

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Nesymetrie v sítích vn, vliv uspořádání vodičů  
a kabelových vedení**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická**

**Akademický rok: 2012/2013**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavla ZAHÁLKOVÁ**  
Osobní číslo: **E11N0047P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Nesymetrie v sítích vn, vliv uspořádání vodičů a kabelových vedení**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### **Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**

Diplomová práce "Nesymetrie v sítích vn, vliv uspořádání vodičů a kabelových vedení" bude zaměřena na tyto body:


1. Vysvětlíte a uveďte výpočet nesymetrických poruchových stavů na vedeních vysokého napětí.
2. Vyhodnoťte vlivy praktických poruch na aktivní přenosové parametry a zhodnoťte vliv uspořádání a vliv provozního stavu vedení.
3. Analýzu proveďte a doložte na několika konkrétních reprezentativních případech.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


1. skripta a přednášky z předmětu TPR, PJS.
2. Další podklady dodá a určí v průběhu sám konzultant.
3. Hodinka, Fecko Nemeček - Přenos a rozvod elektrické energie.
4. Mertlová, Kocmich, Hejtmánková - Přenos a rozvod elektrické energie.
5. Internetové podklady a ČN.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce se zabývá nesymetriemi v sítích vysokého napětí. Popisuje způsoby provozu nulového uzlu transformátoru na hladině vn. Charakterizuje napěťové poměry v těchto sítích v bezporuchovém stavu a v případě jednofázové zemní poruchy. Uvádí způsoby výpočtu jednofázové zemní poruchy v soustavách vn. Jsou zde odvozeny vztahy pro výpočet zemních kapacit venkovního a kabelového vedení a popisuje vliv uspořádání vodičů na velikost kapacitní nesymetrie. V závěru jsou uvedeny výpočty zemního spojení v jednotlivých typech sítí a zhodnocen vliv uspořádání vodičů.

## **Klíčová slova**

Zemní spojení, kapacitní proud, izolovaná soustava, kompenzovaná soustava, poruchový proud, nesymetrie, metoda souměrných složek, výpočet kapacity.

## **Abstract**

The topic of master theses:

Asymmetrical states in HV networks, influence of conductors arrangements and cable line arrangements.

This master thesis deals with the asymmetrical states in high voltage power networks. It defines the different types of transformer's neutral earthing in high voltage power network. It also describes voltage states under normal operating conditions and during ground fault conditions. It illustrates ways how to calculate single line ground fault in high voltage networks. The other part derives equations for calculating phase to earth capacitance of overhead lines and cables and describes the effect of conductor's layout on this capacitance. In the conclusion there is a calculation of ground fault conditions in different types of networks and evaluation of the effect of conductor's layout.

## **Key words**

Earth-fault, capacitive current, insulated network, compensated network, fault current, asymmetrical states, method of symmetrical components, capacity calculation.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 29.4.2013

Pavla Zahálková

.....

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA ČR.....</b>	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY Z HLEDISKA NAPĚŤOVÝCH HLADIN .....	11
1.2 ELEKTRICKÉ VEDENÍ VN .....	12
1.2.1 Pasivní parametry vedení.....	12
1.2.2 Venkovní vedení.....	12
1.2.3 Kabelové vedení .....	14
1.3 PORUCHY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	16
1.3.1 Zemní poruchy.....	17
1.3.2 Přepětí.....	18
1.3.3 Nesymetrie napětí.....	18
1.3.4 Metoda souměrných složek (metoda Fourtescue) .....	18
<b>2 ZPŮSOBY PROVOZU UZLU TRANSFORMÁTORU NA HLADINĚ VN .....</b>	<b>22</b>
2.1 IZOLOVANÁ SÍŤ .....	22
2.2 SÍŤ UZEMNĚNÁ PŘES ZHÁŠECÍ TLUMIVKU .....	25
2.3 SÍŤ UZEMNĚNÁ PŘES REZISTOR.....	28
2.4 VÝPOČET DOKONALÉHO TRVALÉHO ZEMNÍHO SPOJENÍ POMOCÍ FÁZOVÝCH HODNOT.....	30
2.5 VÝPOČET ODPOROVÉHO ZEMNÍHO SPOJENÍ POMOCÍ FÁZOVÝCH HODNOT .....	32
2.6 OBECNÝ VÝPOČET ZEMNÍHO SPOJENÍ METODOU SOUMĚRNÝCH SLOŽEK .....	33
<b>3 PŘÍČINY VZNIKU NESYMETRIE FÁZOVÝCH NAPĚTÍ.....</b>	<b>37</b>
3.1 VÝPOČET ZEMNÍCH KAPACIT VENKOVNÍHO VEDENÍ .....	37
3.1.1 Výpočet zemních kapacit pro rovinné uspořádání .....	39
3.1.2 Výpočet zemních kapacit pro uspořádání do trojúhelníku – „pařát“ .....	41
3.1.3 Vliv uspořádání vodičů venkovního vedení na kapacitní nesymetrii.....	42
3.2 VÝPOČET KAPACITNÍ NESYMETRIE KABELOVÉHO VEDENÍ.....	44
<b>4 VLIV NESYMETRIE NA AKTIVNÍ PŘENOSOVÉ PARAMETRY.....</b>	<b>46</b>
4.1 IZOLOVANÁ SOUSTAVA .....	46
4.1.1 Namodelovaný příklad pro izolovanou soustavu .....	47
4.2 SOUSTAVA UZEMNĚNÁ PŘES ZHÁŠECÍ TLUMIVKU .....	52
4.2.1 Namodelovaný příklad pro soustavu uzemněnou přes tlumivku .....	52
4.3 SOUSTAVA UZEMNĚNÁ PŘES REZISTOR .....	60
4.3.1 Namodelovaný příklad pro soustavu uzemněnou přes rezistor .....	61
4.4 POROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ PROVOZU NULOVÉHO UZLU .....	65
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>68</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>70</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

## Seznam symbolů a zkratek

$vn$	vysoké napětí
$U_f$	fázové napětí (V)
$U_S$	sdužené napětí (V)
$a, b, c$	fázové vodiče (-)
$U_A, U_B, U_C$	fázová napětí (V)
$\nu_{AB}, \nu_{AC}, \nu_{BC}$	úhel napětí ( $^\circ$ )
$R_K$	rezistance na 1 km vedení ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )
$X_K$	induktivní reaktance na 1km vedení ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )
$B_K$	kapacitní susceptance na 1 km vedení ( $\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$ )
$G_K$	svod ( $\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$ )
$F$	Fourtescueeho matice
$U_{(1)}, U_{(2)}, U_{(0)}$	napětí sousledné, zpětné a nulové složky (V)
$I_{(1)}, I_{(2)}, I_{(0)}$	proud sousledné, zpětné a nulové složky (A)
$Z_{(1)}, Z_{(2)}, Z_{(0)}$	impedance sousledné, zpětné a nulové složky ( $\Omega$ )
$E$	vnitřní napětí zdroje (V)
$I_A, I_B, I_C$	fázové proudy (A)
$U_0$	napětí uzlu transformátoru (V)
$R_P$	přechodová rezistance v místě poruchy ( $\Omega$ )
$I_p$	poruchový proud (A)
$I_{kap}$	kapacitní proud (A)
$c_{a0}, c_{b0}, c_{c0}$	kapacita fáze $L_1, L_2, L_3$ proti zemi (F)
$c_0$	kapacita sítě proti zemi (F)
$L$	indukčnost (H)
$Z$	impedance ( $\Omega$ )
$Y$	admitance (s)
$l$	délka vedení (km)
$\omega$	úhlová rychlost (rad/s)
$f$	frekvence (Hz)
$R_{c0}$	svodová rezistance ( $\Omega$ )
$Z_N$	impedance v uzlu transformátoru ( $\Omega$ )
$k$	kapacitní součinitel (F/km)
$\delta$	potenciálové součinitele (km/F)



---

$Q$	.....	lineární hustota náboje (C/m)
$U$	.....	potenciál vodiče (V)
$S$	.....	průřez vodiče (mm <sup>2</sup> )
$r$	.....	poloměr vodiče (mm)
$d_{mk}$	.....	vzdálenost vodičů (m)
$h$	.....	výška vodiče nad zemí (m)
$\varepsilon$	.....	permitivita materiálu (F/m)
$\Delta c_0$	.....	kapacitní nesymetrie (F)
$I_L$	.....	proud tekoucí tlumivkou (A)
$R_L$	.....	rezistance tlumivky ( $\Omega$ )
$I_W$	.....	činný svodový (wattový) proud (A)
$U_{rez}$	.....	rezonanční napětí (V)
$U_{NZT}$	.....	jmenovité napětí tlumivky (V)
$\alpha$	.....	činitel útlumu sítě (-)
$\varepsilon$	.....	činitel nesymetrie sítě (-)
$I_{RN}$	.....	jmenovitý proud odporníku (A)
$R_N$	.....	rezistance uzlového odporníku ( $\Omega$ )

## Úvod

Cílem mé diplomové práce je analýza vlivu poruch na aktivní přenosové parametry vedení (napětí, proud) a vyhodnocení vlivu uspořádání vodičů venkovního vedení a kabelového vedení na tyto parametry. Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí.

