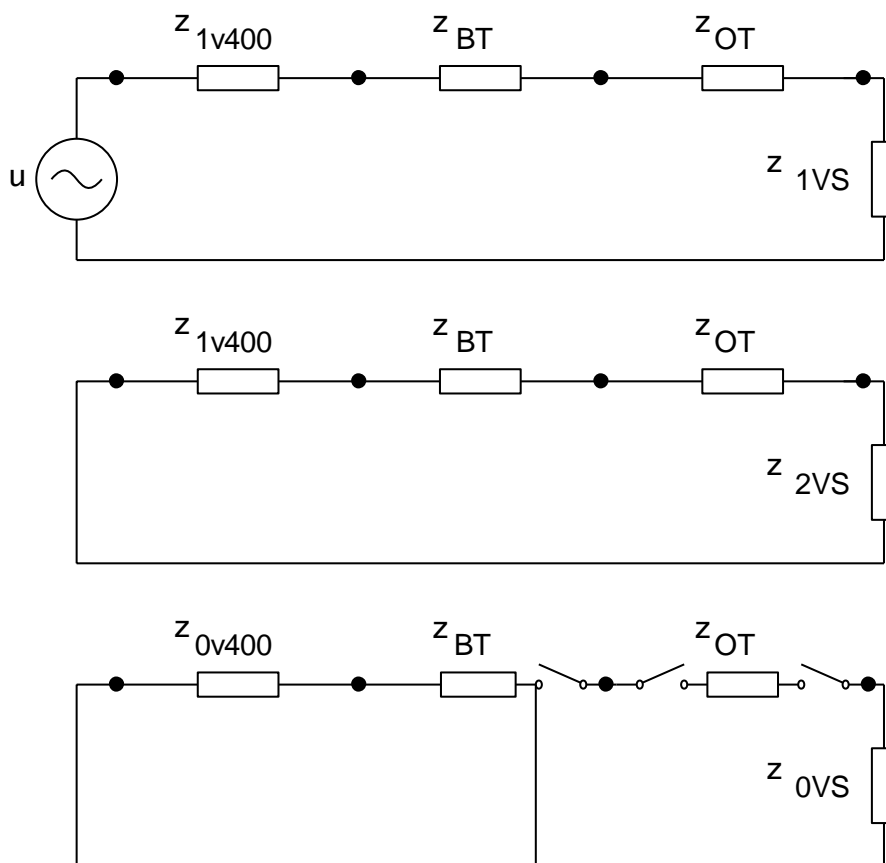
### 4.4 Schémata ve složkách

Pro jednotlivé složky budou platit schémata na Obr. 17, Obr. 18 a Obr. 19. Ty vycházejí z Obr. 10 a liší se podle způsobu napájení a provozního stavu. Ve všech případech se celkové impedance sousledné a zpětné složky liší pouze v impedanci vlastní spotřeby, u zbylých netočivých prvků jsou tyto impedance stejné (dle kap. 2.2). U netočivé složky je impedance vedení jiná, u transformátorů musí být využita schémata zapojení odvozená v 2.2.1.

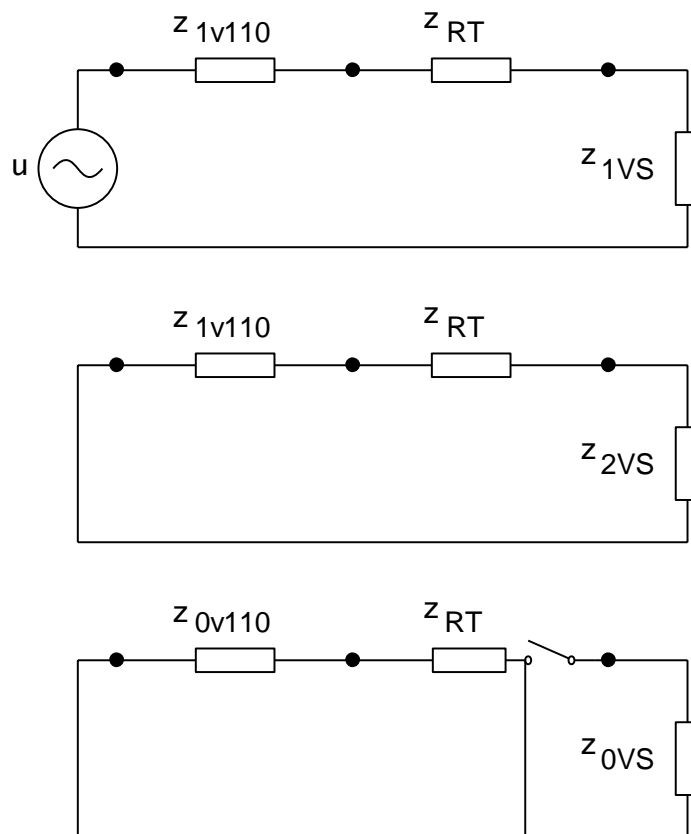
Místa ve schématech označená černým bodem jako uzly jsou místa, kde se budu zabývat možnou poruchou přerušení fáze.



Obr. 17 – Schéma pracovního napájení při provozu v jednotlivých složkách



Obr. 18 – Schéma pracovního napájení při odstávce v jednotlivých složkách



Obr. 19 – Schéma rezervního napájení v jednotlivých složkách

#### 4.4.1 Zjednodušení schémat

V prvním kroku zjednoduším schémata zvlášť pro jednotlivé složky. Protože sousledná a zpětná složka tvoří jednu jednoduchou smyčku, tak pokud dojde k přerušení fáze v kterémkoliv místě, lze při výpočtu proudů a rozdílu napětí v místě poruchy u obou způsobů napájení nahradit všechny impedance jednou impedancí:

$$\mathbf{z}_1 = \sum_n \mathbf{z}_{1n} \quad (121)$$

$$\mathbf{z}_2 = \sum_n \mathbf{z}_{2n} \quad (122)$$

Dále je již třeba výpočet rozdělit na případ, kdy je vlastní spotřeba napájena pracovním zdrojem napájení během provozu, který bude značen indexem  $p$ , kdy je napájena pracovním zdrojem během odstávky, který bude značen indexem  $o$ , a kdy je napájena rezervním zdrojem napájení, který bude značen indexem  $r$ .

$$\mathbf{z}_{1p} = \mathbf{z}_{1VS+T} \quad (123)$$

$$\mathbf{z}_{1o} = \mathbf{z}_{1v400} + \mathbf{z}_{BT} + \mathbf{z}_{1VS+T} \quad (124)$$

$$\mathbf{z}_{1r} = \mathbf{z}_{1v110} + \mathbf{z}_{1VS+T} \quad (125)$$

$$\mathbf{z}_{2p} = \mathbf{z}_{2VS+T} \quad (126)$$

$$\mathbf{z}_{2o} = \mathbf{z}_{1v400} + \mathbf{z}_{BT} + \mathbf{z}_{2VS+T} \quad (127)$$

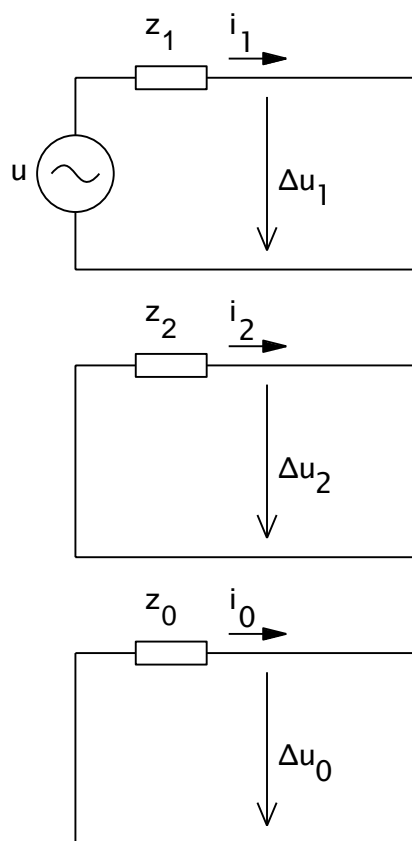
$$\mathbf{z}_{2r} = \mathbf{z}_{1v110} + \mathbf{z}_{2VS+T} \quad (128)$$

Schéma netočivé složky se chová při pracovním napájení při provozu (Obr. 17) vždy jako rozpojené, impedance je zde vždy nekonečná. U zbylých dvou případů (Obr. 18 a Obr. 19) tvoří dvě smyčky, proto určím impedanci zvlášť, pokud dojde k přerušení před blokovým či rezervním transformátorem v levé části schématu a pokud dojde k přerušení vpravo. V pravé části není smyčka kvůli chování transformátorů uzavřená a netočivá impedance tak bude nekonečná. V levé části (před blokovým/rezervním transformátorem) bude netočivá impedance určena takto:

$$\mathbf{z}_{0o} = \mathbf{z}_{0v400} + \mathbf{z}_{BT} \quad (129)$$

$$\mathbf{z}_{0r} = \mathbf{z}_{0v110} + \mathbf{z}_{RT} \quad (130)$$

Nyní můžeme všechna schémata (Obr. 17, Obr. 18 a Obr. 19) zjednodušit do podoby na Obr. 20, kde jsou znázorněny i počítané proudy v jednotlivých složkách a napětí v místě poruchy.



Obr. 20 – Zjednodušené schéma napájení v jednotlivých složkách



## 5 Výsledné dopady poruchy

Na jednotlivé složky zobrazené ve schématech na Obr. 20 mohou být aplikovány teoretické poznatky z kap. 2.3. Tím lze pro každý způsob napájení, místo poruchy a typ poruchy určit napěťové a proudové poměry na rozvodnách vlastní spotřeby, které jsou rozhodující pro možnosti vyhodnocení poruchy, jejích dopadů a možností detekce.

### 5.1 Porucha při provozu a pracovním napájení

V bezporuchovém stavu v standardním pracovním režimu vyrábí generátor vůči odběru vlastní spotřeby tvrdé napětí a úbytek napětí je tak pouze na odbočkovém transformátoru (Obr. 17). Jak bylo již uvedeno, případem přerušení fáze na vyvedení výkonu z elektrárny se tato práce nezabývá. Při výpočtu této poruchy vycházím ze schématu na Obr. 17, kde jsou vyznačena dvě možná místa poruchy – před odbočkovým transformátorem nebo za odbočkovým transformátorem. Pro obě tyto možnosti bude netočivá impedance nekonečná, sousledná a zpětná impedance jsou určeny rovnicemi (123) a (126).

Při **přerušení jedné fáze** dosadím tyto hodnoty do vztahů (27), (28), (29) a (30) a získám složkové proudy a rozdíly napětí:

- Sousledný proud: 
$$i_1 = \frac{1}{z_{1VS+T} + z_{2VS+T}} \quad (131)$$

- Zpětný proud: 
$$i_2 = -\frac{1}{z_{1VS+T} + z_{2VS+T}} \quad (132)$$

- Netočivý proud: 
$$i_0 = 0 \quad (133)$$

- Rozdíl napětí ve všech složkách: 
$$\Delta u_1 = \Delta u_2 = \Delta u_0 = \frac{z_{2VS+T}}{z_{1VS+T} + z_{2VS+T}} \quad (134)$$

Protože je sousledný proud stejně velký jako zpětný, je velikost zpětné složky v tomto případě 100 %.

Tyto hodnoty transformuji ze složkové soustavy a zjistím tak fázové proudy a rozdíly napětí v místě poruchy v jednotlivých fázích:

- Proud fáze *a*: 
$$i_a = 0 \quad (135)$$

- Proud fáze *b*: 
$$i_b = \frac{-\sqrt{3} \cdot j}{z_{1VS+T} + z_{2VS+T}} \quad (136)$$

- Proud fáze *c*: 
$$i_c = \frac{\sqrt{3} \cdot j}{z_{1VS+T} + z_{2VS+T}} \quad (137)$$

- Rozdíl napětí ve fázi *a*: 
$$\Delta u_a = \frac{3 \cdot z_{2VS+T}}{z_{1VS+T} + z_{2VS+T}} \quad (138)$$

- Rozdíl napětí ve fázi *b* a *c*: 
$$\Delta u_b = \Delta u_c = 0 \quad (139)$$

Proud ve fázi *a* a rozdíly napětí ve fázi *b* a *c* vyšly nulové, což odpovídá výchozím předpokladům přerušení jedné fáze. Proudů ve fázi *b* a ve fázi *c* mají stejnou velikost a opačný

směr. Pro srovnání určím složkové proudy v bezporuchovém stavu podle (22) a (23) a ty transformuji na fázové hodnoty:

- Proud fáze *a* bez poruchy: 
$$i_a = \frac{1}{z_{1VS+T}} \quad (140)$$

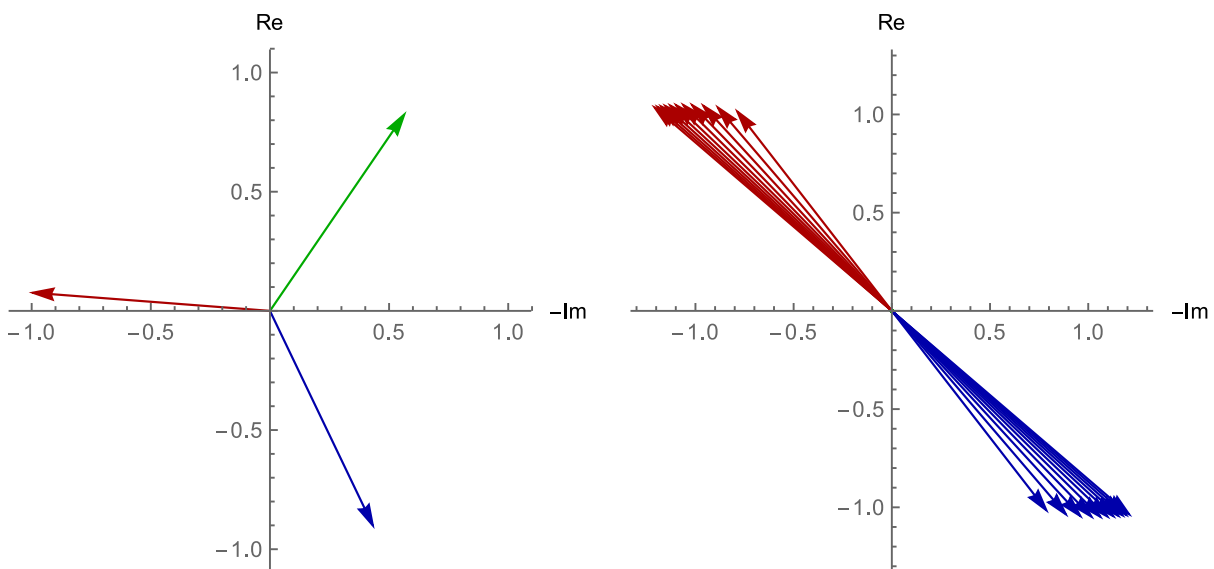
- Proud fáze *b* bez poruchy: 
$$i_b = \frac{1}{z_{1VS+T}} \cdot a^2 \quad (141)$$

- Proud fáze *c* bez poruchy: 
$$i_c = \frac{1}{z_{1VS+T}} \cdot a \quad (142)$$

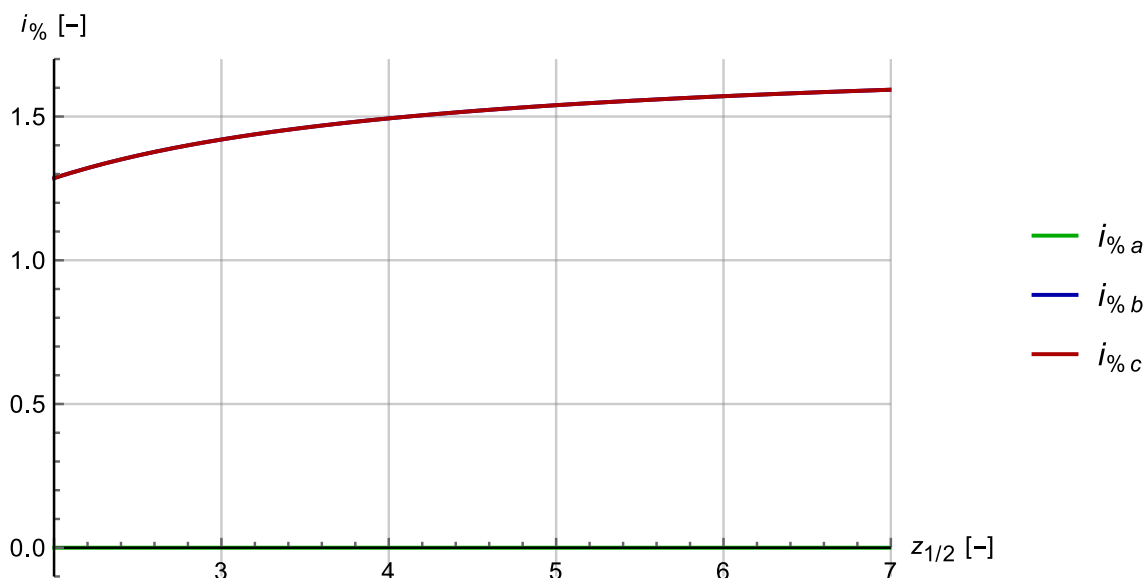
Při určení změny velikosti proudu při poruše (značená jako  $i_{\%}$ ) ve fázích *b* a *c* dostanu následující vztah:

$$i_{\%b} = i_{\%c} = \left| \frac{-\sqrt{3} \cdot j}{z_{1VS+T} + z_{2VS+T}} \right| \cdot |z_{1VS+T}| = \left| \frac{\sqrt{3}}{e^{0,6j} + \frac{j}{z_{1/2}}} \right| \quad (143)$$

Tímto způsobem se eliminovala závislost na sousledné impedanci, změna velikosti proudu se mění pouze v závislosti na veličině  $z_{1/2}$ , což je poměr mezi velikostí sousledné a zpětné impedance vlastní spotřeby, který se dle kap. 4.3.2 pohybuje v rozmezí  $2 \div 7$ . Graf závislosti  $i_{\%}$  na  $z_{1/2}$  je na Obr. 22. Z něj lze odečíst, že se při poruše velikost proudu ve dvou nepřerušovaných fázích zvýší o 30 až 60 %. Na Obr. 21 vlevo jsou zobrazeny fázory proudů v bezporuchovém stavu, vpravo jsou zobrazeny možné fázory proudů po přerušení jedné fáze a pro různá  $z_{1/2} = 2 \div 7$ .



Obr. 21 – Vlevo fázory proudů před poruchou, vpravo po přerušení fáze (zelené) při  $z_{1/2} = 2 \div 7$



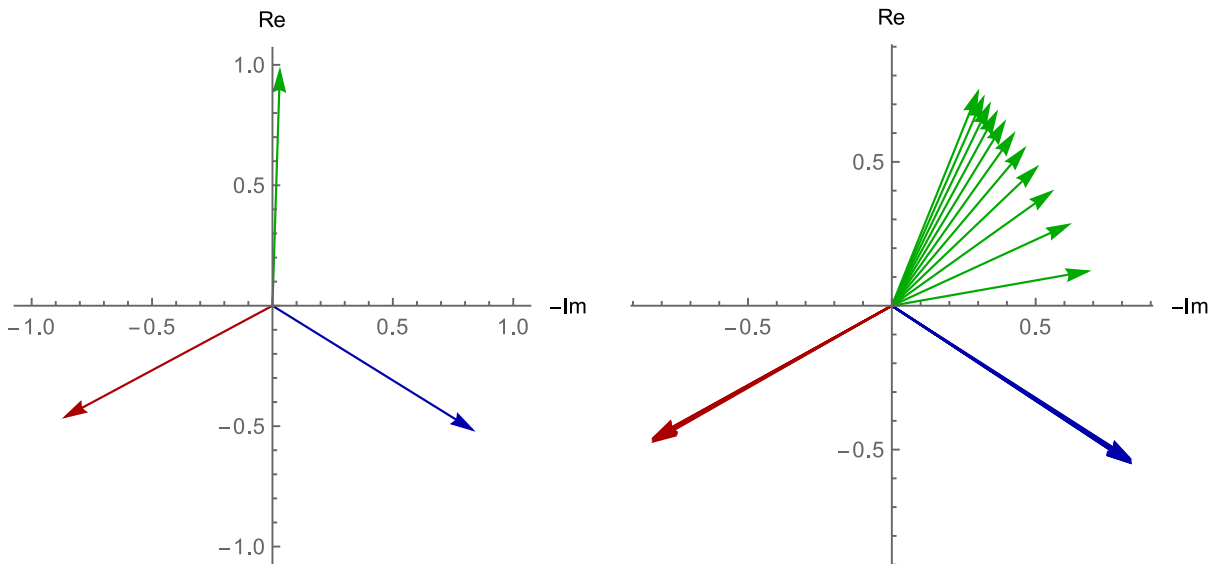
Obr. 22 – Změna velikosti proudu při přerušení fáze a v závislosti na  $z_{1/2}$

Takto určený proud je ve všech místech obvodu stejný, ať se nacházíme před poruchou, za poruchou, před odbočkovým transformátorem či za ním (zde se samozřejmě nemění pouze jeho poměrná hodnota, jeho absolutní velikost se mění dle převodu transformátoru).

U napětí je situace složitější, protože u nepřerušovaných fází se mění úbytek na odbočkovém transformátoru v závislosti na zatížení a počtu sekcí transformátoru v provozu (zda jsou významně zatíženy všechny čtyři sekce nebo pouze dvě). Rozdíl napětí v místě poruchy u přerušené fáze závisí naopak pouze na velikosti  $z_{1/2}$ , jak lze odečíst ze vztahu (138) po vytknutí  $z_{2VS+T}$ .