Na začátku této práce budu stručně charakterizovat elektrizační soustavu České republiky. Uvedu zde napěťové hladiny používané v ČR a způsoby provozu uzlu sítě transformátoru na jednotlivých hladinách. Dále se budu zabývat elektrickým vedením, jeho pasivními parametry a konstrukčním řešením vedení. Stručně rozeberu některé poruchy vznikající v elektrizační soustavě. Na závěr první části popíši metodu souměrných složek, která se využívá k řešení nesymetrických poruchových stavů, a kterou budu v této práci dále využívat k výpočtům.

V druhém bodu práce se dle zadání diplomové práce zaměřím na sítě vysokého napětí. Popíši jednotlivé způsoby uzemnění nulového bodu na hladině vysokého napětí. Uvedu výpočty pro soustavy v bezporuchovém stavu a ukáži vliv nesymetrie zemních kapacit v jednotlivých fázích na velikost napětí nulového bodu. Popíši změny napěťových a proudových poměrů při vzniku zemní jednofázové poruchy a graficky je znázorním pomocí fázorových diagramů. Poté uvedu způsoby výpočtu zemního spojení pomocí fázových hodnot a pomocí metody souměrných složek.

V další části práce odvodím výpočet zemních kapacit vedení. Pro venkovní vedení uvedu příklad výpočtu pro různé typy uspořádání vodičů. Zhodnotím vliv uspořádání na velikost kapacitní nesymetrie. Pomocí programu vytvořeného v MS Excel pro výpočet zemních kapacit vedení se pokusím najít nejvhodnější uspořádání vodičů s nejnižší kapacitní nesymetrií. V případě kabelových vedení uvedu na příkladu vliv délky fázových vodičů na kapacitu.

V poslední části práce uvedu výpočty zemních poruch s vlivem nesymetrie zemních kapacit vodičů. Pro jednotlivé typy sítí uvedu příklad praktického výpočtu a v programu MS Excel namodeluji grafy závislosti napětí na velikosti kapacitní nesymetrie, vliv napětí na velikosti svodových odporů a několik dalších závislostí pro venkovní vodiče a kabely. Na závěr práce vyhodnotím výsledky dosažené pomocí namodelovaných situací.

# 1 Elektrizční soustava ČR

Elektrizční soustava je střídavá, třífázová soustava. Zahrnuje výrobu elektrické energie, její přenos, rozvod a spotřebu. Jejím úkolem je zajištění dodávky elektrické energie v požadovaném čase, množství a v daném místě při dodržení kvality a spolehlivosti dodávky a také s co nejmenšími ztrátami. Mezi hlavní části elektrizační soustavy patří elektrická vedení a elektrické stanice. Pokud se tato vedení a tyto stanice nacházejí na stejné napěťové hladině, nazýváme je elektrickou sítí [1].

## 1.1 Rozdělení elektrizační soustavy z hlediska napěťových hladin

Elektrické sítě lze podle jejich funkce a napěťových hladin dělit na přenosovou síť a distribuční síť. V České republice jsou tyto sítě provozovány na normalizovaných napěťových hladinách, jak můžeme vidět v tabulce 1.1 – 1. Úrovně napětí elektrických sítí ČR udává norma ČSN IEC 38 33 01 2 [1].

Tab 1.1 – 1 Napěťové hladiny provozované v ČR [3]

Distribuční soustava	Nízké napětí (nn)	0,4 kV	Provoz s přímo uzemněným uzlem
		0,5 kV	Provoz s izolovaným uzlem
	Vysoké napětí (vn)	6 kV	Provoz s izolovaným nebo nepřímo uzemněným uzlem (přes tlumivku, rezistor)
		10 kV	
		22 kV	
Velmi vysoké napětí (vvv)	35 kV	Provoz s přímo uzemněným uzlem	
	110 kV		
	220 kV		
Přenosová soustava	Zvláště vysoké napětí (zvn)	400 kV	

Hodnoty uvedené v tabulce jsou napětí sdružená. Každá úroveň má kromě jmenovité hodnoty definovanou i provozovací hodnotu, což je nejvyšší napětí, při kterém lze ještě síť trvale provozovat [1].

Přenosová soustava je nadřazenou soustavou a slouží k propojení uzlů výroby s uzly rozvodu. Tato soustava je provozována na hladině zvláště vysokého napětí a velmi vysokého napětí. Tvoří ji vedení 400 kV, 220 kV a 110 kV. Vedení 220 kV je v současné době pouze udržovanou soustavou a slouží jako záložní a doplňkové vedení. V budoucnu se uvažuje jeho přeměna na vedení 400 kV. Přenosová soustava je realizována venkovním vedením, nejčastěji ALFe lany. Vedení je provozováno jako okružní. Do přenosové soustavy jsou připojeny velké elektrárny a je dále propojena se zahraničními soustavami.

Distribuční (rozvodná) soustava slouží k přívodu elektrické energie ke spotřebitelům.

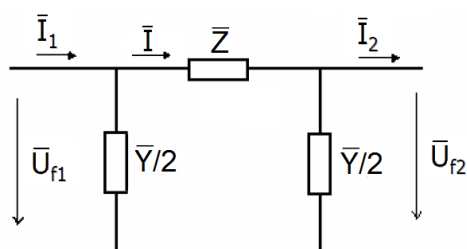
Základním zdrojem elektrické energie je nadřazená soustava. Do distribuční soustavy jsou připojeny pouze malé zdroje (průmyslové elektrárny, energie vody, větru, biomasy, atd.). Do rozvodné soustavy patří sítě 110 kV, vn a nn. Sítě vn a nn jsou z velké části tvořené kabelovým vedením. Vedení 110 kV jsou stavěna jako venkovní s výjimkou velkých měst, kde se používají i kabelová vedení 110 kV. Soustava je konstruována paprskově nebo formou průběžného rozvodu. Sítě vn mohou být propojeny na dvoupaprskové nebo okružní vedení z důvodu zálohování. Husté sítě nn jsou stavěny jako mřížové.

## 1.2 Elektrické vedení vn

Elektrické vedení se skládá z vedení venkovního a kabelového. Venkovní vedení slouží k přenosu elektrické energie na delší vzdálenosti a v nezastavěných oblastech. Kabelové vedení je využíváno především v městských a průmyslových oblastech.

### 1.2.1 Pasivní parametry vedení

Vedení vysokého napětí označujeme jako vedení se soustředěnými parametry, které lze nahradit dvojbranem s podélnou impedancí a příčnou admitancí. Na obrázku 1.2.1 – 1 je znázorněn dvojbran ve tvaru  $\Pi$  článku. Pasivní parametry  $\Pi$  článku tvoří podélná impedance, která se skládá z rezistance  $R$  a induktivní reaktance  $X$ , a příčná admitance, která se skládá z kapacitní susceptance  $B$  a konduktance  $G$ . Pasivní parametry se určují na 1 km délky vedení a ve výpočtu jsou považovány za konstanty.



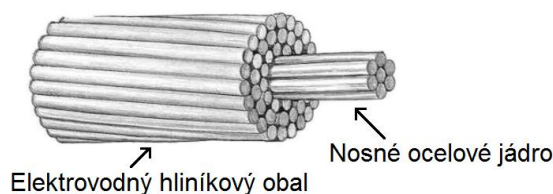
Obr 1.2.1 – 1 Náhradní  $\Pi$  článek [5]

### 1.2.2 Venkovní vedení

Venkovní vedení na hladině vn je nejčastěji provozováno s napětím 22 kV (35 kV ve východních Čechách). Vedení je konstruováno s izolovaným nulovým bodem transformátoru nebo jako kompenzované. Skládá se z vodičů, izolátorů a stožárů. Tento typ vedení je poruchovější než vedení kabelové. Převládají zde poruchy jednofázové, převážně přechodného charakteru, které lze snadněji vyhledat a většina z nich zmizí po použití automatiky opětovného zapnutí.

Jako vodiče venkovního vedení se používají AlFe lana. AlFe lano (obr 1.2.2 – 1) se

skládá z ocelové duše, která má nosnou funkci, a na duši je navinut hliníkový plášť, který vede většinu proudu. Podle poměru ocelové a hliníkové části se lana značí například AlFe8 – 8 dílů hliníku, 1 díl železa.



Obr 1.2.2 – 1 AlFe lano [16]

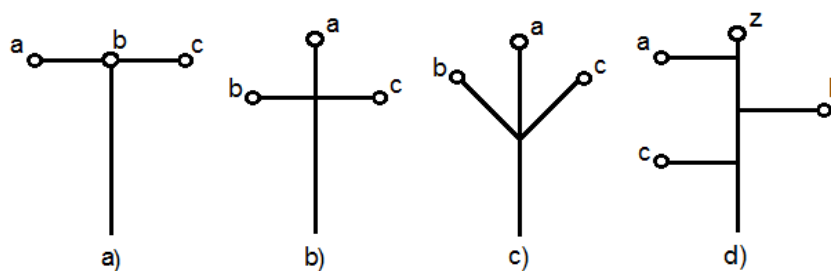
Na hladině vysokého napětí se používají také izolované vodiče (SAX), které mají jádro ze slitiny hliníku a křemíku, kolem něhož je plášť – slabá vrstva izolátoru (např. PVC). Izolované vodiče se používají v místech, kde často dochází k pádům stromů na vedení.

Stožáry venkovního vedení jsou stavěny dřevěné (nelze použít pro dvojité vedení), betonové nebo ocelové. Na stožáry lze umístit jedno vedení (jednoduché vedení) nebo dvě vedení (dvojité vedení). Uspořádání vodičů trojfázového vedení může být:

- vodorovně vedle sebe ( $\dots$ ),
- svisle pod sebou ( $:$ ),
- uspořádané do trojúhelníku ( $::$ ).

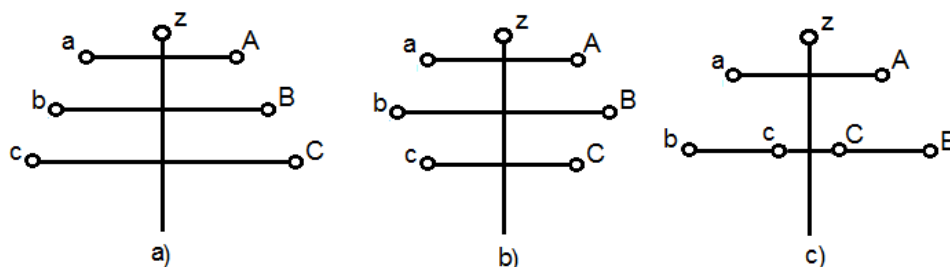
Uspořádání vodičů ovlivňuje rovnoměrnost rozložení přenosových parametrů vedení. Pro různá uspořádání vodičů se mění vzdálenost mezi vodiči jednotlivých fází a tím i kapacita a indukčnost vedení. Rozdílné vzdálenosti mezi vodiči způsobují nesymetrie pasivních parametrů a tím i rozdílné úbytky napětí jednotlivých fází. Na hladině vysokého napětí se také používá jedno zemnicí lano, které chrání vedení před atmosférickým přepětím. Tato problematika je více rozebrána v kapitole 3.

Stožáry používané pro jednoduché vedení vysokého napětí a uspořádání fázových vodičů na stožáru jsou znázorněny na obrázku 1.2.2 – 2.



Obr 1.2.2 – 2 Uspořádání a) rovinné, b) do trojúhelníku, c) „pařát“, d) jednoduché vedení s jedním zemnicím lanem [3]

Možnosti uspořádání dvojitého vedení na stožáru vysokého napětí jsou na obrázku 1.2.2 – 3.



Obr 1.2.2 – 3 Uspořádání a) „jedle“, b) „soudek“, c) „donau“ [3]

Pro mechanické upevnění a izolační oddělení vodičů od stožárů vedení se používají izolátory. Izolátory se vyrábějí podpěrné nebo závěsné. Materiálem používaným pro izolátory je porcelán, keramika, pryskyřice nebo plast vyztužený skelnými vlákny. Na kvalitě izolátorů závisí velikost svodu  $G_s$ , který způsobuje činné ztráty na vedení. Povrch izolátoru bývá značně znečištěn, proto se při nepříznivých podmínkách stává vodivým a na povrchu izolátoru teče svodový (plazivý) proud. Tvar izolátoru je volen takový, aby co nejvíce zamezil toku svodového proudu.

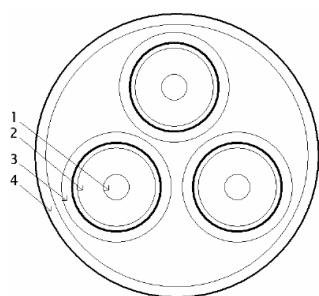
### 1.2.3 Kabelové vedení

Kabelové vedení je provozováno s uzlem transformátoru uzemněným přes rezistor. V porovnání s venkovním vedením je kabelové vedení méně poruchové, ale při malých vzdálenostech mezi fázemi dochází působením oblouku k poškození izolace všech fází a poruchy snadno přechází v třífázové. Poruchy kabelového vedení se obtížně vyhledávají a jsou převážně trvalého charakteru.

Kabely pro vysoké napětí se vyrábějí jednožilové nebo trojžilové s maximálním průřezem  $240 \text{ mm}^2$ . Žíly mají tvar kruhový nebo sektorový (prostorově úsporné pro trojžilové

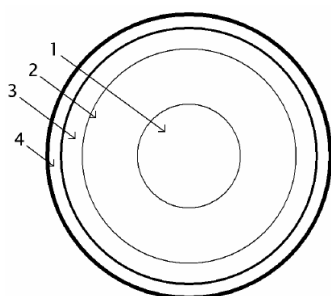
kabely) a jsou provedeny jako dráty (pro malé průřezy) nebo lana. Žíly jsou chráněny izolací, dále jsou opatřeny materiálem pro stínění a pláštěm, případně dalšími obaly nad pláštěm.

Kabely pro napětí 22 kV a 35 kV jsou provozovány se zesílenou izolací, do 10 kV se používají izolované vodiče s nezesílenou izolací. K izolaci se používá impregnovaný papír (dnes už jen dožívají), gumová izolace (pohyblivé příводы), PVC izolace (napětí 6 kV) a zesílený polyetylen (napětí 22 kV a 35 kV). U trojžilových kabelů je každá žíla opatřena olověným pláštěm, kovovou folií nebo pokoveným papírem, jak je vidět na obrázku 1.2.3 – 1. Jednožilový kabel má obvykle izolaci ze síťovaného polyetylenu a je znázorněn na obrázku 1.2.3 – 2.



- 1 – jádro,
  - 2 – izolace vodiče,
  - 3 – olověný plášť, kovová fólie nebo pokovený papír,
  - 4 – olověný plášť.
- Mohou být i další krycí obaly.

Obr 1.2.3 – 1 Trojžilový kabel [12]

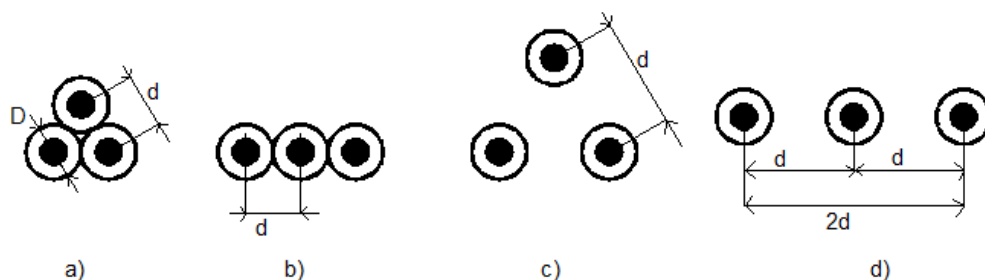


- 1 – jádro,
  - 2 – izolace vodiče,
  - 3 – stínění,
  - 4 – plášť.
- Mohou být i další krycí obaly.

Obr 1.2.3 – 2 Jednožilový kabel [12]

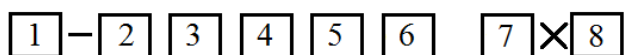
Druh vodiče je volen dle důležitosti provozu a prostředí, ve kterém je kabel uložen. Kabely se ukládají na rovný podklad, kabelové lávky, rošty, stěny a konstrukce, do kabelových kanálů a kolektorů, trubek, tvárnic, do země, do vody a podobně.

Uspořádání kabelů je podobné jako u venkovních lan – rovinné vedle sebe a do trojúhelníku. Způsoby uložení kabelů jsou znázorněny na obrázku 1.2.3 – 3.



Obr 1.2.3 – 3 Uspořádání kabelů a), c) do trojúhelníku, b), d) vedle sebe [10]

Pro značení kabelů se používá následující princip:



- 1 – jmenovité napětí kabelu,
- 2 – materiál jádra (A – hliník, C – měď),
- 3 – materiál izolace (Y – měkčené PVC, G – guma, N – napuštěný papír, XE – zesítený polyetylen),
- 4 – označení kabelu (K – silový),
- 5 – materiál stínění a pláště,
- 6 – obaly nad pláštěm,
- 7 – počet žil,
- 8 – průřez v  $\text{mm}^2$ .

Příklady kabelů používaných na hladině vysokého napětí:

- 6 – CYKCY (měděné jádro, PVC izolace, silový kabel, měděné stínění a PVC obal),
- 22 – AXEKCY (hliníkové jádro, izolace ze zesíteného polyetylen, silový kabel, měděné stínění a PVC obal).

Materiály izolace se neustále vyvíjejí, proto mohou být i jiná písmena. Jádra jsou stále vyráběna měděná či hliníková.