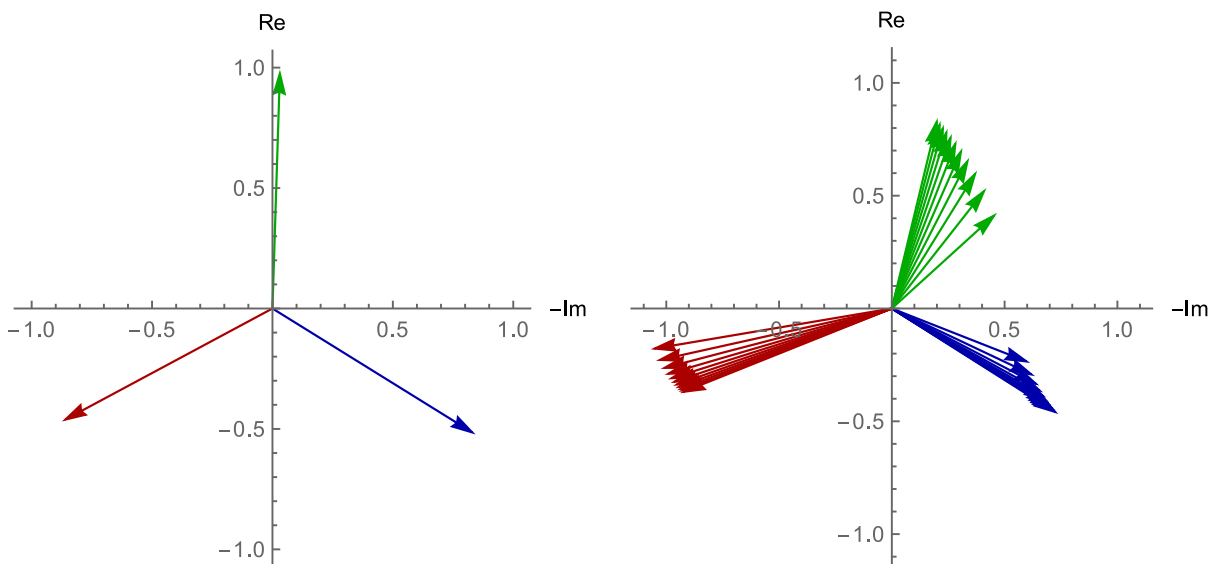
Při podrobnější analýze možných kombinací  $z_1$  a  $z_{1/2}$  lze dojít k závěru, že velikost úbytku napětí v neporušených fázích není oproti rozdílu napětí v přerušené fázi významná. Protože je v tomto případě blok vždy v provozu, zatížení rozvoden vlastní spotřeby zde budu považovat za provozní (maximální):  $z_{1VS+T} = (z_{1VS+T})_{MAX}$ .

Nejzajímavější jsou napěťové poměry na rozvodnách vlastní spotřeby, kde jsou napětí monitorována a hlídána elektrickými ochranami, proto určím napětí za přerušením fáze i za odbočkovým transformátorem. Při různých  $z_{1/2} = 2 \div 7$  jsou fázory napětí v tomto místě zobrazeny na Obr. 23:



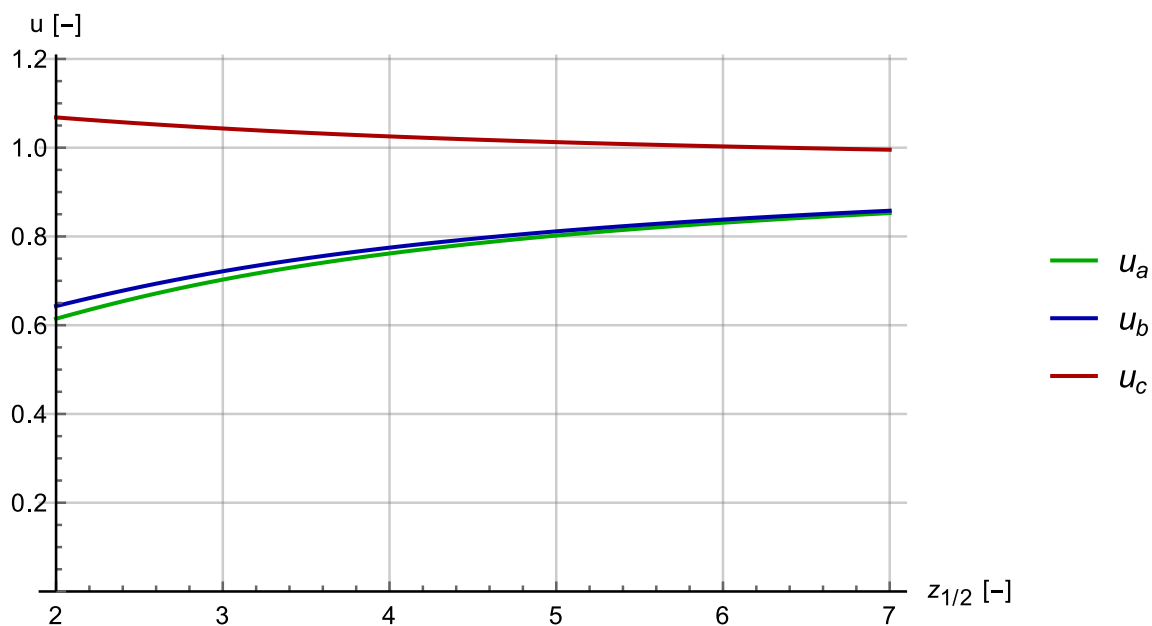
Obr. 23 – Vlevo fázory napětí na VS před poruchou, vpravo po přerušení fáze (zelené) při  $z_{1/2} = 2 \div 7$

Z Obr. 23 je zřejmé, že po poruše by byl uzel zařízení zapojených do trojúhelníku posunutý od nulového napětí. Protože jsou rozvodny vlastní spotřeby uzemněny uzemňovacím transformátorem, který má uzel přes odpor uzemněný, musel by přes tento odpor protékat proud. Ten by se však neměl kudy uzavírat, protože jinde vlastní spotřeba uzemněna není, toto uzemnění tedy poslouží k posunutí nulového napětí do takového bodu, aby žádný proud neprotékal (střední hodnota fázorů napětí musí být nulová). Po korekci fázorů napětí dle těchto předpokladů dostanu možné fázory napětí na Obr. 24.



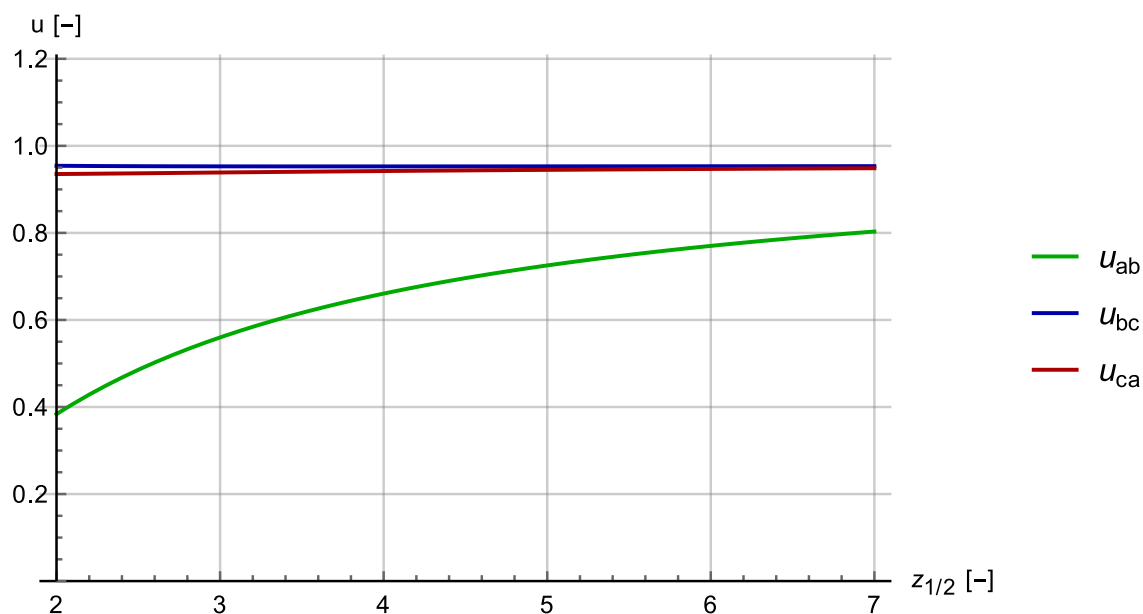
Obr. 24 – Vlevo fázory napětí před poruchou, vpravo po přerušení fáze a korekci uzlu při  $z_{1/2} = 2 \div 7$

Pro lepší představu závislost velikosti těchto fázorů na  $z_{1/2}$  vykreslím na Obr. 25.



Obr. 25 – Velikosti fázových napětí při přerušení jedné fáze v závislosti na  $z_{1/2}$

Takovéto velikosti napětí v jednotlivých fázích změří i měřicí transformátory napětí zapojené do trojúhelníku. Při zapojení měřicích transformátorů do hvězdy se naopak změří sdružená napětí, jejich velikosti jsou v závislosti na  $z_{1/2}$  vykresleny na Obr. 26.



Obr. 26 – Velikosti sdružených napětí při přerušení jedné fáze v závislosti na  $z_{1/2}$

Z Obr. 25 a Obr. 26 lze odečíst, že při měření fázových napětí poklesne napětí ve dvou fázích na 60 až 85 % jmenovitého fázového napětí (třetí hodnota nepatrně vzroste), při měření sdruženého napětí poklesne jedna hodnota na 40 až 80 % jmenovité hodnoty (v závislosti na  $z_{1/2}$ ), zbylé dvě hodnoty nepoklesnou více než o 10 %, což je způsobeno zejména úbytkem napětí na odbočkovém transformátoru.

Při **přerušení dvou fází** určím proudy ze vztahu (33), rozdíly napětí z rovnic, (34), (35) a (36):

- Proud všech složek:  $i_1 = i_2 = i_0 = 0$  (144)

- Rozdíl sousledného napětí:  $\Delta u_1 = 1$  (145)

- Rozdíl zpětného napětí:  $\Delta u_2 = 0$  (146)

- Rozdíl netočivého napětí:  $\Delta u_0 = 0$  (147)

Tyto hodnoty opět transformuji ze složkové soustavy na fázové hodnoty:

- Proud všech fází:  $i_a = i_b = i_c = 0$  (148)

- Rozdíl napětí ve všech fázích:  $\Delta u_a = \Delta u_b = \Delta u_c = 1$  (149)

Při přerušení dvou fází neprotéká žádný proud v žádné fázi a napětí jsou za místem poruchy ve všech fázích nulová ( $u - \Delta u = 0$ ).

## 5.2 Porucha při odstávce a pracovním napájení

Při odstávce je zdrojem pracovního napájení soustava 400 kV, která napájí vlastní spotřebu přes vedení 400 kV, blokový transformátor a odbočkový transformátor (Obr. 18). Zde je třeba rozlišit dva poruchové stavy, které se zásadně liší. Jednou možností je porucha za blokovým transformátorem, kdy netočivá složka obsažena nebude, stejně jako v předchozím případě v kap. 5.1. Druhou možností je porucha před blokovým transformátorem, kdy se může netočivá složka uzavírat.

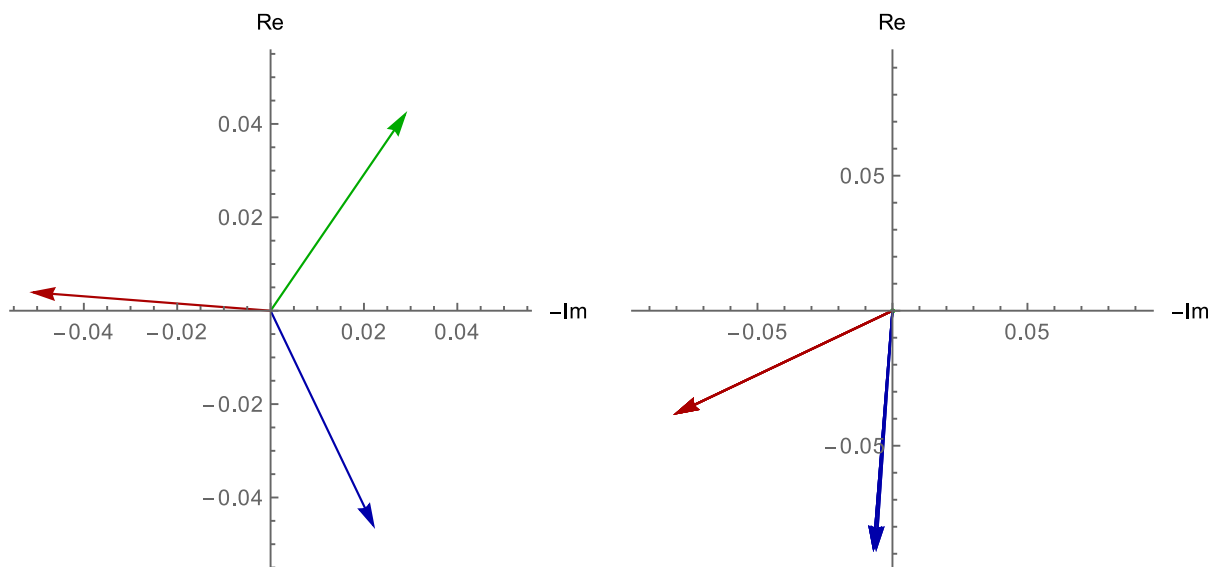
### 5.2.1 Za blokovým transformátorem

Pokud dojde k přerušení fáze kdekoli za blokovým transformátorem a před rozvodnami vlastní spotřeby, je postup výpočtu zcela stejný jako v předchozí kapitole, pouze za souslednou a zpětnou impedanci dosadím (124) a (127). Protože je velikost impedance vedení 400 kV a blokového transformátoru proti impedanci vlastní spotřeby o několik řádů menší, jsou rozdíly ve výpočtech oproti předchozí kapitole minimální a platí všechny grafy a závěry uvedené v kap. 5.1. Proudů určené na Obr. 21 a Obr. 22 (ve dvou fázích zvýšené a v jedné nulový) zde navíc vycházejí z rozvodny 400 kV v Kočíně a procházejí přes vedení 400 kV a blokový transformátor.

### 5.2.2 Před blokovým transformátorem

Druhá možnost je porucha před blokovým transformátorem (včetně) a za rozvodnou 400 kV v Kočíně. Zde se již může uzavírat i netočivá složka, jako velikost netočivé impedance dosadím hodnotu danou vztahem (129).

Při **přerušení jedné fáze** zopakuji výpočet jako v předchozí kapitole a vykreslím pro výsledné vztahy obdobné grafy. Zde již není zcela eliminovaná závislost na velikosti zatížení. Při bližší analýze se ukáže, že závislost není nijak významná a průběhy na grafech zatížení nijak viditelně neovlivňuje (to je dáno velmi malou impedancí blokového transformátoru a vedení 400 kV).



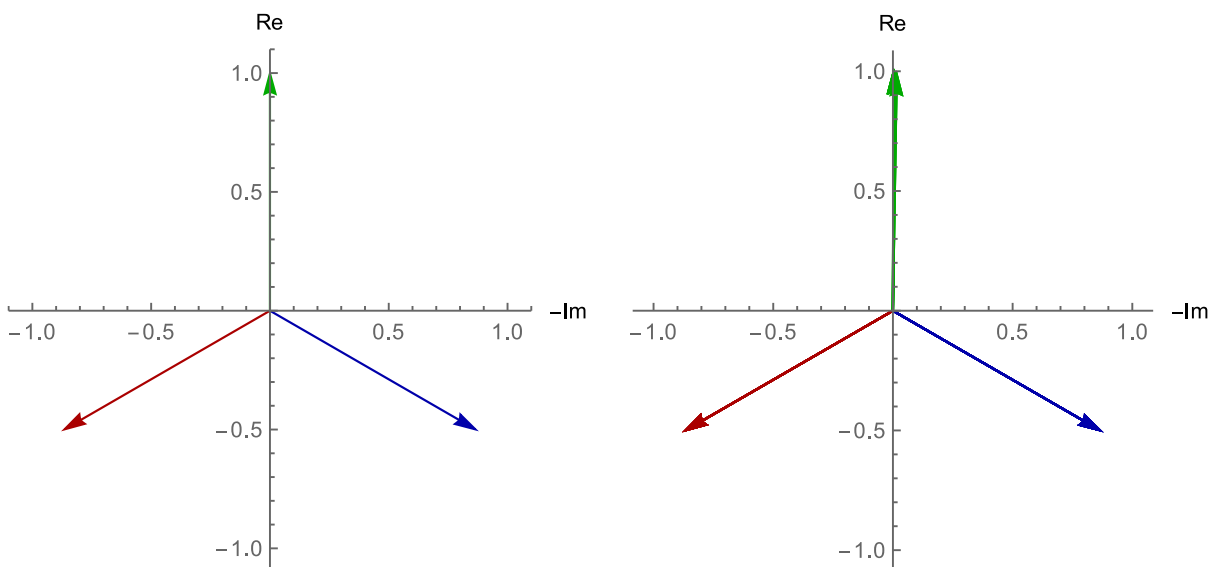
Obr. 27 – Vlevo fázory proudu před poruchou, vpravo po přerušení fáze při  $z_{1/2} = 2 \div 7$  (stav před BT)



Obr. 28 – Změna velikosti proudu při přerušení fáze  $a$  v závislosti na  $z_{1/2}$  (stav před BT)

Z Obr. 28 je vidět, že ani závislost na  $z_{1/2}$  není významná, při přerušení jedné fáze před blokovým transformátorem tak dojde vždy ke zvýšení velikosti proudu ve dvou nepřerušených fázích o 70 až 75 % a ke změně fázorů proudu tak, jak je zobrazeno na Obr. 27.

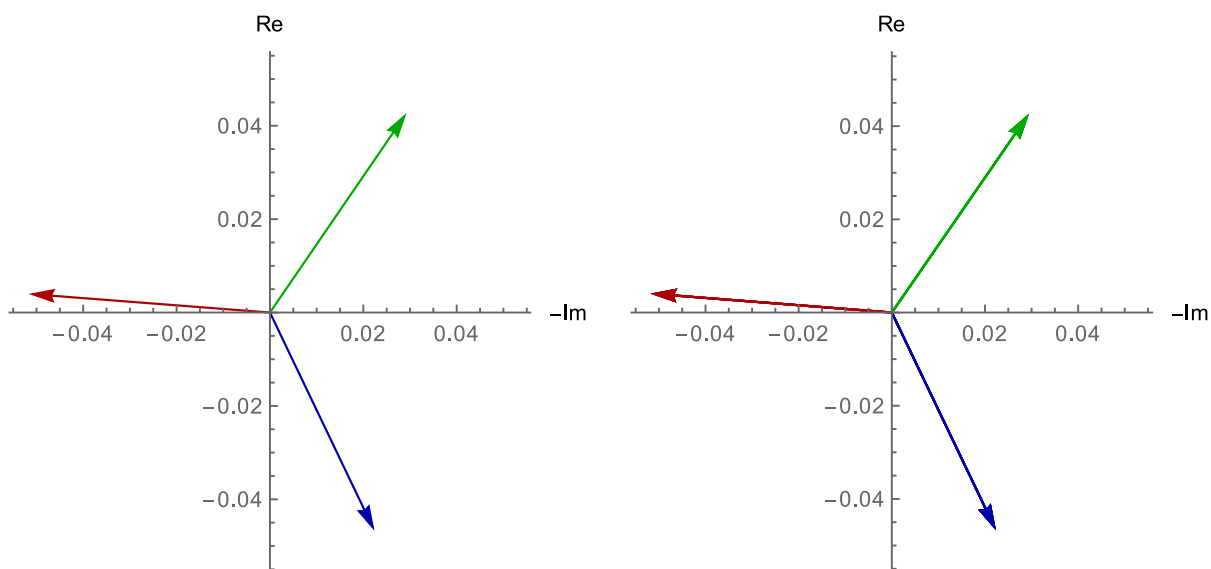
Napěťové poměry budou při obdobném výpočtu jako v přechodí kapitole při všech možných kombinacích  $z_1$  a  $z_{1/2}$  následující:



Obr. 29 – Vlevo fázory napětí před poruchou, vpravo po přerušení fáze (stav před i za BT)

Jak je z Obr. 29 patrné, napětí se při této poruše před BT nijak významně nezmění, při měření fázových i sdružených hodnot tak budou vycházet stejné hodnoty jako před poruchou a pouze monitorováním napětí je tato porucha téměř nezjistitelná.