### 1.3 Poruchy v elektrizační soustavě

Při běžném (bezporuchovém) provozu je soustava v ustáleném stavu. Všechny veličiny, které charakterizují její chod, jsou v rovnováze. Z těchto hodnot vycházíme při navrhování sítě. Síť jsou však vystavovány atmosférickým vlivům, cizím zásahům a přepětím, které ovlivňují jejich bezporuchový chod. Jejich následkem je vznik poruch. Při vzniku poruchy se provozní veličiny mění na poruchové. Pro dimenzování sítě a ochranných automatik musíme brát tyto hodnoty v úvahu a poškozené části se musí co nejrychleji vypnout. V ČR se dimenzuje dle kritéria N-1 (předpokládá se vznik pouze jedné poruchy).



Vzniklé poruchy mohou vést ke zvýšení proudu (přetížení, zkratové poruchy) nebo ke zvýšení napětí (atmosférická přepětí, přepětí způsobená spínáním velkých indukčností a kapacit).

Dle souměrnosti lze poruchy rozdělit na:

- souměrné – projevují se ve všech fázích stejně (trojfázové zkraty),
- nesouměrné – projevují se v jednotlivých fázích rozdílně (jednofázové a dvoufázové zkraty, zemní spojení).

Nesouměrné poruchy lze dále rozdělit na poruchy:

- příčné – poruchy vzniklé mezi uzlem a zemí, mezi fázemi (zkraty, zemní spojení),
- podélné – mezi dvěma uzly (přerušení jedné nebo více fází).

Podle doby trvání se poruchy dělí na:

- mžikové – do 0,5 s,
- krátkodobé – do 5 min,
- přerušované – znovu zapalování a uhasínání oblouku,
- trvalé – až několik hodin (než se odstraní porucha).

Podle velikosti přechodové rezistance v místě poruchy lze rozlišovat poruchy:

- kovové –  $R_p = 0 \Omega$ ,
- obloukové –  $R_p \sim$  několik  $\Omega$ ,
- odporové –  $R_p \sim$  stovky  $\Omega$ . [1]

### 1.3.1 Zemní poruchy

Z hlediska provozu uzlu transformátoru rozeznáváme dva typy zemních poruch – zkrat a zemní spojení. Zásadním rozdílem mezi nimi je velikost poruchového proudu. Poruchový proud při zkratu je několikanásobně vyšší než při zemním spojení a je převážně induktivního charakteru. Naopak poruchový proud při zemním spojení je převážně kapacitního charakteru. Rozdílná je i velikost napětí nulového uzlu a velikost napětí zdravých fází.

#### Zkrat

Zkrat vzniká vodivým spojením jednotlivých fází se zemí nebo mezi sebou. Rozeznáváme zkraty jednofázové, dvoufázové, dvoufázové zemní a třífázové. Jednofázové zkraty vznikají pouze v soustavách s přímo uzemněným uzlem, vícefázové zkraty mohou nastat i v soustavách izolovaných či kompenzovaných. Příčinou vzniku zkratu může být například poškozená izolace, špatná manipulace, úder blesku nebo přepětí.

Při dokonalém zkratu ( $R_P = 0$ ) se napětí v místě zkratu sníží na nulu. Klesne celková impedance postižené části sítě a dojde k velkému nárůstu zkratového proudu. Několikanásobné proudy se projevují především silovými účinky na vedení a tepelnými účinky na izolaci. Zkrat musí být ochranami co nejrychleji vypnut.

### Zemní spojení

Zemní spojení vzniká vodivým spojením jedné nebo více fází se zemí v soustavách izolovaných nebo nepřímo uzemněných. Při zemním spojení je možné síť za určitých podmínek nadále provozovat. Zemní spojení blíže popíši v následující kapitole.

#### 1.3.2 Přepětí

Přepětí je každé napětí, které je vyšší než dovolené provozní napětí. V sítích 400 kV je dovolená mez napětí  $\pm 5\%$ . U ostatních sítí je tato dovolená mez  $\pm 10\%$ . [3]

Přepětí bývá způsobeno náhlou změnou stavu sítě. Nastává například při nestabilním hoření oblouku při přerušovaném zemním spojení. Přepětí může být také vnějšího původu, způsobené atmosférickými vlivy (například úder blesku do vedení).

#### 1.3.3 Nesymetrie napětí

Třífázová soustava je symetrická, pokud amplitudy napětí a proudů jsou stejně velké a navzájem posunuté o  $120^\circ$ . Pokud tomu tak není, hovoříme o nesymetrii. Nesymetrie v síti jsou způsobeny nesymetrickými zátěžemi (jednofázové, dvoufázové) nebo netransponovaným vedením vn. Nesymetrie snižují využitelnost rozvodných zařízení, způsobují přídavné ztráty v točivých strojích a ohrožují funkce řídicích a regulačních zařízení.

V síti se může vyskytovat nesymetrie z hlediska různých:

- velikostí napětí jednotlivých fází –  $|\bar{U}_A| \neq |\bar{U}_B| \neq |\bar{U}_C|$ ,
- fázových posunů –  $\nu_{AB} \neq \nu_{BC} \neq \nu_{CA}$ .

Nesymetrická soustava může být:

- vyvážená –  $\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C = 0$
- nevyvážená –  $\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C \neq 0$  (např. zemní spojení).

Nesymetrie v síti lze popisovat pomocí sousledné, zpětné a netočivé složky (viz metoda souměrných složek).

#### 1.3.4 Metoda souměrných složek (metoda Fourtescue)

Při zmíněných poruchách v sítích vznikají nesouměrnosti. Pro zjednodušení výpočtů při řešení nesouměrných stavů v třífázových soustavách lze použít metody, kdy nesouměrnost

rozložíme na tři jednofázové souměrné složkové soustavy. Poté můžeme provádět výpočet pro jednu zvolenou referenční fázi a zbylé fáze přepočítáme (otočení fází o  $120^\circ$  a  $240^\circ$ ). Pro převod fázových veličin nesouměrné soustavy na souměrné složkové soustavy se využívá Fourtescueho matice  $\bar{F}$ .

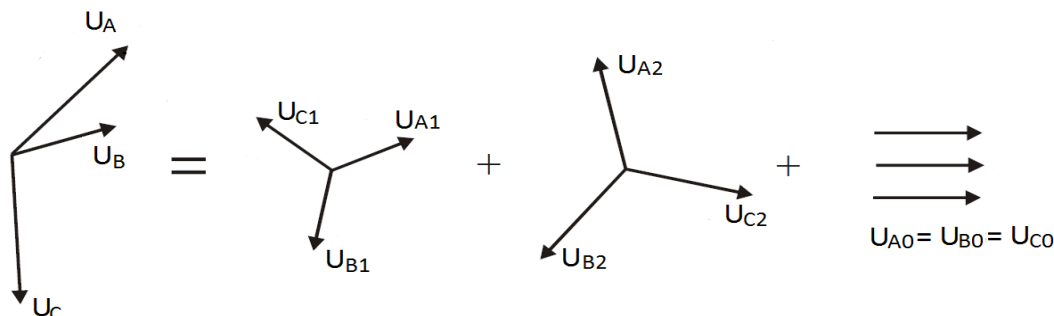
Rozklad se provádí na souměrné složky:

- souslednou – označována indexem 1,
- zpětnou – označována indexem 2,
- netočivou (nulovou) – označována indexem 0.

Sousledná složka má stejný sled fází jako původní soustava, zpětná složka má sled fází opačný než původní soustava a zpětná složka je charakteristická tím, že mezi fázory není žádné fázové pootočení.

Rozklad na souměrné složky má svůj význam i z hlediska fyzikálního, kdy netočivá složka reprezentuje jednosměrnou magnetizaci transformátorového jádra a zpětná složka přidavné ohřívání točivých strojů.

Grafické znázornění rozložení nesouměrné hvězdice napětí na 3 souměrné složky je ukázáno na obrázku 1.3.4 – 1.



Obr 1.3.4 – 1 Rozložení nesouměrné 3f soustavy na složku souslednou, zpětnou a netočivou [2]

Tento rozklad mohu, jak je patrné z obrázku, matematicky zapsat takto:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{A1} + \bar{U}_{A2} + \bar{U}_{A0} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{B1} + \bar{U}_{B2} + \bar{U}_{B0} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2} + \bar{U}_{C0}\end{aligned}\tag{1.3.4 – 1}$$

Zvolím-li fázi A referenční fází, lze rovnice přepsat takto:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}$$

$$\bar{U}_C = \bar{a}\bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2\bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \quad (1.3.4 - 2)$$

Kde  $\bar{a}$  a  $\bar{a}^2$  znamenají otočení fáze o  $120^\circ$  a  $240^\circ$ :

$$\begin{aligned} \bar{a} &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \bar{a}^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \quad (1.3.4 - 3)$$

Soustavu rovnic mohu přepsat do maticového tvaru:

$$\bar{\underline{U}} = \bar{\underline{F}} \cdot \bar{\underline{U}}_{(S)}, \quad \text{kde } \bar{\underline{U}} = \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix}, \bar{\underline{U}}_{(S)} = \begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix}, \text{ a } \bar{\underline{F}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3.4 - 4)$$

Provedu-li inverzi matice  $\bar{\underline{F}}$ , dostanu zápis:

$$\bar{\underline{U}}_{(S)} = \bar{\underline{F}}^{-1} \cdot \bar{\underline{U}}, \quad \text{kde } \bar{\underline{F}}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3.4 - 5)$$

Po rozepsání matice na jednotlivé složky dostanu rovnice:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{a}\bar{U}_B + \bar{a}^2\bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{a}^2\bar{U}_B + \bar{a}\bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) \end{aligned} \quad (1.3.4 - 6)$$

Tyto rovnice platí analogicky i pro proudy. [2]

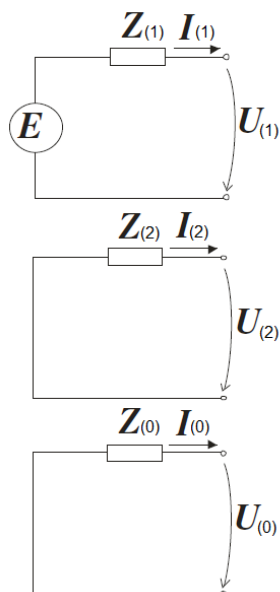
Při odvozování napěťových rovnic všechny zdroje nahradím jedním ekvivalentním zdrojem  $\bar{E}$  (vnitřní napětí zdroje je v podstatě napětí  $\bar{U}_{fa} = \bar{U}_f$ ). Každá z výše popsaných souměrných složek je reprezentována základním obvodem a platí pro ni vztah (1.3.4 - 7).

$$\bar{\underline{E}}_{(S)} = \bar{\underline{Z}}_{(S)} \cdot \bar{\underline{I}}_{(S)} + \bar{\underline{U}}_{(S)} \quad \begin{bmatrix} \bar{E}_{(1)} \\ \bar{E}_{(2)} \\ \bar{E}_{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{(1)} \\ \bar{I}_{(2)} \\ \bar{I}_{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix} \quad (1.3.4 - 7)$$

Jelikož elektromotorické napětí zdroje působí pouze v sousledné složkové soustavě, mohu vztah (1.3.4 - 7) přepsat na následující soustavu rovnic. Zpětná a netočivá soustava žádný vnitřní zdroj neobsahuje.

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{U}_{(1)} \\ 0 &= \bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{I}_{(2)} + \bar{U}_{(2)} \\ 0 &= \bar{Z}_{(0)} \cdot \bar{I}_{(0)} + \bar{U}_{(0)} \end{aligned} \quad (1.3.4 - 8)$$

Vztahům (1.3.4 – 8) odpovídají základní obvody pro jednotlivé složky, znázorněné na obrázku 1.3.4 – 2. Ze vztahů plyne, že v každé složkové soustavě působí pouze napětí a proudy dané složkové soustavy. Proto jsou jednotlivé složkové soustavy až do vzniku poruchy vzájemně nezávislé.



Obr 1.3.4 – 2 Náhradní schéma složkových soustav [14]

Vztahy (1.3.4 – 8) představují tři základní rovnice pro řešení provozních poměrů při poruše. Pro výpočet poruchy je nutné tuto soustavu dále doplnit o tři další nezávislé rovnice, které jsou charakteristické pro daný typ poruchy (pro zemní spojení uvedeny v kapitole 2.6). [2]

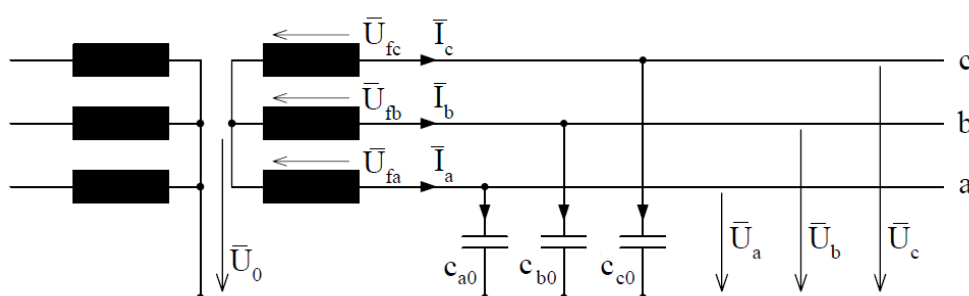
## 2 Způsoby provozu uzlu transformátoru na hladině vn

Dle zadání diplomové práce se nyní omezím pouze na síť vysokého napětí. V České republice jsou síť vysokého napětí provozovány s izolovaným uzlem sítě nebo jako kompenzované s uzemněným uzlem sítě přes rezistor či tlumivku (někdy se síť provozuje i s přechodně uzemněným uzlem). V bezporuchovém stavu u symetrických vedení se všechny tyto sítě chovají stejně. Rozdíl mezi nimi nastává při poruše a jiných nesymetrických stavech (rozdílná velikost a charakter poruchového proudu, napětí proti zemi).

### 2.1 Izolovaná síť

Izolované sítě jsou charakteristické tím, že nulový bod napájecího transformátoru není spojen se zemí. V bezporuchovém stavu při symetrickém zatížení mají vodiče vůči zemi hodnotu fázového napětí a napětí uzlu transformátoru ( $U_0$ ) je v ideálním případě nulové. U netransponovaných vedení vn je však vlivem nesymetrie kapacit jednotlivých fází velikost napětí  $U_0 \leq 1 \% U_f$ . Obvodem procházejí kapacitami k zemi kapacitní proudy. Jejich součet je při symetrické síti a symetrickém napětí roven nule. Schéma izolované sítě v bezporuchovém stavu je na obrázku 2.1 – 1.

Tento způsob zemnění nulového bodu se užívá v sítích vysokého napětí malého rozsahu a v průmyslových závodech. U sítí většího rozsahu by při zemním spojení tekly obrovské kapacitní proudy a vzniklo by nebezpečí krokového a dotykového napětí. Norma doporučuje provoz izolovaných sítí do velikosti kapacitního proudu 10 A. Pro síť s kapacitním proudem od 10 do 20 A se využívá kompenzace. [3]



Obr 2.1 – 1 Soustava s izolovaným uzlem [15]

Z obrázku 2.1 – 1 plynou pro napětí a proudy následující vztahy [15]:

$$\bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} = 0$$

$$\bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} = 0$$

$$\bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} = 0$$

(2.1 – 1)

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{U}_a}{-jX_{a0}} = \frac{\bar{U}_a}{\frac{1}{j\omega c_{a0}}} = j\omega c_{a0}\bar{U}_a$$

$$\bar{I}_b = j\omega c_{b0}\bar{U}_b$$

$$\bar{I}_c = j\omega c_{c0}\bar{U}_c \quad (2.1 - 2)$$

Pro síť s izolovaným uzlem platí, že součet kapacitních proudů je nulový.

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (2.1 - 3)$$

Dosadím-li proudy z rovnic (2.1 – 2) do (2.1 – 3), dostanu vztah:

$$j\omega c_{a0}\bar{U}_a + j\omega c_{b0}\bar{U}_b + j\omega c_{c0}\bar{U}_c = 0 \quad (2.1 - 4)$$

Z rovnic (2.1 – 1) vyjádřím napětí  $\bar{U}_a$ ,  $\bar{U}_b$  a  $\bar{U}_c$  a dosadím je do vztahu (2.1 – 4) a tento vztah upravím vytknutím  $j\omega\bar{U}_0$ .

$$j\omega c_{a0}(\bar{U}_{fa} + \bar{U}_0) + j\omega c_{b0}(\bar{U}_{fb} + \bar{U}_0) + j\omega c_{c0}(\bar{U}_{fc} + \bar{U}_0) = 0$$

$$j\omega\bar{U}_0(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + j\omega(c_{a0}\bar{U}_{fa} + c_{b0}\bar{U}_{fb} + c_{c0}\bar{U}_{fc}) = 0 \quad (2.1 - 5)$$

Uvážím-li posun napětí o  $120^\circ$  a  $240^\circ$ , mohu pro napětí  $\bar{U}_{fb}$  a  $\bar{U}_{fc}$  psát:

$$\bar{U}_{fb} = \bar{a}^2\bar{U}_{fa}$$

$$\bar{U}_{fc} = \bar{a}\bar{U}_{fa} \quad (2.1 - 6)$$

Po dosazení napětí ze vztahů (2.1 – 6) do (2.1 – 5), dostanu vztah pro napětí nulového bodu transformátoru.