Netočivá složka se však nemůže šířit dále přes blokový transformátor. Při vynulování netočivé složky ve výpočtu určí proudy, které budou procházet všude za blokovým transformátorem:



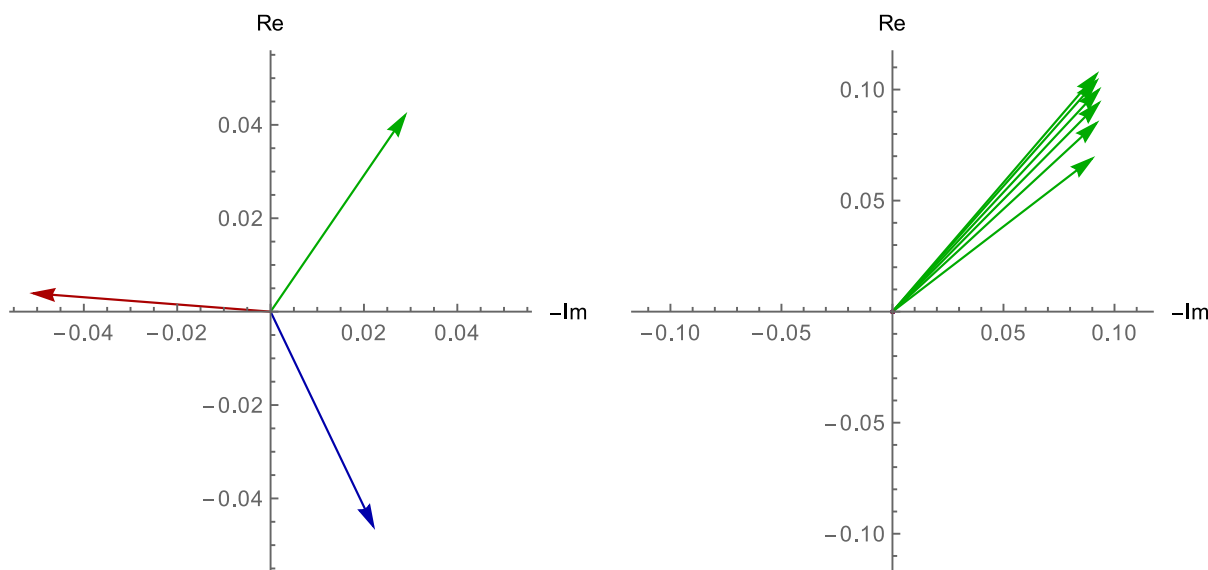
Obr. 30 – Vlevo fázory proudu před poruchou, vpravo po přerušení fáze při  $z_{1/2} = 2 \div 7$  (stav na VS)

Z Obr. 30 je vidět, že proudy za blokovým transformátorem budou stejné jako v bezporuchovém stavu. Protože i napětí bude za blokovým transformátorem stejné jako v bezporuchovém stavu (Obr. 29), nelze přerušení jedné fáze před blokovým transformátorem kdekoliv za blokovým transformátorem zjistit. Porucha na samotné napájení vlastní spotřeby

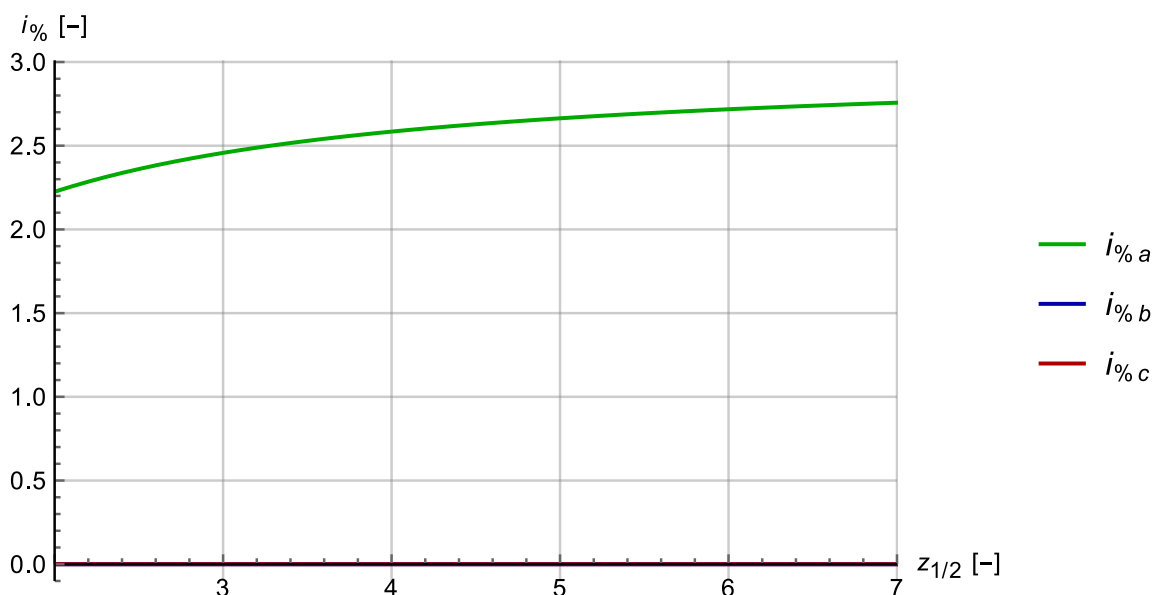


žádný vliv mít nebude, před blokovým transformátorem bude procházet netočivá složka proudů, která se uzavírá zemí a způsobuje nesymetrické namáhání transformátorů i zařízení. Velikost proudu procházejícího nulovým uzlem do země bude trojnásobná oproti velikosti fázovému proudu v bezporuchovém stavu.

Další možnou poruchou při tomto způsobu napájení je **přerušení dvou fází** před blokovým transformátorem. Oproti přerušení dvou fází za blokovým transformátorem, kdy se nemůže proud uzavírat, zde proud bude díky uzemněnému uzlu protékat. Při výpočtu podle kap. 2.3.3 dostanu následující výsledky:



Obr. 31 – Vlevo fázory proudů před poruchou, vpravo po přerušení 2 fází (různé  $z_{1/2}$ , stav před BT)

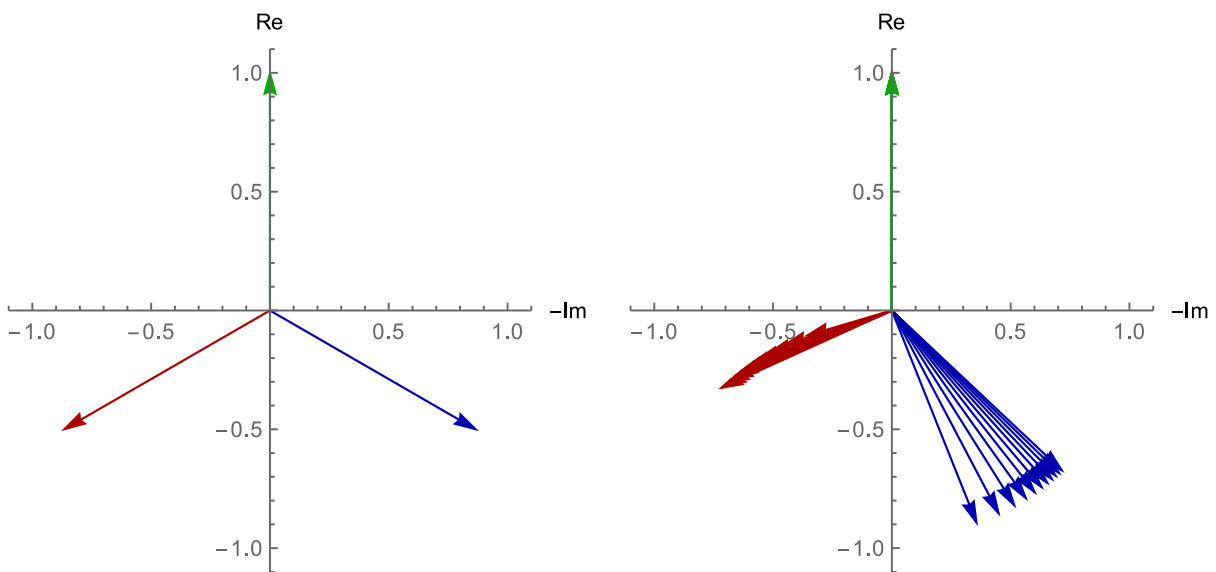


Obr. 32 – Změna velikosti proudu při přerušení 2 fází  $a$  v závislosti na  $z_{1/2}$  (stav před BT)

Z Obr. 32 lze odečíst, že proud před blokovým transformátorem se při přerušení dvou fází před blokovým transformátorem zvýší v jedné nepřerušené fázi o 120 až 175 % (v závislosti

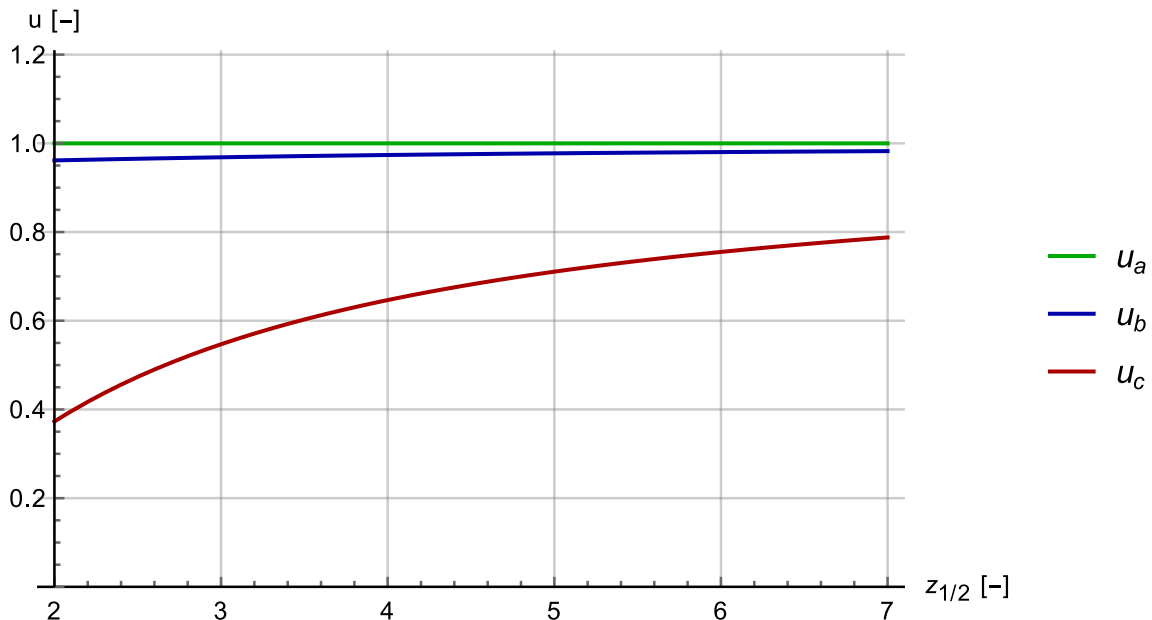
na  $z_{1/2}$ ). Tento proud se bude zpět uzavírat zemí, proto bude přesně takto velký proud téci nulovým uzlem do uzemnění.

Napěťové poměry budou před blokovým transformátorem následující:

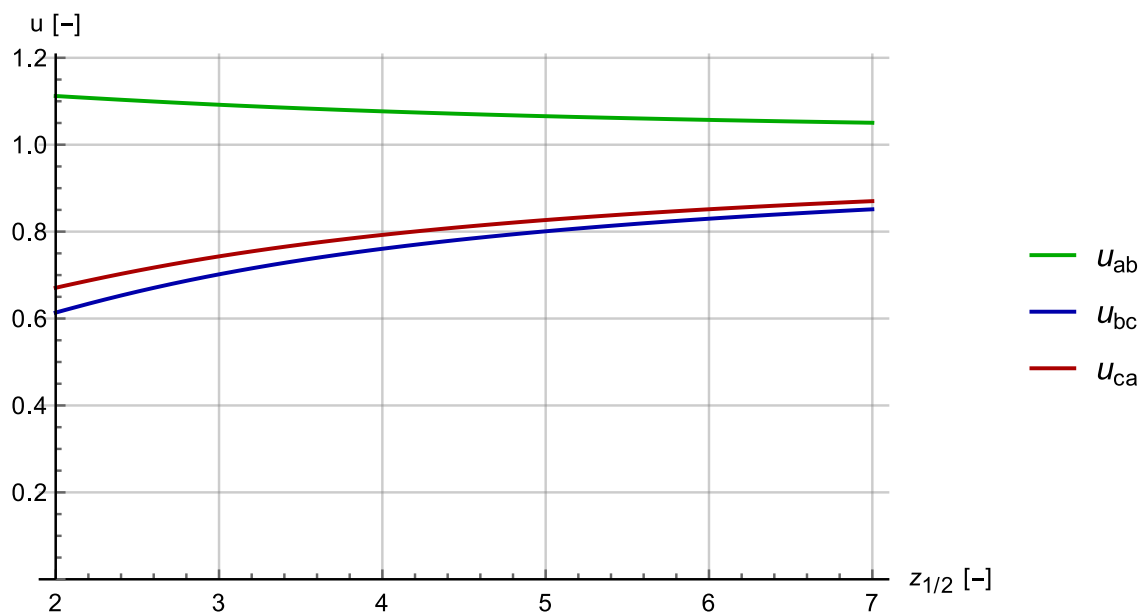


Obr. 33 – Vlevo fázory napětí před poruchou, vpravo po přerušení 2 fází (různé  $z_{1/2}$ , stav před i za BT)

Protože je uzel transformátoru uzemněn, nebude zde prováděna korekce uzlu a fázory zobrazené na Obr. 33 představují fázové hodnoty napětí, které lze naměřit proti zemi. Velikosti těchto fázových napětí jsou vykresleny na Obr. 34, velikosti sdružených napětí jsou vykresleny na Obr. 35:

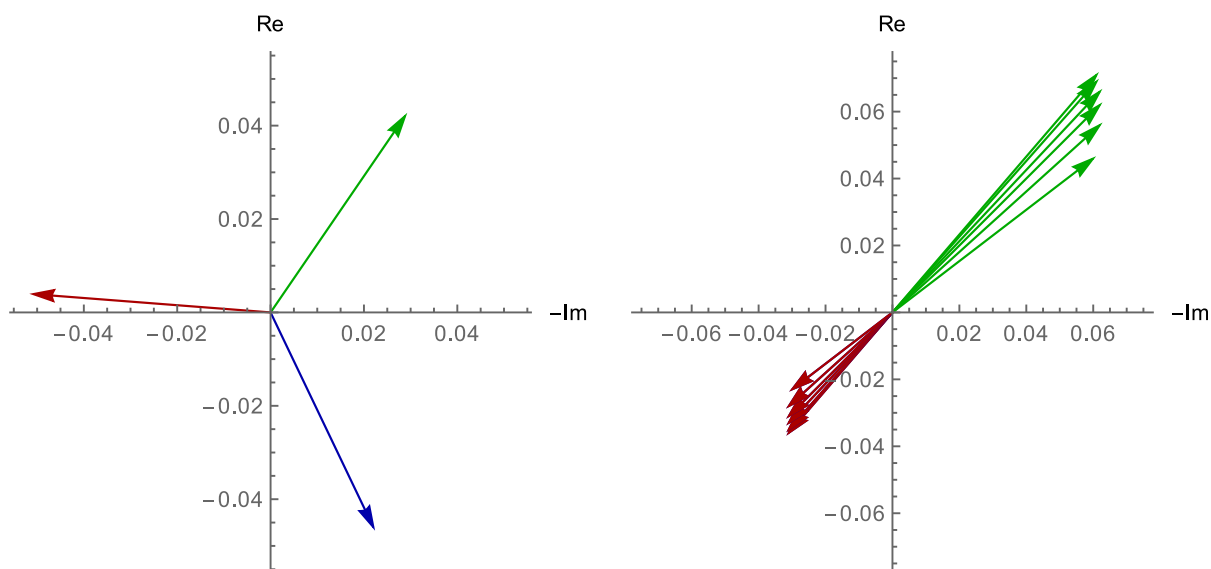


Obr. 34 – Velikosti fázových napětí při přerušení 2 fází v závislosti na  $z_{1/2}$  (stav před i za BT)

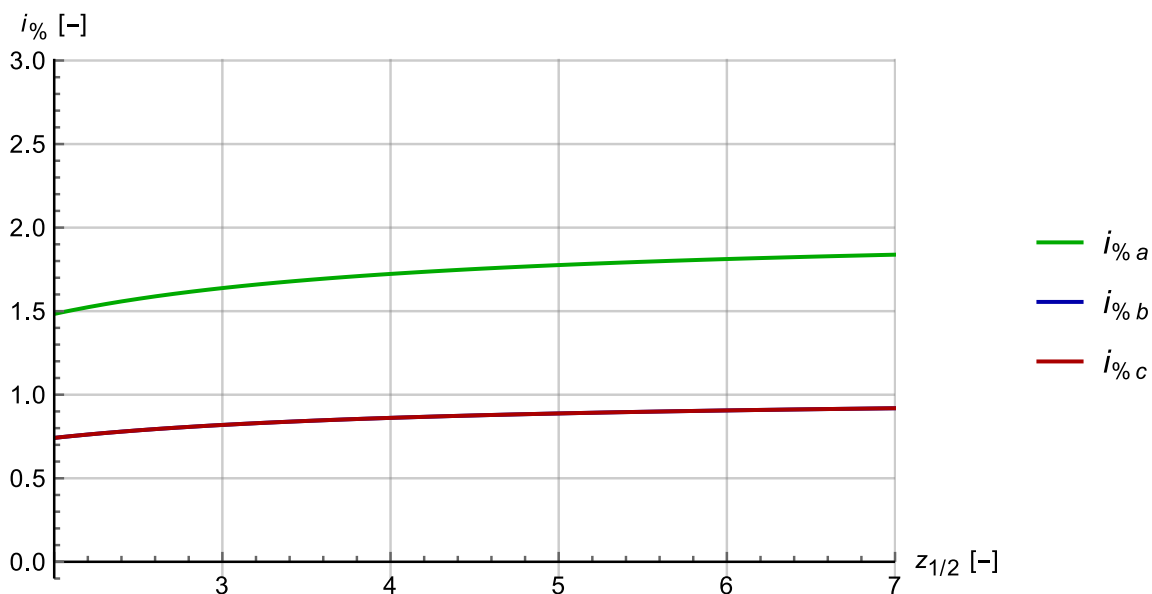


Obr. 35 – Velikosti sdružených napětí při přerušení 2 fází v závislosti na  $z_{1/2}$  (stav před i za BT)

Jak je vidět z Obr. 34 a Obr. 35, jedno fázové napětí poklesne na 40 až 80 % jmenovité hodnoty, dvě sdružená napětí klesnou na 60 až 85 % jmenovité hodnoty (v závislosti na  $z_{1/2}$ ). Při určení napětí za blokovým transformátorem na rozvodnách vlastní spotřeby se ukáže, že úbytky napětí nejsou významné a napěťové poměry jsou stejné jako před blokovým transformátorem, jak je zobrazeno na Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35. Proudů za blokovým transformátorem na rozvodnách vlastní spotřeby jsou po eliminaci netočivé složky jiné a jsou zobrazeny na Obr. 36 a Obr. 37:



Obr. 36 – Vlevo fázory proudů před poruchou, vpravo po přerušení 2 fází (různé  $z_{1/2}$ , stav na VS)



Obr. 37 – Změna velikosti proudu při přerušení 2 fází *a* v závislosti na  $z_{1/2}$  (stav na VS)

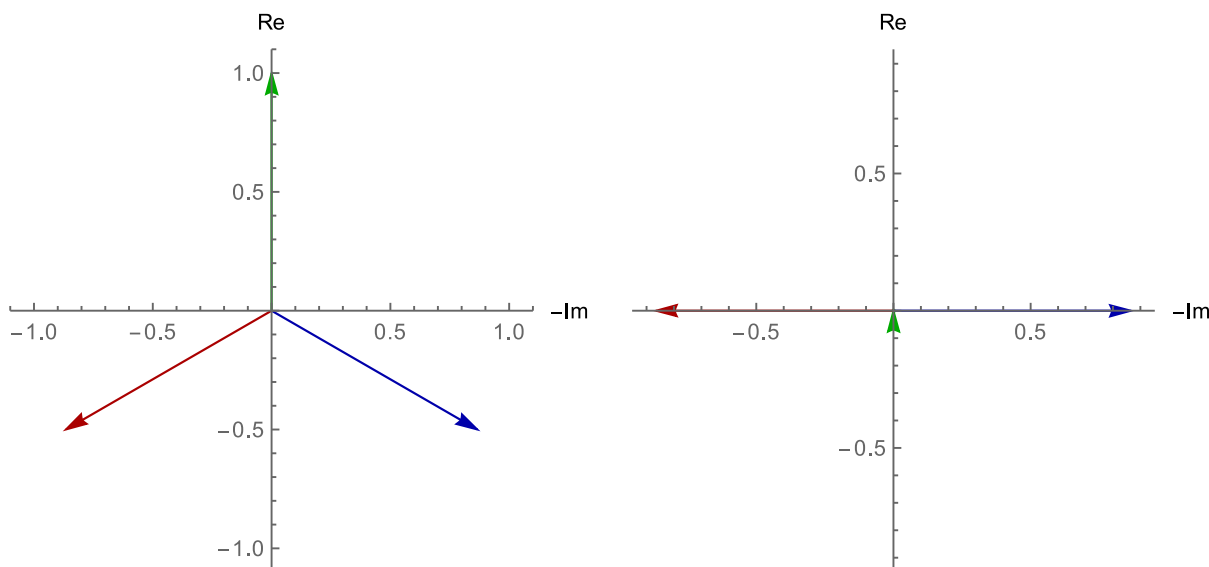
Z Obr. 36 a Obr. 37 je vidět, že za blokovým transformátorem na vlastní spotřebě vzroste jeden proud o 50 až 80 %, proudy ve dvou zbylých fázích mají opačný směr a poloviční velikost než tento proud (75 až 90 % původní hodnoty proudu před poruchou).