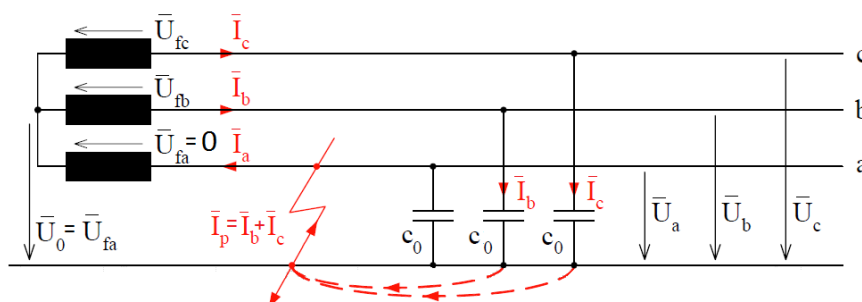
$$\bar{U}_0 = -\frac{c_{a0} + \bar{a}^2 c_{b0} + \bar{a} c_{c0}}{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}} \cdot \bar{U}_{fa} \quad (2.1 - 7)$$

Ze vztahu (2.1 – 7) plyne, že napětí nulového bodu v případě rozdílných zemních kapacit proti zemi není nulové.

V případě souměrných kapacit  $c_{a0} = c_{b0} = c_{c0} = c_0$  bude čitatel ze vztahu (2.1 – 7) roven nule. Napětí nulového bodu proti zemi v bezporuchovém stavu bude nulové.

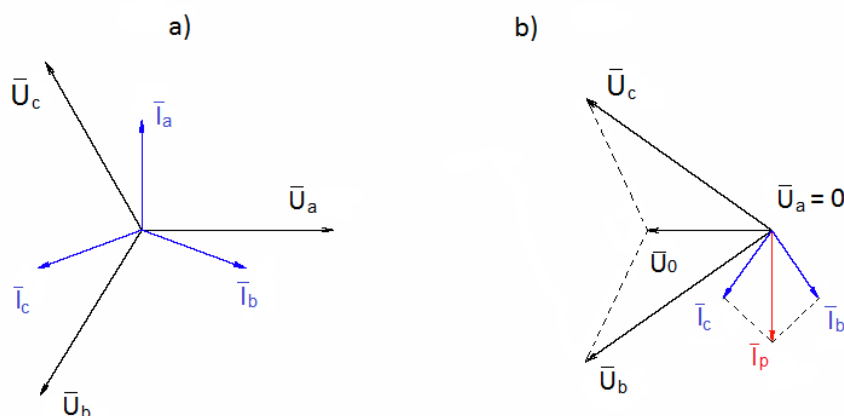
Při vzniku kovového zemního spojení se změní napěťová rovnováha sítě i velikost kapacitních proudů v jednotlivých fázích. Napětí postižené fáze při poruše se sníží na nulu, naopak napětí v uzlu transformátoru vzroste na hodnotu napětí postižené fáze. Napětí zdravých fází nabyde hodnoty sdruženého napětí. Proudů zdravých fází se uzavírají přes zem a vinutí transformátoru. Zemí prochází poruchový proud převážně kapacitního charakteru,

který je dán součtem proudů zdravých fází, jak je patrné z obr. 2.1 – 1. Velikost poruchového proudu je určena příčnými prvky – kapacitami zdravých fází celé sítě vůči zemi a činnými svodovými rezistancemi obvodu, kterými se proud uzavírá. Jelikož je svodová rezistance obvodu mnohonásobně vyšší než zemní kapacity, při výpočtech ji lze zanedbat a uvažovat proud pouze kapacitního charakteru. Nárůst proudu při vzniku zemního spojení může být nepatrný, záleží na rozsáhlosti sítě. Velikost poruchového proudu je důležitým měřítkem pro rozsah sítě. [3]



Obr 2.1 – 1 Dokonalé zemní spojení v izolované soustavě [15]

Změny napětí a proudů v kapacitně souměrné izolované soustavě při vzniku dokonalého zemního spojení jsou patrné z fázorových diagramů na obrázku 2.1 – 2.

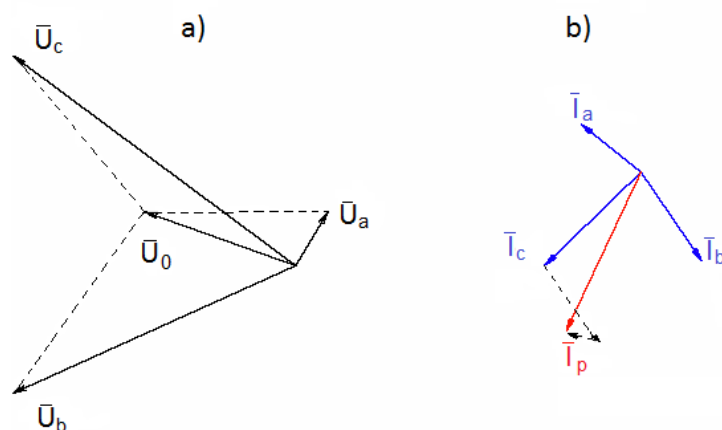


Obr 2.1 – 2 Fázorový diagram izolované soustavy a) v bezporuchovém stavu, b) při dokonalém zemním spojení [11]

V případě vzniku odporové poruchy nebude napětí postižené fáze nulové. Jeho hodnota bude dána velikostí rezistance poruchy. Proto ani hodnota napětí nulového bodu nebude rovna fázovému napětí a poruchový proud bude dán součtem proudů všech tří fází.

Změny napětí a proudů při vzniku odporové poruchy jsou patrné z fázorových diagramů na obrázku 2.1 – 3.





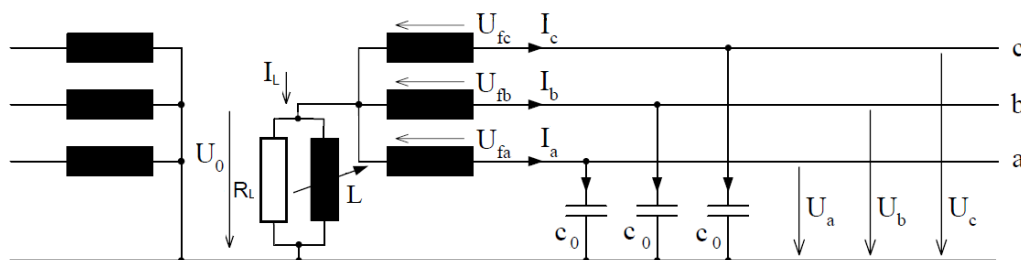
Obr 2.1 – 3 Fázorový diagram a) napětí při odporové poruše, d) proudu při odporové poruše [11]

Při zemním spojení v izolované soustavě je vzniklý poruchový proud ve všech vzdálenostech zhruba stejný. Pokud poruchový proud nepřekročí stanovenou hodnotu, nemusí být síť okamžitě vypnuta. Může tak být provozována až do doby vyhledání a odstranění poruchy. Výhodou tohoto způsobu provozu je snadná identifikace poruchy díky zvýšenému napětí nulového bodu. Nevýhodou je obtížné zhášení oblouku, vznik přepětí při poruše a nutnost dimenzovat vedení a ochran na hodnotu sdruženého napětí.

## 2.2 Síť uzemněná přes zhášecí tlumivku

Jak bylo výše zmíněno, velikost poruchového proudu závisí na velikosti sítě – v případě rozsáhlých sítí (převážně venkovního vedení) by při zemním spojení tekly soustavou obrovské kapacitní proudy. Proto se rozsáhlejší sítě s poruchovým proudem nad 10 A dle normy ČSN musí provozovat jako kompenzované. V kompenzovaných sítích je pro snížení kapacitních proudů vzniklých při zemním spojení mezi uzel transformátoru a zem připojena zhášecí tlumivka, nazývána také Petersenova tlumivka, jak je naznačeno na obrázku 2.2 – 1. Tlumivka se při vzniku zemního spojení stává zdrojem induktivního proudu, který působí proti kapacitnímu proudu a výsledný poruchový proud se snižuje. Abychom docílili vykompenzovaného stavu, používají se plynule regulovatelné tlumivky s velkým regulačním rozsahem.

Dle normy ČSN 33 3070 (nahrazena novou normou ČSN – EN) jsou zhášecí tlumivky instalovány do napájecího uzlu v rozvodnách napájecí sítě vysokého napětí. Jejich počet se volí stejný jako je počet napájecích transformátorů, samostatně provozovaných přípojníc a velikosti kapacitního proudu jednotlivých sítí.



Obr 2.2 – 1 Soustava kompenzovaná zhášecí tlumivkou [15]

Pro napětí a proudy v bezporuchovém stavu platí stejně jako pro síť izolovanou vztahy (2.1 – 1) a (2.1 – 2). Proud procházející tlumivkou vyjádřím:

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_0}{Z_L} = \bar{U}_0 \bar{Y}_L = \bar{U}_0 \left( \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_L} \right) \quad (2.2 - 1)$$

V kompenzované síti bude součet proudů nulový.