## 5.3 Porucha na rezervním zdroji napájení

Při napájení pomocí rezervního napájení platí schéma na Obr. 19, které je stejné při provozu bloku i při odstávce. Schéma se příliš od schématu při napájení z pracovního zdroje (Obr. 18) neliší, roli blokového transformátoru (rozdělení na dva různé případy poruchy) tu díky stejnému zapojení vinutí přebírá rezervní transformátor. Znatelný rozdíl oproti napájení z pracovního zdroje při odstávce způsobí velikost impedance vedení, u vedení 110 kV je poměrná impedance (sousedná i netočivá) přibližně desetkrát vyšší. Vlivem vyšší netočivé impedance budou jiné výsledky při poruše před rezervním transformátorem. Velký rozdíl u rezervního napájení bude při stavu naprázdno, kdy se uvažuje s připojením pouze měřicího transformátoru napětí.

### 5.3.1 Za rezervním transformátorem

Při poruše za rezervním transformátorem se opět nemůže uzavírat netočivá složka, analogicky k poruše za blokovým transformátorem. Pokud bude vlastní spotřeba napájena přes rezervní transformátor a dojde k této poruše, budou opět výsledky stejné jako v kap. 5.1 (úbytky napětí na vedení 110 kV jsou vyšší, jinak se výsledky neliší). Pokud bude rezervní napájení při přerušení jedné fáze za rezervním transformátorem naprázdno, uvažuji připojení pouze měřicího transformátoru napětí, jehož sousledná a zpětná impedance jsou velmi vysoké, induktivního charakteru a stejné velikosti ( $z_{1/2} = 1$ ). Protože je to stav naprázdno, nebudu se zabývat proudy, ale pouze fázory a velikostmi napětí:



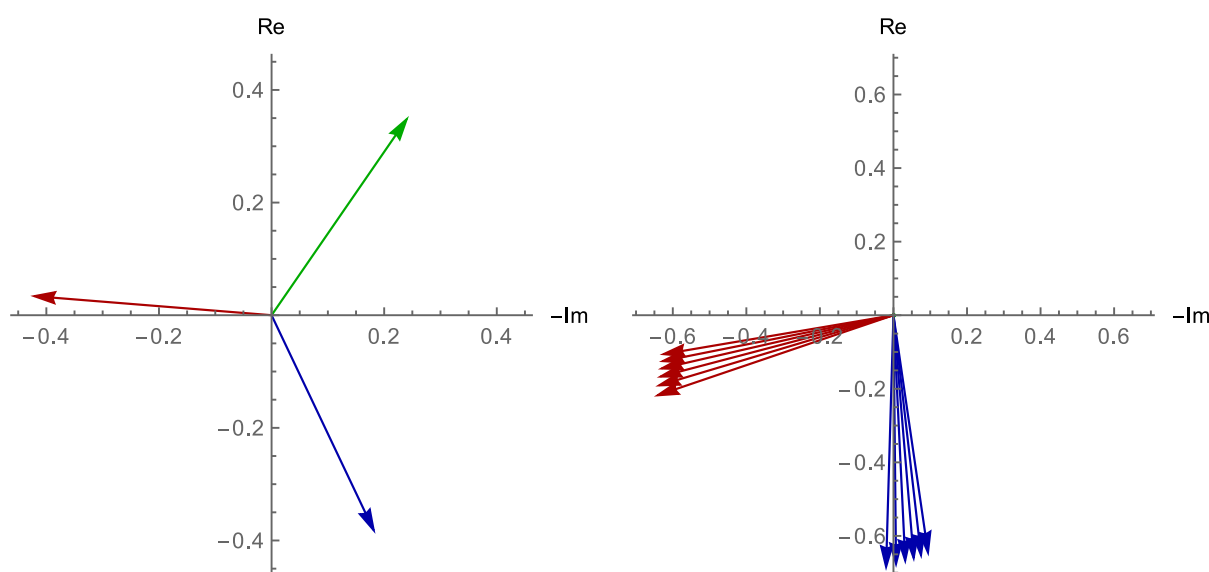
Obr. 38 – Vlevo fázory napětí před poruchou, vpravo po přerušení fáze (naprázdno, stav na VS)

Jedno fázové napětí poklesne na nulovou hodnotu, ve zbylých dvou fázích klesne napětí na 87 % původní hodnoty. Při měření sdružených napětí bude jedna hodnota stejná jako před poruchou a dvě hodnoty klesnou na 50 % původní hodnoty.

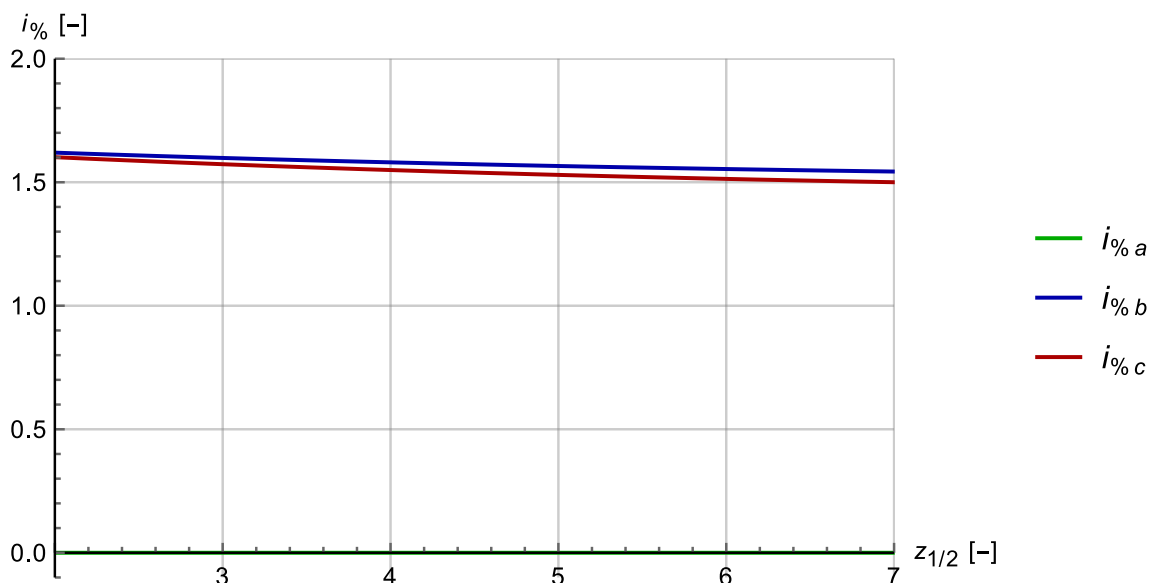
Při přerušení dvou fází bude při zatížení i stavu naprázdno ve všech fázích nulové napětí, fázová i sdružená napětí tak budou nulová a porucha bude shodná s úplnou ztrátou napájení.

### 5.3.2 Před rezervním transformátorem

Při maximálním zatížení a **přerušení jedné fáze** před rezervním transformátorem budou proudy a napětí před tímto transformátorem následující:



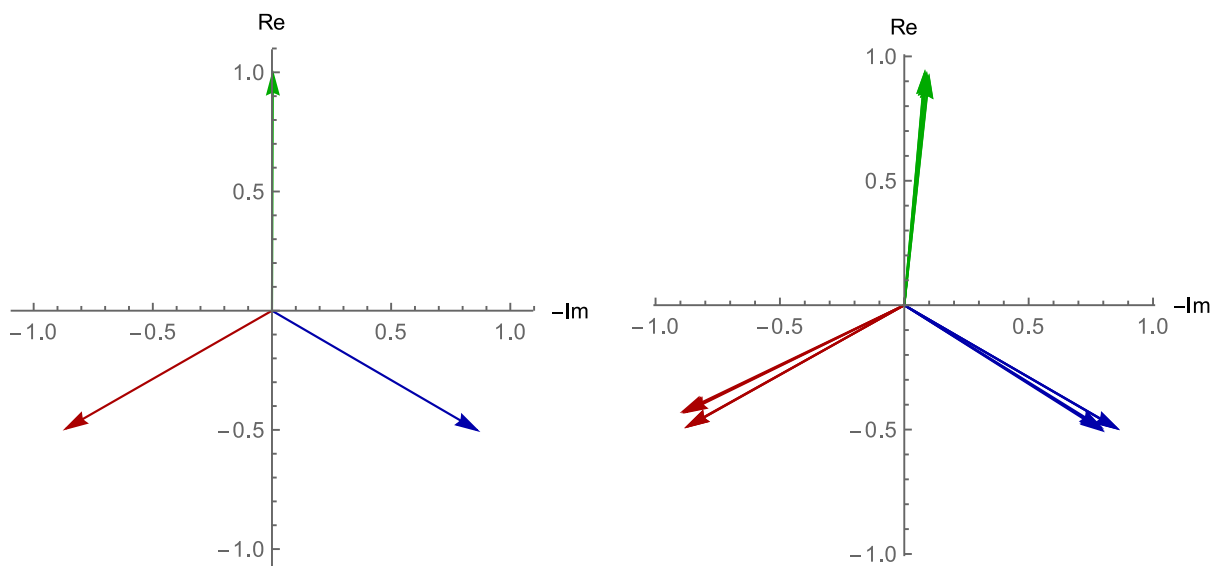
Obr. 39 – Vlevo fázory proudu před poruchou, vpravo po přerušení fáze (různé  $z_{1/2}$ , stav před RT)



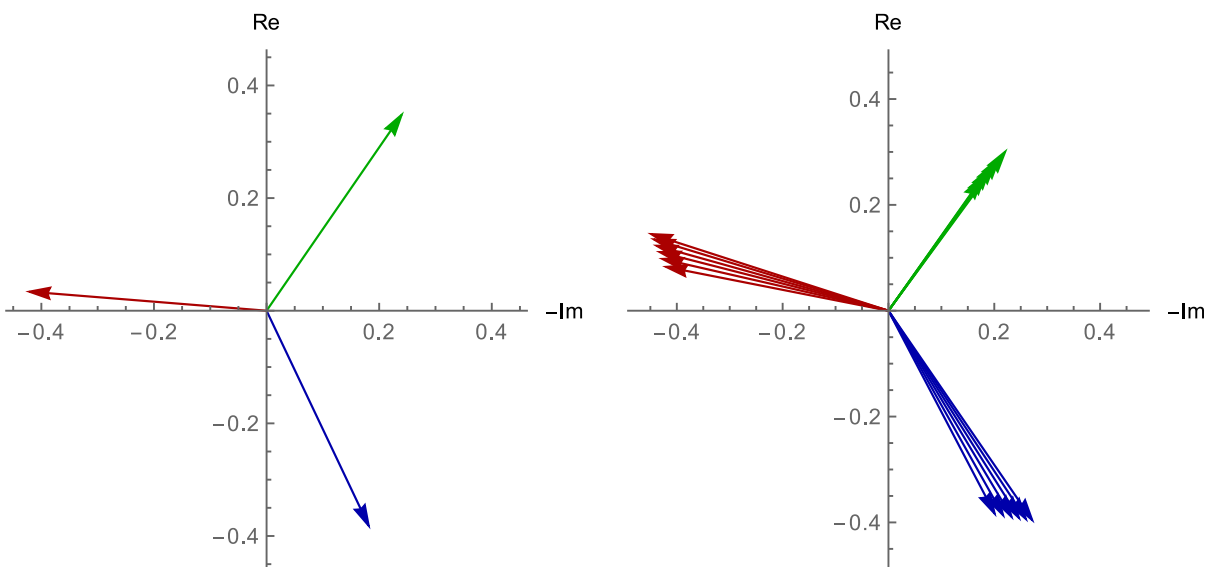
Obr. 40 – Změna velikosti proudu při přerušení fáze  $a$  v závislosti na  $z_{1/2}$  (stav před RT)

Z Obr. 40 lze odečíst, že proud ve dvou nepřerušovaných fázích stoupne před rezervním transformátorem o 50 až 60 %. Při menším zatížení se zvýšení proudů bude pohybovat také v tomto rozmezí. Proud vracející se zpět přes nulový uzel zemí bude mít trojnásobnou hodnotu oproti fázovému proudu před poruchou.

Napětí před i za rezervním transformátorem se opět téměř neliší a jejich možné hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 41. Z něj je zřejmé, že se fázory oproti bezporuchovému stavu téměř nezmění, proto se téměř nezmění ani fázové a sdružené velikosti napětí.

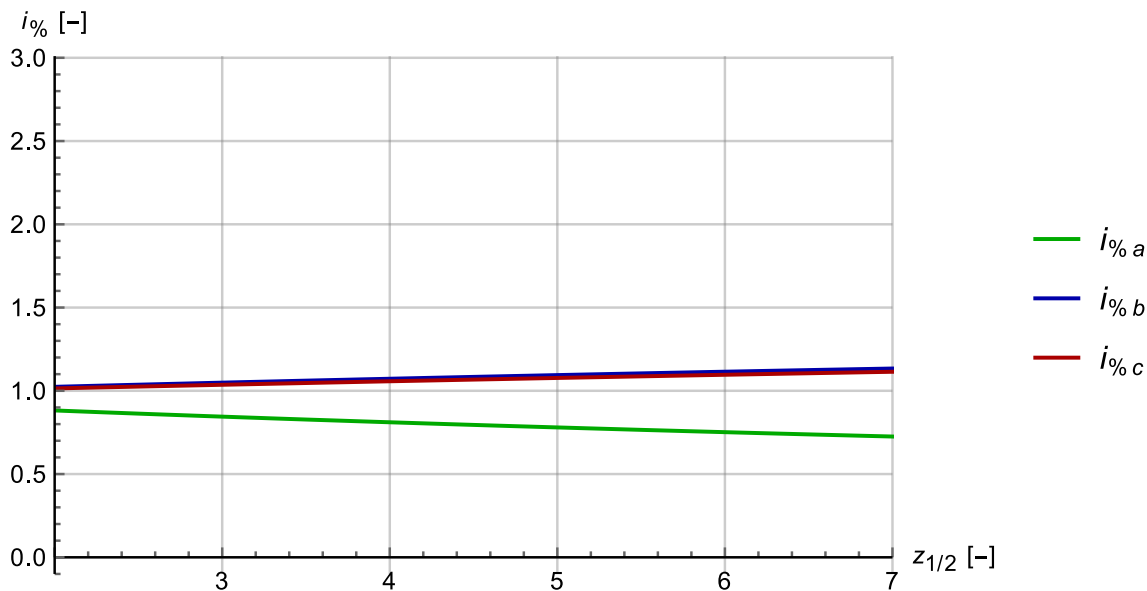


Obr. 41 – Vlevo fázory napětí před poruchou, vpravo po přerušení fáze (různé  $z_{1/2}$ , stav před i za RT)



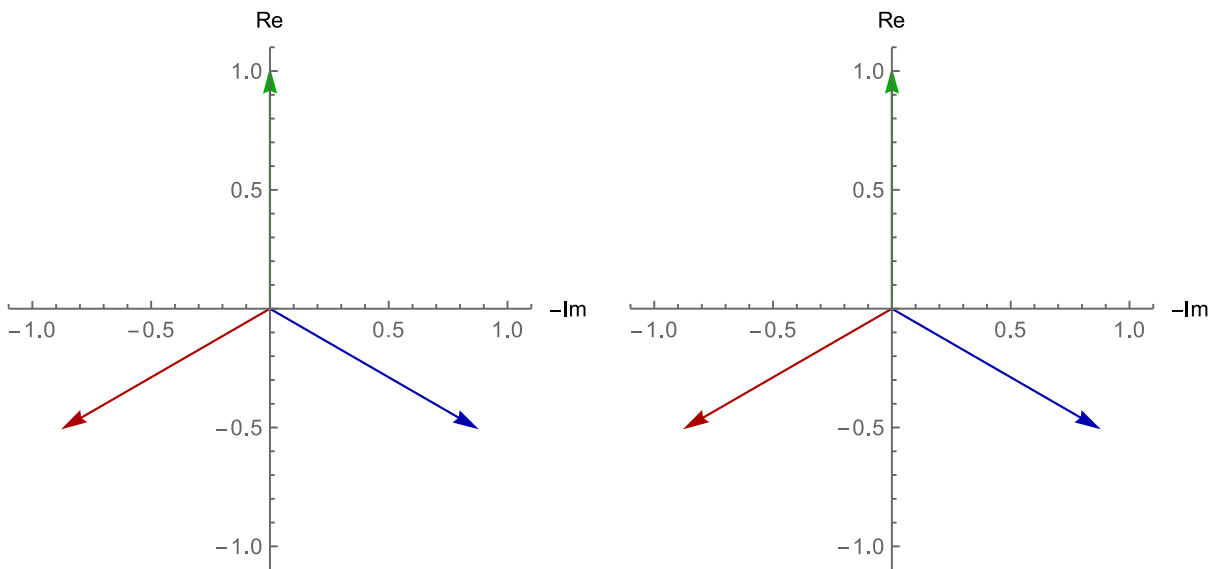
Obr. 42 – Vlevo fázory proudu před poruchou, vpravo po přerušení fáze (různé  $z_{1/2}$ , stav za RT)

Fázory proudu za rezervním transformátorem při nejvyšším zatížení jsou zobrazeny na Obr. 42. Zde už je vidět výraznější změna fázorů, závislost změny velikosti proudů při poruše na  $z_{1/2}$  je na Obr. 43. Při nejvyšším zatížení se proudová nesymetrie přenesla i na vlastní spotřebu, proud ve fázi přerušené před rezervním transformátorem tak poklesne až o 30 %, v nepřerušovaných fázích naopak až o 15 % vzroste.



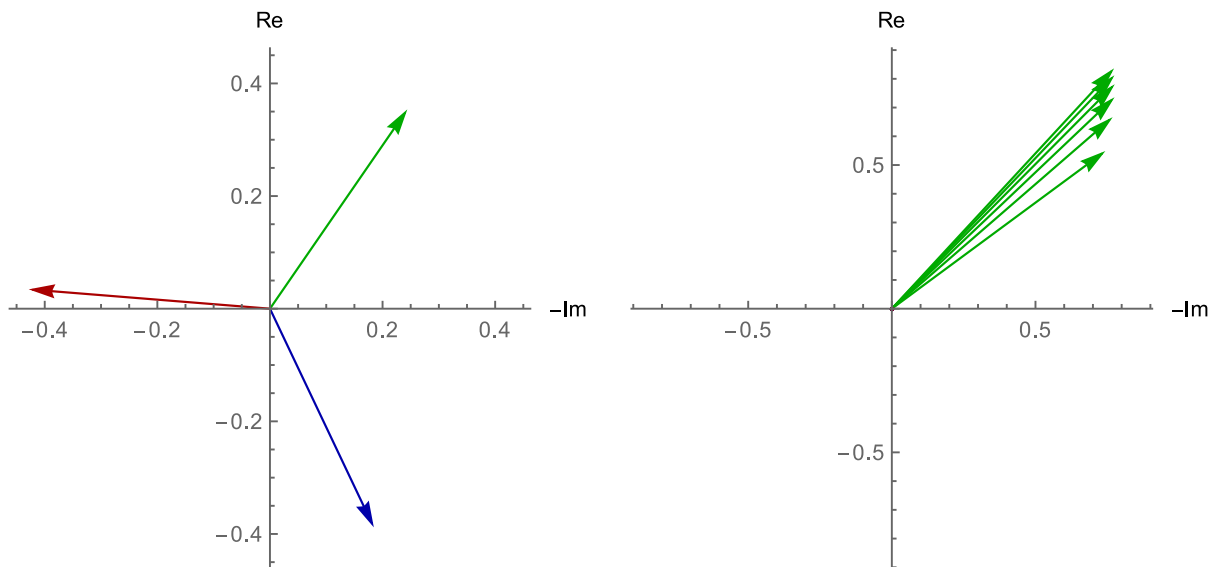
Obr. 43 – Změna velikosti proudu při přerušení fáze a v závislosti na  $z_{1/2}$  (stav na VS)

Při stejné poruše, kdy není vlastní spotřeba přes rezervní transformátor napájena a rezervní napájení je naprázdno (Obr. 44) budou napěťové poměry zcela stejné jako před poruchou, i v tomto případě je tak porucha nedetekovatelná.



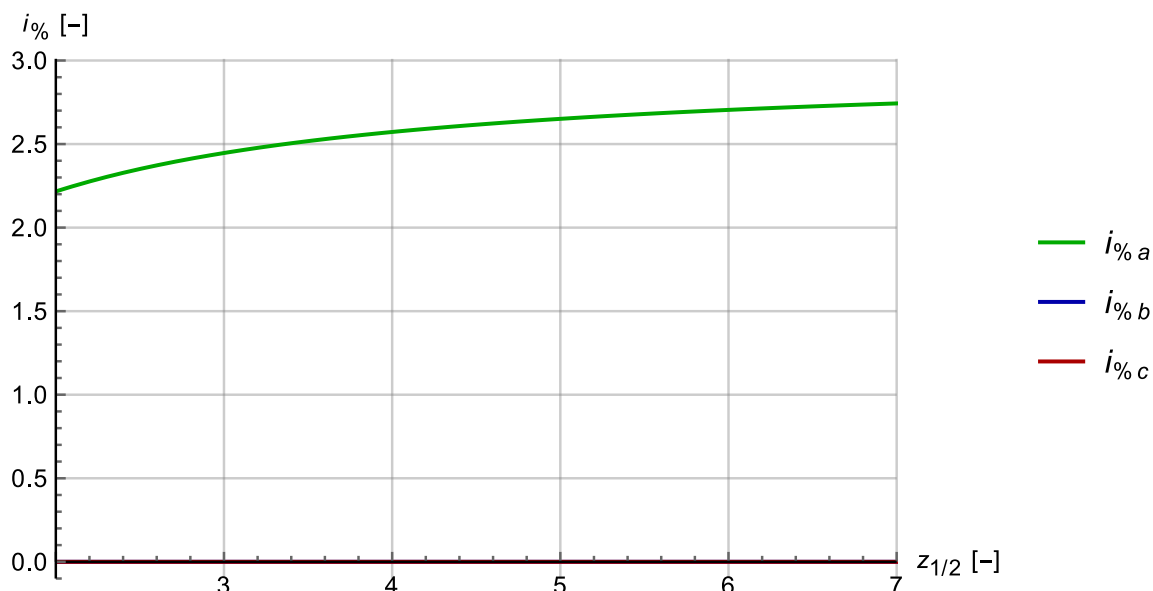
Obr. 44 – Vlevo fázory napětí před poruchou, vpravo po přerušení fáze (naprázdno, stav na VS)

Při **přerušení dvou fází** před rezervním transformátorem provedu opět obdobný výpočet. Fázory proudů před rezervním transformátorem jsou na Obr. 45, změna velikosti proudů je na Obr. 46.



Obr. 45 – Vlevo fázory proudů před poruchou, vpravo po přerušení 2 fází (různé  $z_{1/2}$ , stav před RT)

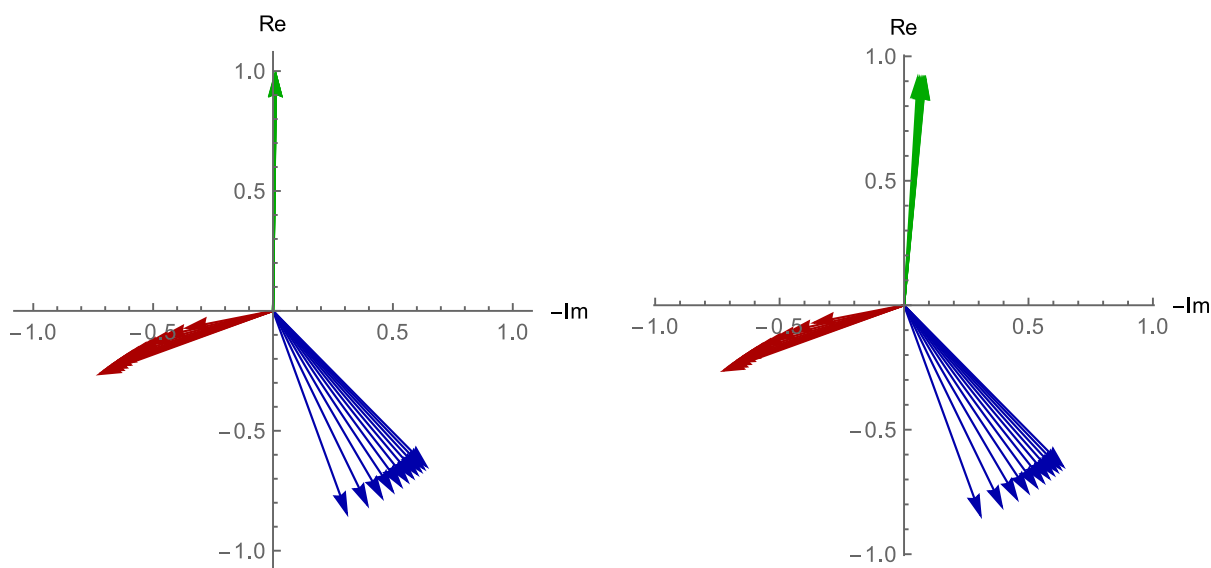




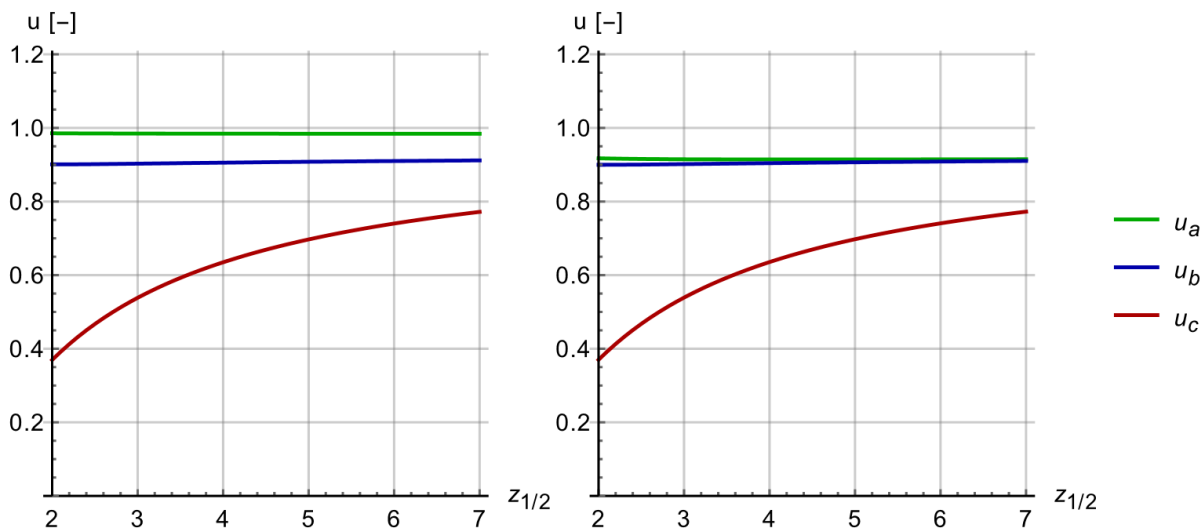
Obr. 46 – Změna velikosti proudu při přerušení fáze *a* v závislosti na  $z_{1/2}$  (stav před RT)

Výsledky jsou velmi podobné jako při přerušení dvou fází před blokovým transformátorem (Obr. 31 a Obr. 32). Ve dvou přerušených fázích tak proud neteče a v nepřerušené fázi se jeho hodnota zvýší o 120 až 175 % v závislosti na  $z_{1/2}$ . Tento proud se uzavírá zemí přes nulový uzel rezervního transformátoru.

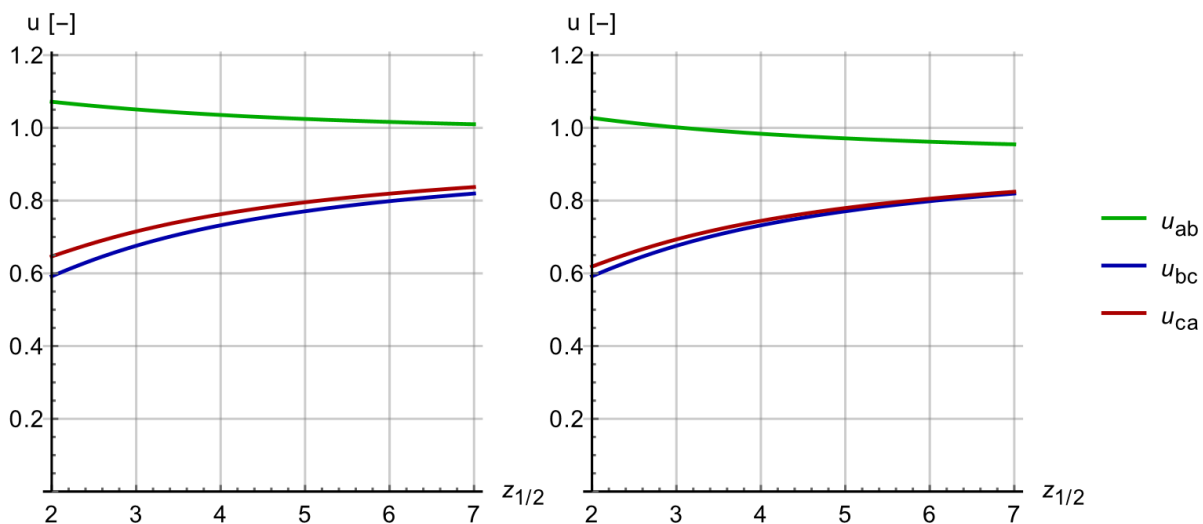
Fázory napětí před i za rezervním transformátorem jsou na Obr. 47. Velikosti fázových hodnot napětí jsou na Obr. 48, velikosti sdružených hodnot napětí jsou na Obr. 49. Ve všech případech bylo zatížení rozveden nejvyšší (velikost sousledné impedance nejmenší), proto je zde zřejmý úbytek napětí na rezervním transformátoru a hodnoty napětí se o tento úbytek liší. Tento úbytek je zřejmý pouze ve fázi *a*, protože i přes rezervní transformátor teče proud pouze fází *a*, až za transformátorem dojde díky zapojení vinutí do trojúhelníku k rozdělení proudů i do dalších fází. Mimo tento zřejmý úbytek se napětí neliší od Obr. 33, Obr. 34, Obr. 35.



Obr. 47 – Fázory napětí po přerušení 2 fází, vlevo stav před RT, vpravo stav na VS (různé  $z_{1/2}$ .)



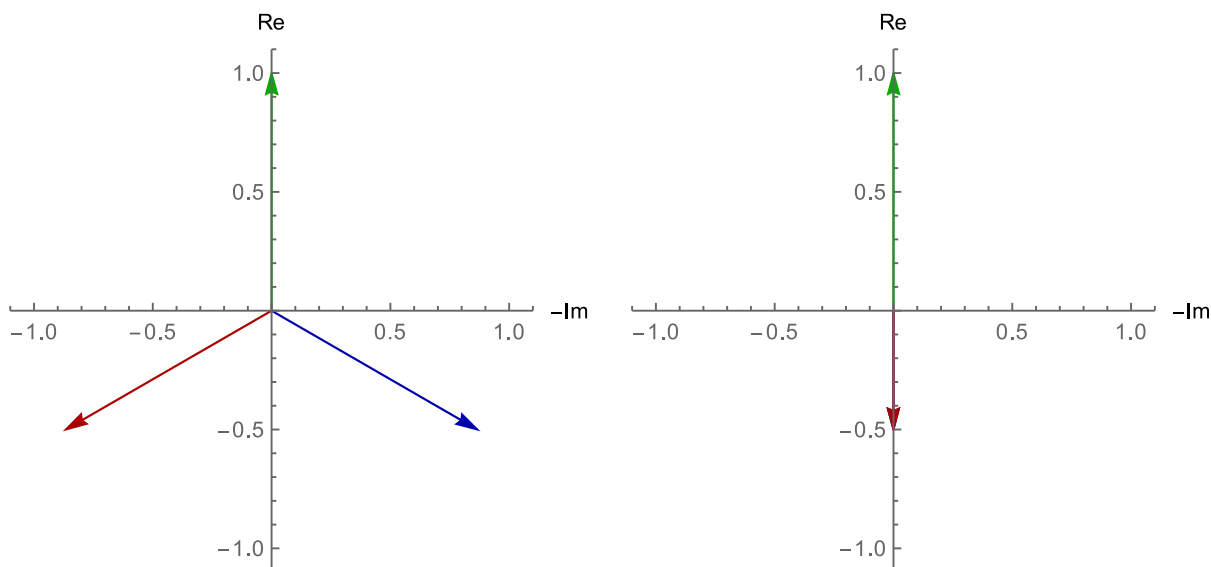
Obr. 48 – Velikosti fáz. napětí při přerušení 2 fází v závislosti na  $z_{1/2}$  (vlevo před RT, vpravo za RT)



Obr. 49 – Velikosti sdruž. napětí při přerušení 2 fází v závislosti na  $z_{1/2}$  (vlevo před RT, vpravo za RT)

Při napájení vlastní spotřeby rezervním zdrojem napájení se výsledky ani v tomto případě příliš neliší od napájení z pracovního zdroje, pouze úbytky napětí jsou v tomto případě vyšší a pozorovatelné, jak je zřejmé z Obr. 47, Obr. 48 a Obr. 49. I přes to jsou změny napětí způsobené poruchou proti těmto úbytkům stále dominantní.

Jako poslední možnost jsou zobrazeny fázory napětí na rezervním napájení při chodu naprázdno a přerušení dvou fází před rezervním transformátorem (Obr. 50). Při měření fázových napětí bude naměřeno jedno napětí jmenovité, zbylá dvě napětí přerušených fází budou poloviční. Při měření sdružených napětí budou poklesnou dvě hodnoty na 87 % původní hodnoty, třetí hodnota sdruženého napětí bude nulová.



Obr. 50 – Vlevo fázory napětí před poruchou, vpravo po přerušení 2 fází (naprázdno, stav na VS)

## 5.4 Shrnutí výsledných dopadů různých poruch

V kapitolách 5.1, 5.2 a 5.3 byly z grafů při různých poruchách v různých místech v různých režimech elektrárny učiněny závěry ohledně změny proudů a velikosti fázových i sdružených napětí. Všechna vyčíslená rozmezí těchto hodnot platí pro rozvodny vlastní spotřeby a jsou zpracována do jedné tabulky Tab. 1. Světle zeleně jsou v tabulce vyznačené nedetekovatelné změny parametru, tmavě zeleně je vyznačeno výraznější zvýšení oproti původnímu stavu. Světle červenou je vyznačen ztatečný pokles parametru, tmavě červenou je vyznačena změna parametru na nulovou hodnotu.

Generátor		ano		ne		ne		oba případy			oba případy		
Napájení		pracovní		pracovní		pracovní		rezervní			rezervní		
Porucha		-		za BT		před BT		za RT			před RT		
Přeruš. fáze		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Naprázdno		ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	obojí	obojí	ne	ano
Změna proudu	a	0	0	0	0	1	1,5-1,8	0	-	0	0,7-1	1,5-1,8	-
	b	1,3-1,6	0	1,3-1,6	0	1	0,7-0,9	1,3-1,6	-	0	1-1,1	0,7-0,9	-
	c	1,3-1,6	0	1,3-1,6	0	1	0,7-0,9	1,3-1,6	-	0	1-1,1	0,7-0,9	-
Fázové napětí	a	0,6-0,9	0	0,6-0,9	0	1	1	0,6-0,9	0	0	1	1	1
	b	0,6-0,9	0	0,6-0,9	0	1	1	0,6-0,9	0,9	0	1	1	0,5
	c	1,1-1,0	0	1,1-1,0	0	1	0,4-0,8	1,1-1,0	0,9	0	1	0,4-0,8	0,5
Sdružené napětí	ab	0,4-0,8	0	0,4-0,8	0	1	1,1-1	0,4-0,8	0,5	0	1	1,1-1,0	0,9
	bc	0,95	0	0,95	0	1	0,6-0,9	0,95	1	0	1	0,6-0,9	0
	ca	0,95	0	0,95	0	1	0,6-0,9	0,95	0,5	0	1	0,6-0,9	0,9

Tab. 1 – Shrnutí dopadů všech počítaných poruch

Díky Tab. 1 lze jednoduše srovnat dopady jednotlivých poruch. Téměř nedetekovatelnou poruchou, která má na vlastní spotřebu minimální dopad, je přerušení jedné fáze před blokovým, respektive rezervním transformátorem. Naopak k úplné ztrátě napájení dojde při přerušení dvou fází kdekoliv za blokovým/rezervním transformátorem před rozvodnami vlastní spotřeby.

Potenciálně největší problémy tak může způsobit zejména přerušení jedné fáze za blokovým/rezervním transformátorem nebo přerušení dvou fází před, kdy dojde k poklesu napětí na rozvodnách vlastní spotřeby jen v některých fázích. V obou případech pravděpodobně nedojde k podpětovému vypínání, protože nepoklesne více než jedno napětí (jak sdružené, tak fázové) pod 60 % jmenovitého napětí. Protože se zde podíl zpětné složky proudu oproti sousledné blíží 100 %, pohony vybavené ochranou proti nesymetrii tuto poruchu pravděpodobně zaznamenají a může tak dojít k jejich vypnutí. Při jakékoliv poruše před transformátorem je detekovatelná před transformátorem netočivá složka (procházející nulovým uzlem a naměřitelná ochranou nulového uzlu), za transformátor již netočivá složka neproniká a je zde vždy detekovatelná pouze zpětná složka.

Nebezpečné mohou být tyto poruchy i pro rezervní napájení naprázdno, kde záleží na reakci automatiky zásoků rezervy. Pokud pokles jednoho napětí (fázového / sdruženého) není vyhodnocen jako ztráta napětí, pak bude jedna z těchto poruch (přerušení 1 fáze za RT / 2 fází před RT) nedekována. Tato porucha se poté projeví až při ztrátě pracovního napětí a z toho plynoucím přepnutím na rezervní napájení.

## 6 Závěr

V této práci jsem rozebral možné poruchy typu přerušení fáze na napájení vlastní spotřeby jaderné elektrárny a její dopady na ni. Tato porucha se projevuje vznikem nesymetrických napěťových a proudových poměrů. Oproti známější a běžnější nesymetrické poruše, kterou je zkrat, nevznikají při přerušení fáze velmi vysoké zkratové proudy. Tyto proudy mají nebezpečné následky, jsou však jednoduše detekovatelné a elektrické ochrany jsou na ně připraveny. Při přerušení fáze dojde typicky ke vzrůstu proudu (v řádu desítek procent) v nepřerušovaných fázích a ke změnám napěťových poměrů. Na všechny tyto možné nesymetrie nebývají zpravidla ochrany správně připraveny a v elektrárně mohou nastat nepředvídané provozní stavy.

To se potvrdilo při těchto poruchách v jiných jaderných elektrárnách, kde k přerušení fáze na napájení elektrárny došlo a porucha musela být vyřešena až manuálním zásahem personálu elektráren. Protože následky této poruchy silně závisí na koncepci napájení vlastní spotřeby dané elektrárny, musí být pro každou koncepci napájení vyšetřeny zvlášť. V praktické části práce jsem proto vyšetřoval následky této poruchy na napájení vlastní spotřeby v Jaderné elektrárně Temelín.

V teoretické části jsem se nejprve věnoval metodě řešení poruch typu přerušení fáze v harmonickém ustáleném stavu, která vychází z transformace tří fázových hodnot na tři symetrické složky (sousednou, zpětnou a netočivou). Při popisu soustavy v těchto složkách lze řešením jednoduchých rovnic plynoucích z odvozených vztahů pro danou poruchu odvodit proudy a napětí ve složkách. Pro každou poruchu lze i ve složkové soustavě vytvořit náhradní zapojení těchto složek podle rovnic a z nich při zjišťování složkových hodnot vycházet, což je názornější a zřejmější způsob řešení. Po zpětné transformaci hodnot ze složkové soustavy lze zjistit výsledné proudy a napětí jednotlivých fází po poruše.

Pro řešení je nutný popis všech prvků v soustavě ve všech složkách. To je v této kapitole také popsáno, jako nejproblematictější se jeví analýza netočivé složky pro transformátor a vedení. U transformátoru je třeba pro konkrétní zapojení vinutí pracovat se správným náhradním schématem, odvozeným z vlastností daného zapojení. U vedení byl uveden postup výpočtu netočivé impedance z konfigurace vedení a typu vodičů, podle kterého byl tento parametr zjištěn pro obě vedení (110 a 400 kV) napájející vlastní spotřebu.

V další části jsem se soustředil již na popis vlastní spotřeby Jaderné elektrárny Temelín. Kvůli přítomnosti transformátorů jsou převedeny všechny impedance na poměrné jednotky, i následný výpočet probíhal v poměrných jednotkách. Ze známých zatížení rozveden vlastní spotřeby během odstávky a provozu bylo určeno rozpětí, ve kterém se pohybuje sousledná impedance samotné vlastní spotřeby. Protože je vlastní spotřeba tvořena zejména asynchronními motory, tak se zpětná impedance od sousledné liší (točivé stroje mají zpětnou impedanci odlišnou). Ze zastoupení motorů na vlastní spotřebě bylo určeno, že zpětná

impedance bude určitě v rozmezí poloviny až sedminy sousledné impedance. Poměr mezi souslednou a zpětnou impedancí se tak pohybuje v rozmezí 2 až 7 a je značen jako  $z_{1/2}$ . Tento parametr je důležitý, protože zejména na něm výsledné proudové a napěťové poměry po poruše závisejí. Pro přesné zjištění tohoto parametru by muselo být při každém provozním stavu provedeno měření či výpočet (z parametrů všech připojených spotřebičů, které nebývají vždy dostupné).

Ze známých poměrných impedancí všech zařízení a rozpětí impedancí vlastní spotřeby vychází výpočet, který je třeba rozdělit pro různé způsoby napájení. Ve všech případech téměř nezáleží na velikosti zatížení rozvoden, to ovlivňuje pouze velikost úbytků napětí, které se pohybují v řádu procent a oproti změnám napětí způsobených poruchou jsou zanedbatelné.

Pracovní způsob napájení se liší při připojeném či nepřipojeném generátoru, rezervní způsob napájení je v obou případech stejný. Pro každý z těchto tří způsobů jsem vytvořil schéma ve všech složkách, které jsem následně zjednodušil. Velikost netočivé impedance je navíc rozdílná, pokud k poruše dojde před nebo za transformátorem s vinutím zapojeným do uzemněné hvězdy (což je blokový a rezervní transformátor). Tím se řešení rozdělilo na pět různých případů poruchy, v každém z těchto případů může dojít k přerušení jedné nebo dvou fází. Pro všechny tyto možnosti jsem vypočítal proud a rozdíl napětí v místě poruchy ve složkách. Z nich byly zahrnutím úbytků napětí, eliminací nulové složky blokovým/rezervním transformátorem a korekcí nulového uzlu napětí zjištěny složkové proudy a napětí v rozvodnách vlastní spotřeby, které byly následně převedeny na fázové hodnoty.