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c + \bar{I}_L = 0 \quad (2.2 - 2)$$

Do vztahu (2.2 – 2) dosadím za proudy z (2.1 – 2) a za napětí z (2.1 – 1) a rovnici dále upravím.

$$j\omega c_{a0}(\bar{U}_{fa} + \bar{U}_0) + j\omega c_{b0}(\bar{U}_{fb} + \bar{U}_0) + j\omega c_{c0}(\bar{U}_{fc} + \bar{U}_0) + \bar{U}_0 \left( \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_L} \right) = 0$$

$$\left[ j\omega(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_L} \right] \bar{U}_0 + j\omega(c_{a0}\bar{U}_{fa} + c_{b0}\bar{a}^2\bar{U}_{fa} + c_{c0}\bar{a}\bar{U}_{fa}) = 0$$

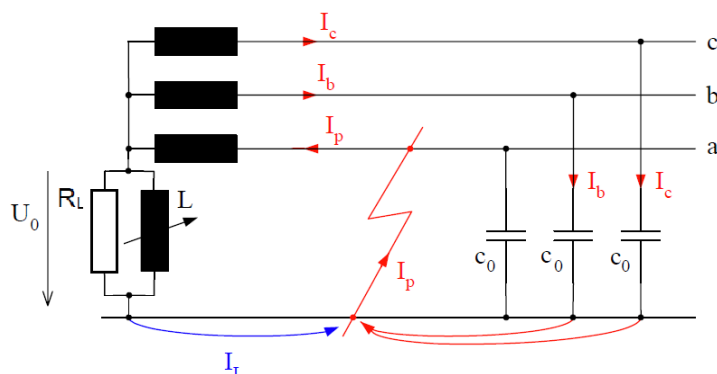
$$\bar{U}_0 = - \frac{j\omega(c_{a0} + \bar{a}^2 c_{b0} + \bar{a} c_{c0})}{j\omega(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{j\omega L}} \cdot \bar{U}_{fa} \quad (2.2 - 3)$$

V ideálním případě v bezporuchovém stavu je napětí nulového bodu nulové a proud procházející tlumivkou také. Ze vztahu (2.2 – 3) a (2.2 – 1) je však vidět, že v případě nesymetrické sítě tomu tak není.

Při vzniku dokonalého zemního spojení v síti kompenzované zhášecí tlumivkou opět klesne napětí postižené fáze na nulu, napětí zdravých fází nabyde hodnoty sdruženého napětí a mezi uzlem transformátoru a zemí se objeví hodnota fázového napětí. Fázové napětí uzlu transformátoru způsobí, že se tlumivka stane zdrojem proudu induktivního charakteru. Induktivní proud tlumivky se v místě spojení fáze se zemí sčítá s kapacitním proudem. Díky regulaci tlumivky jsou v ideálním případě tyto proudy stejně velké a fázově otočené o 180° – mezi kapacitou sítě a indukčností tlumivky dochází k paralelní rezonanci. Kapacitní proud je v ideálním případě vykompenzován a výsledný poruchový proud je nulový. Podmínkou pro

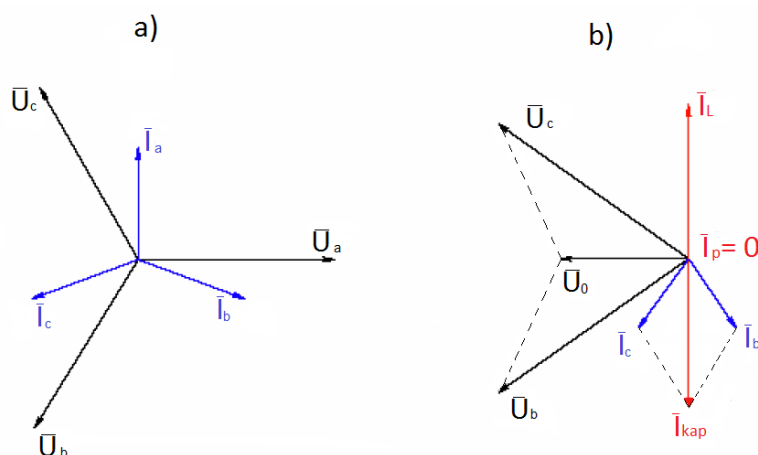
vykompenzovaný stav je:  $X_L = X_{c0}$  (2.2 – 4)

Kompenzována je jen základní harmonická, vyšší harmonické zůstávají nevykompenzovány.



Obr 2.2 – 2 Dokonalé zemní spojení v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku [15]

Na obrázku 2.2 – 3 jsou znázorněny fázorové diagramy pro bezporuchový stav a pro ideální případ dokonale vykompenzované soustavy.



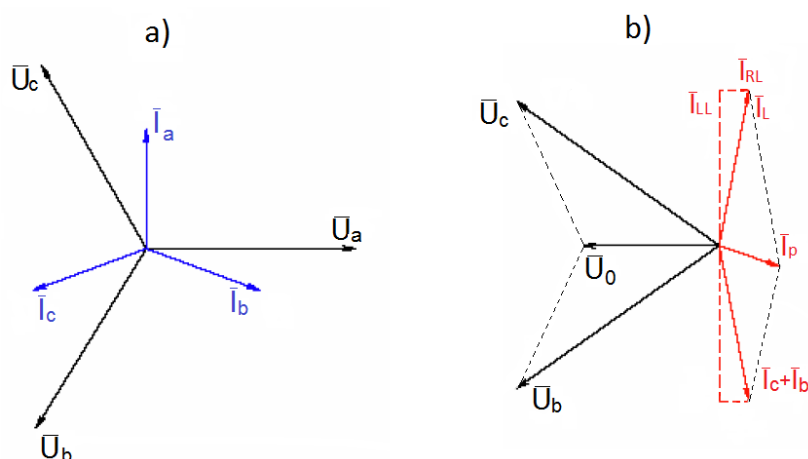
Obr 2.2 – 3 Fázorový diagram napětí a proudů a) v bezporuchovém stavu, b) ve vykompenzovaném stavu [11]

Vykompenzovaného stavu lze však dosáhnout jen v ideálním případě. Ve skutečnosti nelze kompenzační tlumivku nastavit vždy zcela přesně a tlumivka má kromě indukčnosti i rezistivitu a síť kromě příčných kapacit i svod. Proto budou poruchové proudy obsahovat i činné složky a síť poteče zbytkový poruchový proud.

Kompenzovanou síť lze stejně jako izolovanou při vzniku jedné poruchy nadále provozovat. Díky Petersenově tlumivce zapojené mezi uzel transformátoru a zem je vzniklý poruchový proud menší než v případě sítě izolované a je převážně činného charakteru. Výhodou je možnost samozhášení obloukových zemních spojení a zároveň snižuje jejich

možnost znovu zapálení. U venkovních vedení vznikají při poruše nižší hodnoty krokového napětí a nižší hodnoty přepětí. Nevýhodou kompenzovaných sítí jsou náklady na zhášecí tlumivky a automatiku ladění a nutnost neustálého udržování vyladěného stavu. Další nevýhodou kompenzovaných sítí je horší vyhledávání místa poruchy.

Na následujícím obrázku (2.2 – 4) jsou znázorněny změny napětí a proudů při zemním spojení kompenzované soustavy v reálném případě, to znamená s respektováním rezistivity tlumivky a svodu.

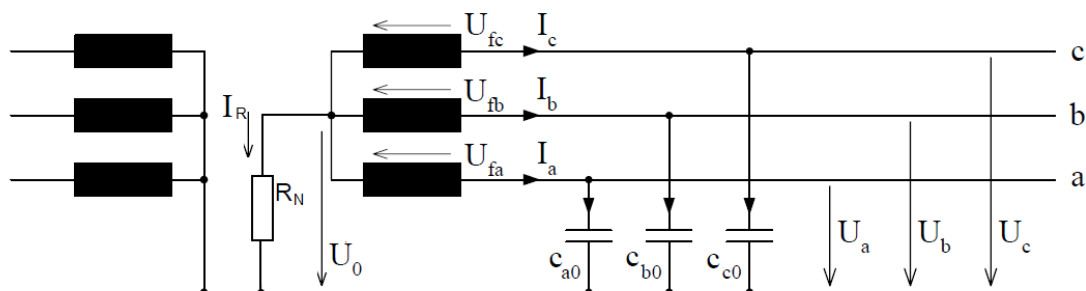


Obr 2.2 – 4 Fázorový diagram a) v bezporuchovém stavu, b) při zemním spojení s respektováním rezistivity tlumivky a svodů [11]

### 2.3 Síť uzemněná přes rezistor

V případě kabelových vedení tečou sítě třicetkrát až sedmdesátkrát větší kapacitní proudy než u vedení venkovních. Pro kompenzaci tak vysokých proudů by musely být použity tlumivky značných výkonů, což je velmi drahé. Navíc u kabelových vedení se nejčastěji vyskytují vícefázové poruchy trvalého charakteru (jak bylo uvedeno v úvodu práce), u kterých nelze snížením poruchového proudu docílit samozhášení zemního spojení jako při obloukových poruchách venkovních vedení. U kabelových sítí zhášecí tlumivka neomezuje přepětí vzniklá při zemním spojení. Izolace zdravých fází jsou proto namáhány zvýšeným napětím a hrozí vznik další poruchy. Proto síť není možné nadále provozovat jako v předchozích případech.

Z výše uvedených důvodů vyplývá neefektivnost provozování kabelových vedení jako sítí kompenzovaných tlumivkou. Proto se u kabelových vedení (u vedení překračujících meze  $I_{kap}$ ) mezi nulový bod transformátoru a zem připojuje činný rezistor (obr 2.3 – 1).