Grafy fázorů a velikostí napětí a proudů společně s vysvětlujícím popisem jsou v kap. 5, výsledné dopady všech případů poruchy na vlastní spotřebu elektrárny jsou shrnuty v Tab. 1. Z této tabulky lze určit, jaké poruchy představují pro elektrárnu jaké nebezpečí.

Při přerušení jedné fáze před blokovým/rezervním transformátorem nedojde na vlastní spotřebě k žádné výrazné změně na napájení, proudy i napětí se nijak nezmění a vlastní spotřeba může být takto dále provozována. Nesymetrie zůstane pouze před těmito transformátory, kde se dva proudy v nepřerušovaných fázích zvýší, což může vést ke zvýšenému a nesymetrickému namáhání zejména těchto transformátorů. Naopak při přerušení dvou fází kdekoliv za těmito transformátory dojde k úplné ztrátě napájení, napětí i proudy budou ve všech fázích nulové. Důsledky jsou tak stejné jako přerušení všech fází, na což jsou elektrické ochrany vlastní spotřeby připraveny.

Nebezpečné pro elektrárnu může být přerušení dvou fází před blokovým/rezervním transformátorem nebo přerušení jedné fáze za těmito transformátory. Pokud dojde k jedné z těchto poruch na napájení zrovna napájecím vlastní spotřebu, dojde k mírným poklesům některých fázových i sdružených napětí, takže pravděpodobně nedojde k podpěťovému vypínání. Na pohonech s ochranou proti nesymetrii bude pravděpodobně odhalen velký podíl zpětné složky proudu (blíží se k 100 %), což povede k jejich odpojení. Tato porucha tak může napájení vlastní spotřeby elektrárny významně ohrozit.

Přerušení dvou fází před rezervním transformátorem nebo jedné fáze za tímto transformátorem může být nebezpečné i při provozu rezervního napájení naprázdno. Zde tato porucha v závislosti na způsobu měření a vyhodnocení nemusí být automatikou záskoku rezervy zjištěna. Při ztrátě pracovního napájení tak může dojít k přepnutí na rezervní napájení, které je touto poruchou zasaženo a ta se tak může dále rozvinout obdobně jako je popsáno v přechozím odstavci.

Z těchto závěrů plyne, že porucha přerušení fáze na napájení vlastní spotřeby může v určitých případech ohrozit elektrárnu, zejména může způsobit odepnutí elektrických pohonů vybavených ochranou proti nesymetrii od napájení. Nebezpečná může být i pro rezervní napájení naprázdno, na němž nemusí být odhalena a může se projevit až při přenesení napájení z pracovního způsobu na rezervní.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] TLUSTÝ, Josef. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [3] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Impact of Open Phase Conditions on Electrical Power Systems of Nuclear Power Plants*. Vídeň: IAEA, 2017. ISBN 978-92-0-108516-0.  
Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1755\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1755_web.pdf).
- [5] NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Robustness of Electrical Systems of Nuclear Power Plants in Light of the Fukushima Daiichi Accident*. Paříž: NEA, 2015.  
Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2015/csni-r2015-4.pdf>.
- [6] CHANG, C. *Analysis of Open-Phase Conditions in Korean Standard Nuclear Power Plants and Fault Detection Scheme*. Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 2017.  
Dostupné z: <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE07113389>.
- [7] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [8] HODINKA, Miloslav, Štefan FECKO a František NĚMEČEK. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-030-0065-3.
- [9] PROCHÁZKA, Radek. *Stožáry VVN III* [online]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4192-stozary-vvn-iii>
- [10] TICHÁ, Gabriela. *Elektrická část JE VVER 1000*. Brno, 2011.



# Seznam použitých zkratek

AM – asynchronní motor

BA, BB, BC, BD – označení rozvoden vlastní spotřeby

BT – blokový transformátor

ETE – Jaderná elektrárna Temelín

OT – odbočkový transformátor

RT – rezervní transformátor

V110 – vedení 110 kV

V400 – vedení 400 kV

VS – vlastní spotřeba

VS+T – spojená vlastní spotřeba a předřazený transformátor

Indexy a, b, c – označují jednotlivé fáze

Indexy 1, 2, 0 – označují jednotlivé složky

# Přílohy

## Seznam příloh:

Příloha 1 - Kód v programu Wolfram Mathematica použitý k výpočtu

Příloha 1 - Kód v programu Wolfram Mathematica použitý k výpočtu

```

In[1]:= (*definice komplexního otočení o 120°*)
a = EI* $\frac{2\pi}{3}$ ;

In[2]:= (*funkce na vykreslení fázorů*)
presnost = 0.01;
zobrazvektory[list_] :=
Module[{list2, Uvekt, Uvekt2, Uarrow, Ubararrow, delka, range, barvy, popis},
list2 = Flatten[list];
Uvekt = Transpose[{-Im[list2], Re[list2]}];
delka = Uvekt // Length;
Uvekt2 = Transpose[{Table[{0, 0}, {i, delka}], Uvekt}];
Uarrow = Arrow/@Uvekt2;
barvy = Darker/@Hue/ @(Range[delka] / delka);
Ubararrow = Transpose[{barvy, Uarrow}];
range = 1.1 * Max[Abs /@ Flatten[Uvekt]];
popis = StringJoin /@ Transpose[
{TextString /@ Range[delka], ConstantArray[" ", delka], ToString /@
(Re /@ Round[list2, presnost] + (Im /@ Round[list2, presnost]) * j)}];
Show[Graphics /@ Ubararrow, Axes -> True, AxesLabel -> {"-Im(U) [kV]",
"Re(U) [kV]"}, PlotRange -> {{-range, range}, {-range, range}},
Epilog -> Inset[SwatchLegend[barvy, popis], {1.1 range, 0.6 range}]]]

zobrazvektory2[list_] :=
Module[{list2, Uvekt, Uvekt2, Uarrow, Ubararrow, delka, range, barvy},
list2 = Flatten[list];
Uvekt = Transpose[{-Im[list2], Re[list2]}];
delka = Uvekt // Length;
Uvekt2 = Transpose[{Table[{0, 0}, {i, delka}], Uvekt}];
Uarrow = Arrow/@Uvekt2;
barvy = Darker/@Hue/ @(Range[delka] / delka);
Ubararrow = Transpose[{barvy, Uarrow}];
range = 1.1 * Max[Abs /@ Flatten[Uvekt]];
Show[Graphics /@ Ubararrow, Axes -> True,
AxesLabel -> {"-Im", "Re"}, PlotRange -> {{-range, range}, {-range, range}}]]]

In[5]:= (*funkce pro paralelní kombinaci impedancí*)
par[list_] := 
$$\frac{1}{\text{Total}\left[\frac{1}{\#} \& /@ \text{list}\right]}$$


(*vztažné hodnoty*)
Sv = 2 * 63;
Uv = 6.3;
Zv =  $\frac{Uv^2}{Sv}$ ;
Iv =  $\frac{Sv}{Uv * \sqrt{3}}$ ;

```

```
(*blokový transformátor*)  
(*zapojení vinutí YNd1*)  
Sbt = 3 * 400;  
U1bt = 420;  
U2bt = 24;  
I1bt = 1.650;  
I2bt = 16.666;  
ukbt = 0.14;  
Pkbt = 0.75;  
  
xbt = ukbt *  $\frac{S_v}{S_{bt}}$ ;  
  
rbt =  $\frac{P_{kbt}}{S_{bt}}$  *  $\frac{S_v}{S_{bt}}$ ;  
  
zbt = rbt +  $\sqrt{x_{bt}^2 - r_{bt}^2} * I$ ;
```

```

(*odbočkový transformátor*)
(*zapojení vinutí Dd0d0*)
S1ot = 63;
S2ot = 31.5;
U1ot = 24;
U2ot = 6.3;
I1ot = 1.516;
I2ot = 2.887;
uk12ot = 0.0857;
uk13ot = 0.0875;
uk23ot = 0.166;
Pk12ot = 0.1237;
Pk13ot = 0.1282;
Pk23ot = 0.2772;

r12ot = Pk12ot *  $\frac{Sv}{S2ot^2}$ ;

r13ot = Pk13ot *  $\frac{Sv}{S2ot^2}$ ;

r23ot = Pk23ot *  $\frac{Sv}{S2ot^2}$ ;

z12ot = r12ot + I *  $\sqrt{\left(uk12ot * \frac{Sv}{S2ot}\right)^2 - r12ot^2}$ ;

z13ot = r13ot + I *  $\sqrt{\left(uk13ot * \frac{Sv}{S2ot}\right)^2 - r13ot^2}$ ;

z23ot = r23ot + I *  $\sqrt{\left(uk23ot * \frac{Sv}{S2ot}\right)^2 - r23ot^2}$ ;

z1ot =  $\frac{z12ot + z13ot - z23ot}{2}$ ;

z2ot =  $\frac{z12ot + z23ot - z13ot}{2}$ ;

z3ot =  $\frac{z13ot + z23ot - z12ot}{2}$ ;

(*impedance OT při dvou aktivních sekcích*)
zot2 = par[{z1ot + z2ot, z1ot + z2ot}];

(*impedance OT při čtyřech aktivních sekcích*)
zot4 = par[{z1ot + par[{z2ot, z3ot}], z1ot + par[{z2ot, z3ot}]}];

```

```

(*rezervní transformátor*)
(*zapojení vinutí YNd1d1*)
S1rt = 63;
S2rt = 31.5;
U1rt = 110;
U2rt = 6.3;
I1rt = 0.331;
I2rt = 2.887;
uk12rt = 0.0934;
uk13rt = 0.0925;
uk23rt = 0.1844;
Pk12rt = 0.1221;
Pk13rt = 0.1173;
Pk23rt = 0.2711;

r12rt = Pk12rt *  $\frac{Sv}{S2rt^2}$ ;

r13rt = Pk13rt *  $\frac{Sv}{S2rt^2}$ ;

r23rt = Pk23rt *  $\frac{Sv}{S2rt^2}$ ;

z12rt = r12rt + I *  $\sqrt{\left(uk12rt * \frac{Sv}{S2rt}\right)^2 - r12rt^2}$ ;

z13rt = r13rt + I *  $\sqrt{\left(uk13rt * \frac{Sv}{S2rt}\right)^2 - r13rt^2}$ ;

z23rt = r23rt + I *  $\sqrt{\left(uk23rt * \frac{Sv}{S2rt}\right)^2 - r23rt^2}$ ;

z1rt =  $\frac{z12rt + z13rt - z23rt}{2}$ ;

z2rt =  $\frac{z12rt + z23rt - z13rt}{2}$ ;

z3rt =  $\frac{z13rt + z23rt - z12rt}{2}$ ;

(*impedance RT při dvou aktivních sekcích*)
zrt2 = par[{z1rt + z2rt, z1rt + z2rt}];

(*impedance RT při čtyřech aktivních sekcích*)
zrt4 = par[{z1rt + par[{z2rt, z3rt}], z1rt + par[{z2rt, z3rt}]}];

```

```

(*400 kV vedeni*)
X1v400 = 0.2974;
R1v400 = 0.02153;
Z1v400 = R1v400 + X1v400 * I;
R0v400 = 0.1301;
X0v400 = 0.6293;
Z0v400 = R0v400 + X0v400 * I;

x1v400 = X1v400 *  $\frac{Sv}{400^2}$  * 3;

z1v400 = Z1v400 *  $\frac{Sv}{400^2}$  * 3;

x0v400 = X0v400 *  $\frac{Sv}{400^2}$  * 3;

z0v400 = Z0v400 *  $\frac{Sv}{400^2}$  * 3;

```

```

(*110 kV vedeni*)
X1v110 = 0.3661;
R1v110 = 0.0425;
Z1v110 = R1v110 + X1v110 * I;
R0v110 = 0.1812;
X0v110 = 0.9794;
Z0v110 = R0v110 + X0v110 * I;

x1v110 = X1v110 *  $\frac{Sv}{110^2}$  * 3;

z1v110 = Z1v110 *  $\frac{Sv}{110^2}$  * 3;

x0v110 = X0v110 *  $\frac{Sv}{110^2}$  * 3;

z0v110 = Z0v110 *  $\frac{Sv}{110^2}$  * 3;

```

```

(*modelova vlastni spotreba*)
SBA = 2.6 + 1.5 I;
SBB = 0;
SBC = 2.9 + 1.9 I;
SBD = 0;
SBAmix = 11.2 + 6.4 I;
SBBmix = 11.8 + 9.1 I;
SBCmix = 9.9 + 6.3 I;
SBDmix = 12.2 + 9.4 I;

ZvsBA =  $\frac{6.3^2}{\text{Conjugate}[SBA]}$ ;
ZvsBC =  $\frac{6.3^2}{\text{Conjugate}[SBC]}$ ;
z1vsBA =  $\frac{ZvsBA}{Zv}$ ;
z1vsBC =  $\frac{ZvsBC}{Zv}$ ;

ZvsBAmax =  $\frac{6.3^2}{\text{Conjugate}[SBAmix]}$ ;
ZvsBBmax =  $\frac{6.3^2}{\text{Conjugate}[SBBmix]}$ ;
ZvsBCmax =  $\frac{6.3^2}{\text{Conjugate}[SBCmix]}$ ;
ZvsBDmax =  $\frac{6.3^2}{\text{Conjugate}[SBDmix]}$ ;
z1vsBAmax =  $\frac{ZvsBAmax}{Zv}$ ;
z1vsBBmax =  $\frac{ZvsBBmax}{Zv}$ ;
z1vsBCmax =  $\frac{ZvsBCmax}{Zv}$ ;
z1vsBDmax =  $\frac{ZvsBDmax}{Zv}$ ;

(*maximální a minimální impedance vlastní spotřeby*)
z1vs400min = par[{z1vsBA, z1vsBC}] + zot2;
z1vs400max = par[{z1vsBAmax, z1vsBBmax, z1vsBCmax, z1vsBDmax}] + zot4;
z1vs400 = {z1vs400min, z1vs400max};
z1vs110min = par[{z1vsBA, z1vsBC}] + zrt2;
z1vs110max = par[{z1vsBAmax, z1vsBBmax, z1vsBCmax, z1vsBDmax}] + zrt4;
z1vs110 = {z1vs110min, z1vs110max};
z1vs4 = {z1vs400, z1vs400, z1vs110, z1vs110};

```



(\*funkce pro transformaci do složkové soustavy a z ní\*)

```
naslozky[list_] := Module[{a}, a = EI* $\frac{2\pi}{3}$ ;
   $\frac{1}{3}$  * list.{{1, 1, 1}, {a, a2, 1}, {a2, a, 1}}
```

```
zeslozek[list_] := Module[{a}, a = EI* $\frac{2\pi}{3}$ ;
  list.{{1, a2, a}, {1, a, a2}, {1, 1, 1}}
```

In[115]= (\*výpočet v bezporuchovém stavu\*)

```
bezpreruseni[{u_, z1_, z2_, z0_}] := {{ $\frac{u}{z1}$ , 0, 0}, {0, 0, 0}}
```

(\*výpočet při přerušení jedné fáze\*)

```
preruseni1f[{u_, z1_, z2_, z0_}] := Module[{i1, i2, i0, u1, u2, u0},
```

$$i1 = \frac{u}{z1 + \frac{z2+z0}{z2+z0}};$$

$$u1 = u2 = u0 = u - i1 * z1;$$

$$i2 = \frac{-u2}{z2};$$

$$i0 = \frac{-u0}{z0};$$

```
{{i1, i2, i0}, {u1, u2, u0}}
```

```
preruseni1fbez0[{u_, z1_, z2_, z0_}] := Module[{i1, i2, i0, u1, u2, u0},
```

$$i1 = \frac{u}{z1 + z2};$$

$$u1 = u2 = u0 = u - i1 * z1;$$

$$i2 = \frac{-u2}{z2};$$

$$i0 = 0;$$

```
{{i1, i2, i0}, {u1, u2, u0}}
```

(\*výpočet při přerušení dvou fází\*)

```
preruseni2f[{u_, z1_, z2_, z0_}] := Module[{i1, i2, i0, u1, u2, u0},
```

$$i1 = i2 = i0 = u / (z1 + z2 + z0);$$

$$u1 = u - i1 * z1;$$

$$u2 = -i2 * z2;$$

$$u0 = -i0 * z0;$$

```
{{i1, i2, i0}, {u1, u2, u0}}
```

```
preruseni2fbez0[{u_, z1_, z2_, z0_}] := Module[{i1, i2, i0, u1, u2, u0},
```

$$i1 = i2 = i0 = 0;$$

$$u1 = u - i1 * z1;$$

$$u2 = -i2 * z2;$$

$$u0 = -i0 * z0;$$

```
{{i1, i2, i0}, {u1, u2, u0}}
```

In[120]= (\*funkce pro výpočet úbytku napětí\*)

```
ubytek[{{i1_, i2_, i0_}, {u1_, u2_, u0_}, {z1_, z2_, z0_}] :=
  {{i1, i2, i0}, {u1 + z1 * i1, u2 + z2 * i2, u0 + z0 * i0}}
```

```

In[121]:= (*funkce pro vynulování uzlu napětí*)
vynulujuzel[list_] := {list[[1]], list[[2]] - ConstantArray[list[[2]] // Mean, 3]}

In[122]:= (*funkce pro zaokrouhlení kvůli správnému zobrazení nulových hodnot,
korekce numerických nepřesností okolo nulové hodnoty*)
zaokrouh[{a_, b_, c_}] := {Round[a, 0.001], Round[b, 0.001], Round[c, 0.001]}

(*vykreslení vyšetřované oblasti impedance*)
pl1a = RegionPlot[2.35 ≤ z1 && z1 ≤ 19.6 &&  $\frac{1}{7} * z1 ≤ z2$  &&  $z2 ≤ \frac{1}{2} * z1$ , {z1, 0, 20},
  {z2, 0, 10}, Axes → True, Frame → None, AxesLabel → {"| z1 |", "| z2 |"},
  PerformanceGoal -> "Quality", GridLines → Automatic,
  PlotTheme → "Monochrome", PlotRangePadding → {0.2, 0}, ImageSize → 240];

pl1b = RegionPlot[2.35 ≤ z1 && z1 ≤ 19.6 && 2 ≤ z2 && z2 ≤ 7, {z1, 0, 20},
  {z2, 0, 8}, Axes → True, Frame → None, AxesLabel → {"| z1 |", "|z1/2"},
  PerformanceGoal -> "Quality", PlotTheme → "Monochrome",
  GridLines → Automatic, PlotRangePadding → {0.2, 0}, ImageSize → 240];
pl2 = GraphicsGrid[{{pl1b, pl1a}}]

(*vypocet 400 kV, provoz, preruseni za bt*)
z1celk = z1vs;
z2celk = z2vs;
z0celk = Null;

(*vypocet s obecnými hodnotami impedancí vlastní spotřeby, před ot*)
bezprslzky1 = bezpreruseni[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr1fslozky1 = preruseni1fbez0[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr2fslozky1 = preruseni2fbez0[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
bezprfaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@bezprslzky1;
pr1ffaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr1fslozky1;
pr2ffaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr2fslozky1;
bezpr1 = bezprfaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f1 = pr1ffaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f1 = pr2ffaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};

(*vypocet za odbockovym trafem, ctyri sekce v provozu*)
bezprslzky2 = ubytek[bezprslzky1, {zot4, zot4, 0}];
pr1fslozky2 = ubytek[pr1fslozky1, {zot4, zot4, 0}];
pr2fslozky2 = ubytek[pr2fslozky1, {zot4, zot4, 0}];
bezprfaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@bezprslzky2;
pr1ffaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr1fslozky2;
pr2ffaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr2fslozky2;
bezpr2 = bezprfaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f2 = pr1ffaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f2 = pr2ffaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
bezpr2nul = bezpr2 // vynulujuzel;
pr1f2nul = pr1f2 // vynulujuzel;
pr2f2nul = pr2f2 // vynulujuzel;

(*vykreslení grafů*)
pl3 = Plot[{Abs[pr1f2[[1]][[1]]] / Abs[bezpr2[[1]][[1]]],
  Abs[pr1f2[[1]][[2]]] / Abs[bezpr2[[1]][[2]]],
  Abs[pr1f2[[1]][[3]]] / Abs[bezpr2[[1]][[3]]]}, {z12, 2, 7},
  PlotRange → {{2, 7}, {-0.1, 1.7}}, GridLines → Automatic, AxesOrigin → {2, 0},

```

```

PlotLegends → {"i%a", "i%b", "i%c"}, AxesLabel → {"z1/2 [-]", "i% [-]"},
PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), ImageSize → 400, AxesStyle → Black];
p14 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr2[[1]] /. {z1 → 1, z12 → 1}},
Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr1f2[[1]]] /. z1 → 1],
{z12, 7, 2, -0.5}]]}], ImageSize → 550];
p15 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr2[[2]] /. z1 → Abs[z1vs400max]],
Show[Table[zobrazvektory2[pr1f2[[2]]] /. z1 → Abs[z1vs400max]],
{z12, 2, 7, 0.5}]]}], ImageSize → 550];
p16 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr2nul[[2]] /. z1 → Abs[z1vs400max]],
Show[Table[zobrazvektory2[pr1f2nul[[2]]] /. z1 → Abs[z1vs400max]],
{z12, 2, 7, 0.5}]]}], ImageSize → 550];
p17 = Plot[Evaluate[Abs[pr1f2nul[[2]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]], {z12, 2, 7},
PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), AxesLabel → {"z1/2 [-]", "u [-]"},
AxesStyle → Black, GridLines → Automatic, ImageSize → 400,
PlotLegends → {"ua", "ub", "uc"}, PlotRange → {0, 1.21}];
p18 = Plot[Evaluate[Abs[(pr1f2nul[[2]] - RotateLeft[pr1f2nul[[2]])] /.
z1 → Abs[z1vs400max]] /  $\sqrt{3}$ ], {z12, 2, 7},
PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), AxesLabel → {"z1/2 [-]", "u [-]"},
AxesStyle → Black, GridLines → Automatic, ImageSize → 400,
PlotLegends → {"uab", "ubc", "uca"}, PlotRange → {0, 1.21}];

In[735]:= (*vypocet 400 kV, odstávka, porucha před BT*)
z1celk = z1v400 + zbt + z1vs;
z2celk = z1v400 + zbt + z2vs;
z0celk = z0v400 + zbt;
(*vypocet s obecnými hodnotami impedancí vlastní spotřeby, v rozvodně*)
bezprslozky1 = bezpreruseni[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr1fslozky1 = preruseni1f[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr2fslozky1 = preruseni2f[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
bezprfazel = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ bezprslozky1;
pr1ffazel = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr1fslozky1;
pr2ffazel = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr2fslozky1;
bezpr1 = bezprfazel /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f1 = pr1ffazel /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f1 = pr2ffazel /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za vedením*)
bezprslozky2 = ubytek[bezprslozky1, {z1v400, z1v400, z0v400}];
pr1fslozky2 = ubytek[pr1fslozky1, {z1v400, z1v400, z0v400}];
pr2fslozky2 = ubytek[pr2fslozky1, {z1v400, z1v400, z0v400}];
bezprfaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ bezprslozky2;
pr1ffaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr1fslozky2;
pr2ffaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr2fslozky2;
bezpr2 = bezprfaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f2 = pr1ffaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f2 = pr2ffaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za blokovým trafem*)
netoc0 = {{1, 1, 0}, {1, 1, 0}};
bezprslozky3 = ubytek[bezprslozky2, {zbt, zbt, zbt}] * netoc0;
pr1fslozky3 = ubytek[pr1fslozky2, {zbt, zbt, zbt}] * netoc0;

```

```

pr2fslozky3 = ubytek[pr2fslozky2, {zbt, zbt, zbt}] * netoc0;
bezprfaze3 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (bezprslolzky3);
pr1ffaze3 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr1fslozky3);
pr2ffaze3 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr2fslozky3);
bezpr3 = bezprfaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f3 = pr1ffaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f3 = pr2ffaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za odbockovym trafem, dve sekce v provozu*)
bezprslolzky4 = ubytek[bezprslolzky3, {zot2, zot2, 0}];
pr1fslozky4 = ubytek[pr1fslozky3, {zot2, zot2, 0}];
pr2fslozky4 = ubytek[pr2fslozky3, {zot2, zot2, 0}];
bezprfaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ bezprslolzky4];
pr1ffaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr1fslozky4];
pr2ffaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr2fslozky4];
bezpr4 = bezprfaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f4 = pr1ffaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f4 = pr2ffaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za odbockovym trafem, ctyri sekce v provozu*)
bezprslolzky5 = ubytek[bezprslolzky3, {zot4, zot4, 0}];
pr1fslozky5 = ubytek[pr1fslozky3, {zot4, zot4, 0}];
pr2fslozky5 = ubytek[pr2fslozky3, {zot4, zot4, 0}];
bezprfaze5 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ bezprslolzky5];
pr1ffaze5 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr1fslozky5];
pr2ffaze5 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr2fslozky5];
bezpr5 = bezprfaze5 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f5 = pr1ffaze5 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f5 = pr2ffaze5 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
bezprslolzky =
  {bezprslolzky1, bezprslolzky2, bezprslolzky3, bezprslolzky4, bezprslolzky5};
pr1fslozky = {pr1fslozky1, pr1fslozky2, pr1fslozky3, pr1fslozky4, pr1fslozky5};
pr2fslozky = {pr2fslozky1, pr2fslozky2, pr2fslozky3, pr2fslozky4, pr2fslozky5};
bezprfaze = {bezprfazel, bezprfaze2, bezprfaze3, bezprfaze4, bezprfaze5};
pr1ffaze = {pr1ffazel, pr1ffaze2, pr1ffaze3, pr1ffaze4, pr1ffaze5};
pr2ffaze = {pr2ffazel, pr2ffaze2, pr2ffaze3, pr2ffaze4, pr2ffaze5};
bezpr = {bezpr1, bezpr2, bezpr3, bezpr4, bezpr5};
pr1f = {pr1f1, pr1f2, pr1f3, pr1f4, pr1f5};
pr2f = {pr2f1, pr2f2, pr2f3, pr2f4, pr2f5};
(*vykreslení grafů*)
pl9 = Plot[{Abs[pr1f1[[1]][[1]]] / Abs[bezpr1[[1]][[1]]] /. z1 → Abs[z1vs400min],
  Abs[pr1f1[[1]][[2]]] / Abs[bezpr1[[1]][[2]]] /. z1 → Abs[z1vs400min],
  Abs[pr1f1[[1]][[3]]] / Abs[bezpr1[[1]][[3]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]},
  {z12, 2, 7}, PlotRange → {{2, 7}, {-0.1, 2}}, GridLines → Automatic,
  AxesOrigin → {2, 0}, PlotLegends → {"ia", "ib", "ic"},
  AxesLabel → {"z1/2 [-]", "ia [-]"}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  ImageSize → 400, AxesStyle → Black];
pl10 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[
  bezpr1[[1]] /. {z1 → Abs[z1vs400min], z12 → 1}},
  Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr1f1[[1]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
    {z12, 7, 2, -1}]}], ImageSize → 550];

```

```

p111 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr2[[2]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
  Show[Table[zobrazvektory2[pr1f2[[2]] /. z1 → z], {z12, 2, 7, 2.5},
    {z, Abs[z1vs400max], Abs[z1vs400min], 3}]]}}, ImageSize → 550];
p112 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr5[[1]] /.
  {z1 → Abs[z1vs400min], z12 → 1}},
  Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr1f5[[1]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
    {z12, 7, 2, -1}]]}}, ImageSize → 550];
p113 = Plot[{Abs[pr2f1[[1]][[1]]] / Abs[bezpr1[[1]][[1]]] /. z1 → Abs[z1vs400min],
  Abs[pr2f1[[1]][[2]]] / Abs[bezpr1[[1]][[2]]] /. z1 → Abs[z1vs400min],
  Abs[pr2f1[[1]][[3]]] / Abs[bezpr1[[1]][[3]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]},
  {z12, 2, 7}, PlotRange → {{2, 7}, {-0.1, 3.01}}, GridLines → Automatic,
  AxesOrigin → {2, 0}, PlotLegends → {"ia", "ib", "ic"},
  AxesLabel → {"z1/2 [-]", "i% [-]"}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  ImageSize → 400, AxesStyle → Black];
p114 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[
  bezpr1[[1]] /. {z1 → Abs[z1vs400min], z12 → 1}},
  Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr2f2[[1]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
    {z12, 7, 2, -1}]]}}, ImageSize → 550];
p115 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr2[[2]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
  Show[Table[zobrazvektory2[pr2f2[[2]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
    {z12, 2, 7, 0.5}]]}}, ImageSize → 550];
p116 = Plot[Evaluate[Abs[pr2f2[[2]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]], {z12, 2, 7},
  PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), AxesLabel → {"z1/2 [-]", "u [-]"},
  AxesStyle → Black, GridLines → Automatic, ImageSize → 400,
  PlotLegends → {"ua", "ub", "uc"}, PlotRange → {0, 1.21}];
p117 = Plot[Evaluate[Abs[(pr2f2[[2]] - RotateLeft[pr2f5[[2]])] /.
  z1 → Abs[z1vs400min]] /  $\sqrt{3}$ ], {z12, 2, 7},
  PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), AxesLabel → {"z1/2 [-]", "u [-]"},
  AxesStyle → Black, GridLines → Automatic, ImageSize → 400,
  PlotLegends → {"uab", "ubc", "uca"}, PlotRange → {0, 1.21}];
p118 = Plot[{Abs[pr2f5[[1]][[1]]] / Abs[bezpr5[[1]][[1]]] /. z1 → Abs[z1vs400min],
  Abs[pr2f5[[1]][[2]]] / Abs[bezpr5[[1]][[2]]] /. z1 → Abs[z1vs400min],
  Abs[pr2f5[[1]][[3]]] / Abs[bezpr5[[1]][[3]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]},
  {z12, 2, 7}, PlotRange → {{2, 7}, {-0.1, 3.01}}, GridLines → Automatic,
  AxesOrigin → {2, 0}, PlotLegends → {"ia", "ib", "ic"},
  AxesLabel → {"z1/2 [-]", "i% [-]"}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  ImageSize → 400, AxesStyle → Black];
p119 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[
  bezpr5[[1]] /. {z1 → Abs[z1vs400min], z12 → 1}},
  Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr2f5[[1]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
    {z12, 7, 2, -1}]]}}, ImageSize → 550];
p120 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr5[[2]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
  Show[Table[zobrazvektory2[pr2f5[[2]] /. z1 → Abs[z1vs400min]],
    {z12, 2, 7, 0.5}]]}}, ImageSize → 550];
p121 = Plot[Evaluate[Abs[pr2f5[[2]]] /. z1 → Abs[z1vs400min]], {z12, 2, 7},
  PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), AxesLabel → {"z1/2 [-]", "u [-]"},
  AxesStyle → Black, GridLines → Automatic, ImageSize → 400,
  PlotLegends → {"ua", "ub", "uc"}, PlotRange → {0, 1.21}];
p122 = Plot[Evaluate[Abs[(pr2f5[[2]] - RotateLeft[pr2f5[[2]])] /.
  z1 → Abs[z1vs400min]] /  $\sqrt{3}$ ], {z12, 2, 7},

```

```

PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), AxesLabel → {"z1/2 [-]", "u [-]"},
AxesStyle → Black, GridLines → Automatic, ImageSize → 400,
PlotLegends → {"uab", "ubc", "uca"}, PlotRange → {0, 1.21}];

(*vypocet 110 kV, preruseni pred rt*)
z1celk = z1v110 + z1vs;
z2celk = z1v110 + z2vs;
z0celk = z0v110 + zrt4;
(*vypocet s obecnymi hodnotami impedanci vlastní spotřeby, v rozvodne*)
bezprslozky1 = bezpreruseni[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr1fslozky1 = preruseni1f[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr2fslozky1 = preruseni2f[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
bezprfaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ bezprslozky1;
pr1ffaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr1fslozky1;
pr2ffaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr2fslozky1;
bezpr1 = bezprfaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f1 = pr1ffaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f1 = pr2ffaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za vedenim*)
bezprslozky2 = ubytek[bezprslozky1, {z1v110, z1v110, z0v110}];
pr1fslozky2 = ubytek[pr1fslozky1, {z1v110, z1v110, z0v110}];
pr2fslozky2 = ubytek[pr2fslozky1, {z1v110, z1v110, z0v110}];
bezprfaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ bezprslozky2;
pr1ffaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr1fslozky2;
pr2ffaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr2fslozky2;
bezpr2 = bezprfaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f2 = pr1ffaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f2 = pr2ffaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za rezervnim trafem 2 sekce v provozu*)
netoc0 = {{1, 1, 0}, {1, 1, 0}};
bezprslozky3 = ubytek[bezprslozky2, {zrt2, zrt2, zrt4}] * netoc0;
pr1fslozky3 = ubytek[pr1fslozky2, {zrt2, zrt2, zrt4}] * netoc0;
pr2fslozky3 = ubytek[pr2fslozky2, {zrt2, zrt2, zrt4}] * netoc0;
bezprfaze3 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (bezprslozky3)];
pr1ffaze3 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr1fslozky3)];
pr2ffaze3 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr2fslozky3)];
bezpr3 = bezprfaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f3 = pr1ffaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f3 = pr2ffaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za rezervnim trafem 4 sekce v provozu*)
netoc0 = {{1, 1, 0}, {1, 1, 0}};
bezprslozky4 = ubytek[bezprslozky2, {zrt4, zrt4, zrt4}] * netoc0;
pr1fslozky4 = ubytek[pr1fslozky2, {zrt4, zrt4, zrt4}] * netoc0;
pr2fslozky4 = ubytek[pr2fslozky2, {zrt4, zrt4, zrt4}] * netoc0;
bezprfaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (bezprslozky4)];
pr1ffaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr1fslozky4)];
pr2ffaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr2fslozky4)];
bezpr4 = bezprfaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};

```

```

pr1f4 = pr1ffaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f4 = pr2ffaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*výsledky do tabulky*)
bezprslozkyr =
  {bezprslozky1, bezprslozky2, bezprslozky3, bezprslozky4, bezprslozky4};
pr1fslozkyr = {pr1fslozky1, pr1fslozky2, pr1fslozky3, pr1fslozky4, pr1fslozky4};
pr2fslozkyr = {pr2fslozky1, pr2fslozky2, pr2fslozky3, pr2fslozky4, pr2fslozky4};
bezprfazer = {bezprfazel, bezprfaze2, bezprfaze3, bezprfaze4, bezprfaze4};
pr1ffazer = {pr1ffazel, pr1ffaze2, pr1ffaze3, pr1ffaze4, pr1ffaze4};
pr2ffazer = {pr2ffazel, pr2ffaze2, pr2ffaze3, pr2ffaze4, pr2ffaze4};
bezpr = {bezpr1, bezpr2, bezpr3, bezpr4, bezpr4};
pr1fr = {pr1f1, pr1f2, pr1f3, pr1f4, pr1f4};
pr2fr = {pr2f1, pr2f2, pr2f3, pr2f4, pr2f4};
(*vykreslení grafů*)
p129 =
  Plot[{Abs[pr1f1[[1]][[1]]] / Abs[bezpr1[[1]][[1]]] /. z1 → Abs[z1vs110max],
    Abs[pr1f1[[1]][[2]]] / Abs[bezpr1[[1]][[2]]] /. z1 → Abs[z1vs110max],
    Abs[pr1f1[[1]][[3]]] / Abs[bezpr1[[1]][[3]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]},
    {z12, 2, 7}, PlotRange → {{2, 7}, {-0.1, 2}}, GridLines → Automatic,
    AxesOrigin → {2, 0}, PlotLegends → {"ia", "ib", "ic"},
    AxesLabel → {"z1/2 [-]", "i% [-]"}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
    ImageSize → 400, AxesStyle → Black];
p130 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[
  bezpr2[[1]] /. {z1 → Abs[z1vs110max], z12 → 1}},
  Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr1f2[[1]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
    {z12, 7, 2, -1}]]}], ImageSize → 550];
p131 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr2[[2]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]},
  Show[{Table[zobrazvektory2[pr1f4[[2]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]], {z12, 2,
    7, 2.5}], Table[zobrazvektory2[pr1f2[[2]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
    {z12, 2, 7, 2.5}]]}], ImageSize → 550];
p132 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr4[[1]]] /.
  {z1 → Abs[z1vs110max], z12 → 1}},
  Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr1f4[[1]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
    {z12, 7, 2, -1}]]}], ImageSize → 550];
p132b = Plot[{Abs[pr1f4[[1]][[1]]] / Abs[bezpr4[[1]][[1]]] /.
  z1 → Abs[z1vs110max],
  Abs[pr1f4[[1]][[2]]] / Abs[bezpr4[[1]][[2]]] /. z1 → Abs[z1vs110max],
  Abs[pr1f4[[1]][[3]]] / Abs[bezpr4[[1]][[3]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]},
  {z12, 2, 7}, PlotRange → {{2, 7}, {-0.1, 3.01}}, GridLines → Automatic,
  AxesOrigin → {2, 0}, PlotLegends → {"ia", "ib", "ic"},
  AxesLabel → {"z1/2 [-]", "i% [-]"}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  ImageSize → 400, AxesStyle → Black];
p133 = Plot[{Abs[pr2f1[[1]][[1]]] / Abs[bezpr1[[1]][[1]]] /. z1 → Abs[z1vs110max],
  Abs[pr2f1[[1]][[2]]] / Abs[bezpr1[[1]][[2]]] /. z1 → Abs[z1vs110max],
  Abs[pr2f1[[1]][[3]]] / Abs[bezpr1[[1]][[3]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]},
  {z12, 2, 7}, PlotRange → {{2, 7}, {-0.1, 3.01}}, GridLines → Automatic,
  AxesOrigin → {2, 0}, PlotLegends → {"ia", "ib", "ic"},
  AxesLabel → {"z1/2 [-]", "i% [-]"}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  ImageSize → 400, AxesStyle → Black];
p134 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[
  bezpr2[[1]] /. {z1 → Abs[z1vs110max], z12 → 1}},
  Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr2f2[[1]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
    {z12, 7, 2, -1}]]}], ImageSize → 550];

```

```

p135 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr2[[2]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
  Show[Table[zobrazvektory2[pr2f2[[2]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
    {z12, 2, 7, 0.5}]]}}, ImageSize → 550];
p136 = GraphicsGrid[{{Plot[Evaluate[Abs[pr2f2[[2]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
  {z12, 2, 7}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  AxesLabel → {"z1/2", "u [-]"}, AxesStyle → Black,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {0, 1.21}, AspectRatio → 1],
  Plot[Evaluate[Abs[pr2f4[[2]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
  {z12, 2, 7}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  AxesLabel → {"z1/2", "u [-]"}, AxesStyle → Black,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {0, 1.21}, AspectRatio → 1],
  LineLegend[Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), {"ua", "ub", "uc"}]}]},
  ImageSize → 600, Alignment → Left, Spacings → 0];

p137 = GraphicsGrid[{{Plot[Evaluate[
  Abs[(pr2f2[[2]] - RotateLeft[pr2f2[[2]])] /. z1 → Abs[z1vs110max]] / √3],
  {z12, 2, 7}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  AxesLabel → {"z1/2", "u [-]"}, AxesStyle → Black, GridLines → Automatic,
  PlotRange → {0, 1.21}, AspectRatio → 1], Plot[Evaluate[
  Abs[(pr2f4[[2]] - RotateLeft[pr2f4[[2]])] /. z1 → Abs[z1vs110max]] / √3],
  {z12, 2, 7}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  AxesLabel → {"z1/2", "u [-]"}, AxesStyle → Black,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {0, 1.21}, AspectRatio → 1],
  LineLegend[Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), {"uab", "ubc", "uca"}]}]},
  ImageSize → 600, Alignment → Left, Spacings → 0];
p138 = Plot[{Abs[pr2f4[[1]][[1]]] / Abs[bezpr4[[1]][[1]]] /. z1 → Abs[z1vs110max],
  Abs[pr2f4[[1]][[2]]] / Abs[bezpr4[[1]][[2]]] /. z1 → Abs[z1vs110max],
  Abs[pr2f4[[1]][[3]]] / Abs[bezpr4[[1]][[3]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]},
  {z12, 2, 7}, PlotRange → {{2, 7}, {-0.1, 3.01}}, GridLines → Automatic,
  AxesOrigin → {2, 0}, PlotLegends → {"ia", "ib", "ic"},
  AxesLabel → {"z1/2 [-]", "i% [-]"}, PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3),
  ImageSize → 400, AxesStyle → Black];
p139 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[
  bezpr4[[1]] /. {z1 → Abs[z1vs110max], z12 → 1}],
  Show[Table[zobrazvektory2[zaokrouh[pr2f4[[1]]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
    {z12, 7, 2, -1}]]}}, ImageSize → 550];
p140 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezpr4[[2]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
  Show[Table[zobrazvektory2[pr2f4[[2]] /. z1 → Abs[z1vs110max]],
    {z12, 2, 7, 0.5}]]}}, ImageSize → 550];
p141 = Plot[Evaluate[Abs[pr2f4[[2]] /. z1 → Abs[z1vs110max]], {z12, 2, 7},
  PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), AxesLabel → {"z1/2 [-]", "u [-]"},
  AxesStyle → Black, GridLines → Automatic, ImageSize → 400,
  PlotLegends → {"ua", "ub", "uc"}, PlotRange → {0, 1.21}];
p142 = Plot[Evaluate[Abs[(pr2f4[[2]] - RotateLeft[pr2f4[[2]])] /.
  z1 → Abs[z1vs110max]] / √3], {z12, 2, 7},
  PlotStyle → Darker /@ Hue /@ (Range[3] / 3), AxesLabel → {"z1/2 [-]", "u [-]"},
  AxesStyle → Black, GridLines → Automatic, ImageSize → 400,

```



```

PlotLegends → {"uab", "ubc", "uca"}, PlotRange → {0, 1.21}];
pl151 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[
  bezprfaze4[[2]] /. {z1vs → 1000 I, z2vs → 1000 I}], zobrazvektory2[
  pr1ffaze4[[2]] /. {z1vs → 1000 I, z2vs → 1000 I}]}], ImageSize → 550];
pl152 = GraphicsGrid[{{zobrazvektory2[bezprfaze4[[2]] /.
  {z1vs → 1000 I, z2vs → 1000 I}], zobrazvektory2[
  pr2ffaze4[[2]] /. {z1vs → 1000 I, z2vs → 1000 I}]}], ImageSize → 550];

(*vypocet 400 kV, preruseni za bt*)
z1celk = z1v400 + zbt + z1vs;
z2celk = z1v400 + zbt + z2vs;
z0celk = z0v400 + zbt;

(*vypocet s obecnymi hodnotami impedanci vlastní spotřeby, v rozvodne*)
bezprslouzky1 = bezpreruseni[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr1fslouzky1a = preruseni1fbez0[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr2fslouzky1a = preruseni2fbez0[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr1fslouzky1 = {pr1fslouzky1a[[1]], bezprslouzky1[[2]]};
pr2fslouzky1 = {pr2fslouzky1a[[1]], bezprslouzky1[[2]]};
bezprfaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ bezprslouzky1;
pr1ffaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr1fslouzky1;
pr2ffaze1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr2fslouzky1;
bezpr1 = bezprfaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f1 = pr1ffaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f1 = pr2ffaze1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};

(*vypocet za vedenim*)
bezprslouzky2 = ubytek[bezprslouzky1, {z1v400, z1v400, z0v400}];
pr1fslouzky2 = ubytek[pr1fslouzky1, {z1v400, z1v400, z0v400}];
pr2fslouzky2 = ubytek[pr2fslouzky1, {z1v400, z1v400, z0v400}];
bezprfaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ bezprslouzky2;
pr1ffaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr1fslouzky2;
pr2ffaze2 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ pr2fslouzky2;
bezpr2 = bezprfaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f2 = pr1ffaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f2 = pr2ffaze2 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};

(*vypocet za blokovym trafem*)
bezprslouzky3 = ubytek[bezprslouzky2, {zbt, zbt, zbt}];
pr1fslouzky3 = ubytek[pr1fslouzky2, {zbt, zbt, zbt}];
pr2fslouzky3 = ubytek[pr2fslouzky2, {zbt, zbt, zbt}];
pr1fslouzky3a = ubytek[pr1fslouzky1a, {z1v400 + zbt, z1v400 + zbt, z0v400 + zbt}];
pr2fslouzky3a = ubytek[pr2fslouzky1a, {z1v400 + zbt, z1v400 + zbt, z0v400 + zbt}];
bezprfaze3 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (bezprslouzky3);
pr1ffaze3 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr1fslouzky3);
pr2ffaze3 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr2fslouzky3);
bezpr3 = bezprfaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f3 = pr1ffaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f3 = pr2ffaze3 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};

(*vypocet za odbockovym trafem, dve sekce v provozu*)
bezprslouzky4 = ubytek[bezprslouzky3, {zot2, zot2, 0}];
pr1fslouzky4 = ubytek[pr1fslouzky3a, {zot2, zot2, 0}];

```

```

pr2fslozky4 = ubytek[pr2fslozky3a, {zot2, zot2, 0}];
bezprfaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@bezprslolzky4];
pr1ffaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr1fslozky4];
pr2ffaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr2fslozky4];
bezpr4 = bezprfaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f4 = pr1ffaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f4 = pr2ffaze4 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za odbockovym trafem, ctyri sekce v provozu*)
bezprslolzky5 = ubytek[bezprslolzky3, {zot4, zot4, 0}];
pr1fslozky5 = ubytek[pr1fslozky3a, {zot4, zot4, 0}];
pr2fslozky5 = ubytek[pr2fslozky3a, {zot4, zot4, 0}];
bezprfaze5 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@bezprslolzky5];
pr1ffaze5 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr1fslozky5];
pr2ffaze5 = vynulujuzel[{#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr2fslozky5];
bezpr5 = bezprfaze5 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f5 = pr1ffaze5 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f5 = pr2ffaze5 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
bezprslolzky0 =
  {bezprslolzky1, bezprslolzky2, bezprslolzky3, bezprslolzky4, bezprslolzky5};
pr1fslozky0 = {pr1fslozky1, pr1fslozky2, pr1fslozky3, pr1fslozky4, pr1fslozky5};
pr2fslozky0 = {pr2fslozky1, pr2fslozky2, pr2fslozky3, pr2fslozky4, pr2fslozky5};
bezprfaze0 = {bezprfazel1, bezprfaze2, bezprfaze3, bezprfaze4, bezprfaze5};
pr1ffaze0 = {pr1ffazel1, pr1ffaze2, pr1ffaze3, pr1ffaze4, pr1ffaze5};
pr2ffaze0 = {pr2ffazel1, pr2ffaze2, pr2ffaze3, pr2ffaze4, pr2ffaze5};
bezpr0 = {bezpr1, bezpr2, bezpr3, bezpr4, bezpr5};
pr1f0 = {pr1f1, pr1f2, pr1f3, pr1f4, pr1f5};
pr2f0 = {pr2f1, pr2f2, pr2f3, pr2f4, pr2f5};

(*vypocet 110 kV, preruseni za rt*)
z1celk = z1v110 + z1vs;
z2celk = z1v110 + z2vs;
z0celk = z0v110 + zrt4;
(*vypocet s obecnymi hodnotami impedanci vlastní spotřeby, v rozvodne*)
bezprslolzky1 = bezpreruseni[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr1fslozky1a = preruseni1fbez0[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr2fslozky1a = preruseni2fbez0[{1, z1celk, z2celk, z0celk}];
pr1fslozky1 = {pr1fslozky1a[[1]], bezprslolzky1[[2]]};
pr2fslozky1 = {pr2fslozky1a[[1]], bezprslolzky1[[2]]};
bezprfazel1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@bezprslolzky1;
pr1ffazel1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr1fslozky1;
pr2ffazel1 = {#1, {1, a2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr2fslozky1;
bezpr1 = bezprfazel1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr1f1 = pr1ffazel1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
pr2f1 = pr2ffazel1 /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
(*vypocet za vedenim*)
bezprslolzky2 = ubytek[bezprslolzky1, {z1v110, z1v110, z0v110}];
pr1fslozky2 = ubytek[pr1fslozky1, {z1v110, z1v110, z0v110}];
pr2fslozky2 = ubytek[pr2fslozky1, {z1v110, z1v110, z0v110}];
pr1fslozky2a = ubytek[pr1fslozky1a, {z1v110, z1v110, z0v110}];

```

```

pr2fslozky2a = ubytek[pr2fslozky1a, {z1v110, z1v110, z0v110}];
bezprfaze2 = {#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@bezprslolzky2;
pr1ffaze2 = {#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr1fslozky2;
pr2ffaze2 = {#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr2fslozky2;
bezpr2 = bezprfaze2 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
pr1f2 = pr1ffaze2 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
pr2f2 = pr2ffaze2 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
(*vypocet za rezervnim trafem, dve sekce v provozu*)
bezprslolzky3 = ubytek[bezprslolzky2, {zrt2, zrt2, 0}];
pr1fslozky3 = ubytek[pr1fslozky2a, {zrt2, zrt2, 0}];
pr2fslozky3 = ubytek[pr2fslozky2a, {zrt2, zrt2, 0}];
bezprfaze3 = vynulujuzel[{#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (bezprslolzky3)];
pr1ffaze3 = vynulujuzel[{#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr1fslozky3)];
pr2ffaze3 = vynulujuzel[{#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@ (pr2fslozky3)];
bezpr3 = bezprfaze3 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
pr1f3 = pr1ffaze3 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
pr2f3 = pr2ffaze3 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
(*vypocet za odbockovym trafem, ctyri sekce v provozu*)
bezprslolzky4 = ubytek[bezprslolzky2, {zrt4, zrt4, 0}];
pr1fslozky4 = ubytek[pr1fslozky2a, {zrt4, zrt4, 0}];
pr2fslozky4 = ubytek[pr2fslozky2a, {zrt4, zrt4, 0}];
bezprfaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@bezprslolzky4];
pr1ffaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr1fslozky4];
pr2ffaze4 = vynulujuzel[{#1, {1, a^2, a} - #2} &@@ zeslozek /@pr2fslozky4];
bezpr4 = bezprfaze4 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
pr1f4 = pr1ffaze4 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
pr2f4 = pr2ffaze4 /. {z1vs -> (z1 * E^{I*0.6}), z2vs -> (I * z1 / z12)};
bezprslolzkyr0 =
  {bezprslolzky1, bezprslolzky2, bezprslolzky3, bezprslolzky4, bezprslolzky4};
pr1fslozkyr0 = {pr1fslozky1, pr1fslozky2, pr1fslozky3, pr1fslozky4, pr1fslozky4};
pr2fslozkyr0 = {pr2fslozky1, pr2fslozky2, pr2fslozky3, pr2fslozky4, pr2fslozky4};
bezprfazer0 = {bezprfazel, bezprfaze2, bezprfaze3, bezprfaze4, bezprfaze4};
pr1ffazer0 = {pr1ffazel, pr1ffaze2, pr1ffaze3, pr1ffaze4, pr1ffaze4};
pr2ffazer0 = {pr2ffazel, pr2ffaze2, pr2ffaze3, pr2ffaze4, pr2ffaze4};
bezpr0 = {bezpr1, bezpr2, bezpr3, bezpr4, bezpr4};
pr1fr0 = {pr1f1, pr1f2, pr1f3, pr1f4, pr1f4};
pr2fr0 = {pr2f1, pr2f2, pr2f3, pr2f4, pr2f4};
(*vykresleni grafu*)
pl50 = GraphicsGrid[
  {{zobrazvektory2[bezprfaze4[[2]] /. {z1vs -> 1000 I, z2vs -> 1000 I}],
  zobrazvektory2[pr1ffaze4[[2]] /.
  {z1vs -> 1000 I, z2vs -> 1000 I}]}], ImageSize -> 550];
In[389]:= bezprfazecelk = {bezprfaze, bezprfaze0, bezprfazer, bezprfazer0};
pr1ffazecelk = {pr1ffaze, pr1ffaze0, pr1ffazer, pr1ffazer0};
pr2ffazecelk = {pr2ffaze, pr2ffaze0, pr2ffazer, pr2ffazer0};
celk = {bezprfazecelk, pr1ffazecelk, pr2ffazecelk};

```

```

In[393]= celk2 = Table[ $\left\{ \text{celk}[[i, j, k, 1, m]], \text{celk}[[i, j, k, 2, m]], \frac{1}{\sqrt{3}} \right.$ 
      (celk[[i, j, k, 2, m]] - RotateLeft[celk, {0, 0, 0, 0, 1}][[i, j, k, 2, m]]) $\left. \right\},$ 
      {i, 3}, {j, 4}, {k, 5}, {m, 3}];

In[394]= celk3 = Table[celk2[[i, j, k, m, 1]], {i, 3}, {j, 4}, {k, 5}, {l, 3}, {m, 3}];
      celk4 = Table[If[l == 1, celk3[[i, j, k, l, m]] / celk3[[1, j, k, l, m]],
      celk3[[i, j, k, l, m]]], {i, 3}, {j, 4}, {k, 5}, {l, 3}, {m, 3}];

In[396]= (*Syntax: celk4[[typ(bez,1f,2f),mistoporuchy(predot,zaot,predrt,zart),
      hodnotyza mistem(rozv,ved,bt/rt2,ot2/rt4,ot4/rt4),
      velicina(i/ufaz/usdruz),faze(a,b,c)]] *)

In[397]= (*hromadné vykreslení grafů pro analýzu chování poruchy*)
      Manipulate[Module[{pom},
      TableForm[Table[pom = Abs[celk4[[i, k, j, velicina, All]]] /.
      {z1vs  $\rightarrow$  (z1 * EI*0.6), z2vs  $\rightarrow$  (I * z1 / z12)}];
      Plot[pom, {z12, 1, 10}, PlotRange  $\rightarrow$  {{2, 7}, {-0.1, 2.8}}, GridLines  $\rightarrow$  {{1, 1}},
      AxesOrigin  $\rightarrow$  {2, 0}, PlotLegends  $\rightarrow$  {"a", "b", "c"},
      AxesLabel  $\rightarrow$  {"z12", ""}, ImageSize  $\rightarrow$  210], {j, 2, 5, 3}, {i, 3}],
      TableHeadings  $\rightarrow$  {"pred trf", "na vs"},
      {"bez poruchy", " preruseni 1 faze", "preruseni 2 fazi"}]],
      Row[ $\left\{ \text{Control}[\{k, 1, \text{"misto poruchy"}\}, \{1 \rightarrow \text{"pred bt"}, \right.$ 
      2  $\rightarrow$  "za bt", 3  $\rightarrow$  "pred rt", 4  $\rightarrow$  "za rt"}], Control[
      {velicina, 1}, {1  $\rightarrow$  "zmena proudu", 2  $\rightarrow$  "napeti faz", 3  $\rightarrow$  "napeti sdruz"}],
      Control[ $\left\{ z1, \text{Abs}[z1vs4[[k]][[2]]], \text{Abs}[z1vs4[[k]][[1]]], \right.$ 
       $\left. \frac{1}{19} (\text{Abs}[z1vs4[[k]][[1]]] - \text{Abs}[z1vs4[[k]][[2]]) \right\}$ ], Spacer[20]]]

In[398]= (*funkce na vytváření 3d grafů s proměným z1 a z2/z1*)
      Plot3Dz1z12[x_, {y1_, y2_}] := Plot3D[x, {z1, Abs[y2], Abs[y1]},
      {z12, 2, 7}, PlotLegends  $\rightarrow$  Automatic, PlotRange  $\rightarrow$  All,
      ColorFunction  $\rightarrow$  "Rainbow", AxesLabel  $\rightarrow$  {"z1", "z1/z2", "i"}, ImageSize  $\rightarrow$  500]

```

```

(*400 kV, porucha před BT, 3D graf a fázory*)
Manipulate[
  {FindMinimum[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]],
    Abs[z1vs400max] ≤ z1 ≤ Abs[z1vs400min], 2 ≤ z12 ≤ 7}, {z1, z12}},
  FindMaximum[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]],
    Abs[z1vs400max] ≤ z1 ≤ Abs[z1vs400min], 2 ≤ z12 ≤ 7}, {z1, z12}},
  Plot3Dz1z12[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]], z1vs400}},
  Row[{Control[{{f, bezpr, "porucha"}, {bezpr → "bez", pr1f → "1f", pr2f → "2f"}]},
    Control[{{misto, 1, "za zařízením"},
      {1 → "rozv", 2 → "ved", 3 → "bt", 5 → "ot 4sekce", 4 → "ot 2 sekce"}]},
    Control[{{faze, 1}, {1 → "a", 2 → "b", 3 → "c"}]},
    Control[{{velicina, 1}, {1 → "proud", 2 → "napeti"}]}], Spacer[10]]
Manipulate[Module[{bezpr, pr1f, pr2f},
  bezpr = bezprfaze[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  pr1f = pr1ffaze[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  pr2f = pr2ffaze[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  GraphicsGrid[{{zobrazvektory[(bezpr)[[1]]], zobrazvektory[(pr1f)[[1]]],
    zobrazvektory[(pr2f)[[1]]]},
    {zobrazvektory[(bezpr)[[2]]], zobrazvektory[(pr1f)[[2]]],
    zobrazvektory[(pr2f)[[2]]]}, ImageSize → 750}],
  Row[{Control[{{z1, Abs[z1vs400max], Abs[z1vs400min],
    
$$\frac{\text{Abs}[z1vs400min] - \text{Abs}[z1vs400max]}{9}}$$
}}, Control[{{z12, 2, 7, 1}},
    Control[{{misto, 1, "za zařízením"}, {1 → "rozv", 2 → "ved",
    3 → "bt", 4 → "ot 2sekce", 5 → "ot 4 sekce"}]}], Spacer[10]]]

```

```

(*400 kV, porucha za BT, 3D graf a fázory*)
Manipulate[
  {FindMinimum[{Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]],
    Abs[z1vs400max] ≤ z1 ≤ Abs[z1vs400min], 2 ≤ z12 ≤ 7}, {z1, z12}],
  FindMaximum[{Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]],
    Abs[z1vs400max] ≤ z1 ≤ Abs[z1vs400min], 2 ≤ z12 ≤ 7}, {z1, z12}],
  Plot3Dz1z12[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]], z1vs400}], Row[
  {Control[{{f, bezpr0, "porucha"}, {bezpr0 → "bez", pr1f0 → "1f", pr2f0 → "2f"}]},
  Control[{{misto, 1, "za zařízením"},
    {1 → "rozv", 2 → "ved", 3 → "bt", 5 → "ot 4sekce", 4 → "ot 2 sekce"}]},
  Control[{{faze, 1}, {1 → "a", 2 → "b", 3 → "c"}]},
  Control[{{velicina, 1}, {1 → "proud", 2 → "napeti"}]}], Spacer[10]]]
Manipulate[Module[{bezpr, pr1f, pr2f},
  bezpr = bezprfaze0[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  pr1f = pr1ffaze0[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  pr2f = pr2ffaze0[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  GraphicsGrid[{{zobrazvektory[(bezpr)[[1]]], zobrazvektory[(pr1f)[[1]]],
    zobrazvektory[(pr2f)[[1]]]},
  {zobrazvektory[(bezpr)[[2]]], zobrazvektory[(pr1f)[[2]]],
    zobrazvektory[(pr2f)[[2]]]}, ImageSize → 750}],
  Row[{{Control[{{z1, Abs[z1vs400max], Abs[z1vs400min],
    
$$\frac{\text{Abs}[z1vs400min] - \text{Abs}[z1vs400max]}{9}}$$
}}, Control[{{z12, 2, 7, 1}}],
  Control[{{misto, 1, "za zařízením"}, {1 → "rozv", 2 → "ved",
    3 → "bt", 4 → "ot 2sekce", 5 → "ot 4 sekce"}]}], Spacer[10]]]

```

(\*110 kV, porucha před RT, 3D graf a fázory\*)

```

Manipulate[
  {FindMinimum[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]],
    Abs[z1vs110max] ≤ z1 ≤ Abs[z1vs110min], 1 ≤ z12 ≤ 10}, {z1, z12}},
  FindMaximum[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]],
    Abs[z1vs110max] ≤ z1 ≤ Abs[z1vs110min], 1 ≤ z12 ≤ 10}, {z1, z12}},
  Plot3Dz1z12[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]], z1vs110}, Row[
  {Control[{{f, bezpr, "porucha"}, {bezpr → "bez", pr1fr → "1f", pr2fr → "2f"}]},
  Control[{{misto, 1, "za zařízením"},
    {1 → "rozv", 2 → "ved", 4 → "rt 4 sekce", 3 → "rt 2sekce"}]},
  Control[{{faze, 1}, {1 → "a", 2 → "b", 3 → "c"}]},
  Control[{{velicina, 1}, {1 → "proud", 2 → "napeti"}}}], Spacer[10]]]
Manipulate[Module[{bezpr, pr1f, pr2f},
  bezpr = bezprfazer[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  pr1f = pr1ffazer[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  pr2f = pr2ffazer[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  GraphicsGrid[{{zobrazvektory[bezpr][[1]], zobrazvektory[pr1f][[1]],
    zobrazvektory[pr2f][[1]]},
  {zobrazvektory[bezpr][[2]], zobrazvektory[pr1f][[2]],
    zobrazvektory[pr2f][[2]]}}, ImageSize → 750], Row[Control[
  {z1, Abs[z1vs110max], Abs[z1vs110min],  $\frac{\text{Abs}[z1vs110min] - \text{Abs}[z1vs110max]}{9}$ }]},
  Control[{z12, 1, 10, 1}], Control[{{misto, 1, "za zařízením"},
    {1 → "rozv", 2 → "ved", 4 → "rt 4 sekce", 3 → "rt 2sekce"}]}, Spacer[10]]]

```

```

(*110 kV, porucha za RT, 3D graf a fázory*)
Manipulate[
  {FindMinimum[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]],
    Abs[z1vs110max] ≤ z1 ≤ Abs[z1vs110min], 1 ≤ z12 ≤ 10}, {z1, z12}},
  FindMaximum[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]],
    Abs[z1vs110max] ≤ z1 ≤ Abs[z1vs110min], 1 ≤ z12 ≤ 10}, {z1, z12}},
  Plot3Dz1z12[Abs[f[[misto]][[velicina]][[faze]]], z1vs110}},
  Row[{Control[{{f, bezpr0, "porucha"}, {bezpr0 → "bez", pr1fr0 → "1f",
    pr2fr0 → "2f"}]}, Control[{{misto, 1, "za zařizním"},
    {1 → "rozv", 2 → "ved", 3 → "bt", 5 → "ot 4sekce", 4 → "ot 2 sekce"}]},
    Control[{{faze, 1}, {1 → "a", 2 → "b", 3 → "c"}]},
    Control[{{velicina, 1}, {1 → "proud", 2 → "napeti"}]}], Spacer[10]]
Manipulate[Module[{bezpr, pr1f, pr2f},
  bezpr = bezprfazer0[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  pr1f = pr1ffazer0[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  pr2f = pr2ffazer0[[misto]] /. {z1vs → (z1 * EI*0.6), z2vs → (I * z1 / z12)};
  GraphicsGrid[{{zobrazvektory[(bezpr)[[1]]], zobrazvektory[(pr1f)[[1]]],
    zobrazvektory[(pr2f)[[1]]]},
    {zobrazvektory[(bezpr)[[2]]], zobrazvektory[(pr1f)[[2]]],
    zobrazvektory[(pr2f)[[2]]]}, ImageSize → 750}],
  Row[{Control[{z1, Abs[z1vs110max], Abs[z1vs110min],
    
$$\frac{\text{Abs}[z1vs110min] - \text{Abs}[z1vs110max]}{9}}$$
}], Control[{z12, 2, 7, 1}],
    Control[{{misto, 1, "za zařizním"}, {1 → "rozv", 2 → "ved",
    3 → "bt", 4 → "ot 2sekce", 5 → "ot 4 sekce"}]}], Spacer[10]]]

```