Obr 2.3 – 1 Soustava uzemněná přes rezistor [15]

Pro soustavu uzemněnou přes rezistor v bezporuchovém stavu platí pro napětí a proud vztahy (2.1 – 1) a (2.1 – 2) jako pro síť izolovanou. Pro proud rezistorem lze z obrázku napsat vztah:

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{U}_0}{R} \quad (2.3 - 1)$$

V kompenzované síti bude součet proudů nulový.

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c + \bar{I}_R = 0 \quad (2.3 - 2)$$

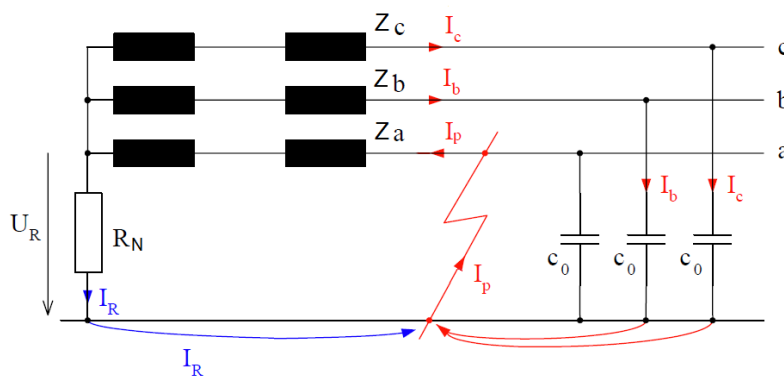
Do vztahu (2.3 – 2) dosadím za proudy z (2.1 – 2) a za napětí z (2.1 – 1) a rovnici dále upravím.

$$j\omega c_{a0}(\bar{U}_{fa} + \bar{U}_0) + j\omega c_{b0}(\bar{U}_{fb} + \bar{U}_0) + j\omega c_{c0}(\bar{U}_{fc} + \bar{U}_0) + \frac{\bar{U}_0}{R} = 0$$

$$\left[ j\omega(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + \frac{1}{R} \right] \bar{U}_0 + j\omega(c_{a0}\bar{U}_{fa} + c_{b0}\bar{a}^2\bar{U}_{fa} + c_{c0}\bar{a}\bar{U}_{fa}) = 0$$

$$\bar{U}_0 = -\frac{j\omega(c_{a0} + \bar{a}^2 c_{b0} + \bar{a} c_{c0})}{j\omega(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + \frac{1}{R}} \cdot \bar{U}_{fa} \quad (2.3 - 3)$$

Na následujícím obrázku je znázorněno zemní spojení v soustavě uzemněné přes činný rezistor.



Obr 2.3 – 2 Zemní spojení v síti uzemněné přes rezistor [15]

Pro docílení účinného tlumení přepětí při poruše musí být použit rezistor takové hodnoty, aby jmenovitý proud procházející tímto rezistorem byl větší než kapacitní proud sítě.

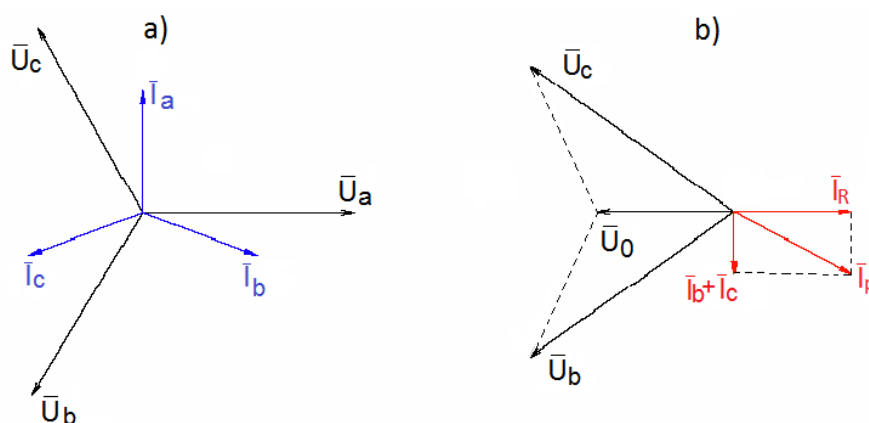
$$\bar{I}_R \geq \bar{I}_{kap} \quad (2.3 - 4)$$

$$\frac{\bar{U}_f}{R_N} \geq 3\omega c_0 \bar{U}_f \quad (2.3 - 5)$$

$$R_N \leq \frac{1}{3\omega c_0} \quad (2.3 - 6)$$

Obvykle se používají rezistory o pevných hodnotách a velikosti řádově desítky ohmů. Poruchový proud při vzniku zemní poruchy je dán vektorovým součtem kapacitního proudu celé sítě a proudem tekoucím přes uzemňovací rezistor. Velikost poruchového proudu závisí na rozsáhlosti sítě a je závislá na vzdálenosti poruchy od transformátoru.

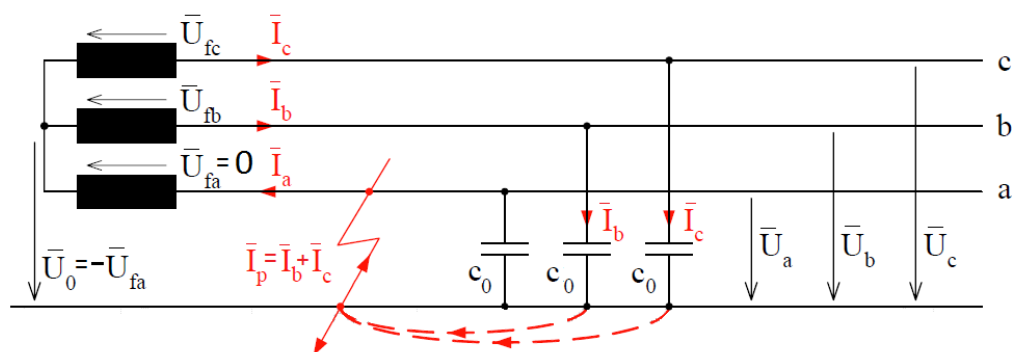
Fázorový diagram napětí a proudů v bezporuchovém stavu a při zemní poruše v soustavě uzemněné přes rezistor je znázorněn na obrázku 2.3 – 3.



Obr 2.3 – 3 Fázorový diagram soustavy s nepřímou uzemněným nulovým bodem přes rezistor a) v bezporuchovém stavu, b) při zemním spojení [11]

## 2.4 Výpočet dokonalého trvalého zemního spojení pomocí fázových hodnot

Na obrázku 2.4 – 1 je zobrazeno dokonalé kovové zemní spojení ( $R_p = 0$ ) v soustavě s izolovaným uzlem.



Obr. 2.4 – 1 Dokonalé zemní spojení [15]

Dokonalé spojení je charakteristické tím, že obvodem protéká poruchový kapacitní proud, který je dán součtem proudů zbylých zdravých fází. Napětí postižené fáze v tomto případě klesne na nulovou hodnotu a napětí nulového bodu bude rovno fázovému napětí postižené fáze.

Základem výpočtu dokonalého zemního spojení v izolované soustavě jsou vztahy: [15]

$$\bar{I}_p = \bar{I}_a = \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (2.4 - 1)$$

$$\bar{U}_a = 0 \quad (2.4 - 2)$$

Z obrázku (2.4 – 1) vyplývají vztahy pro proudy podobné jako v bezporuchovém stavu.

$$\begin{aligned} \bar{I}_b &= j\omega c_0 \bar{U}_b \\ \bar{I}_c &= j\omega c_0 \bar{U}_c \end{aligned} \quad (2.4 - 3)$$

Kde:  $c_0$  – celková kapacita fáze proti zemi,  $c_0 = c_{01} \cdot l$

$c_{01}$  – kapacita vedení proti zemi vztažená na 1 km ( $\mu\text{F}/\text{km}$ ),

$l$  – délka všech vedení sítě (km).

Po dosazení vztahů pro proudy (2.4 – 3) do vztahu (2.4 – 1) dostanu:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega c_0 (\bar{U}_b + \bar{U}_c) \quad (2.4 - 4)$$

Z obrázku (2.4 – 1) dále vyplývají vztahy pro napětí stejné jako v bezporuchovém stavu.

$$\begin{aligned} \bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} &= 0 \\ \bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} &= 0 \\ \bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} &= 0 \end{aligned} \quad (2.4 - 5)$$

Ze vztahu (2.4 – 5) vyplývá:

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \quad (2.4 - 6)$$

Napětí nepostižených fází proti zemi stoupnou na hodnotu sdruženého napětí. Napětí  $\bar{U}_b$  a  $\bar{U}_c$  pak přepíše takto:

$$\begin{aligned} \bar{U}_b &= \bar{U}_0 + \bar{U}_{fb} = (-1 + \bar{a}^2)\bar{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{j130^\circ}\bar{U}_{fa} \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_0 + \bar{U}_{fc} = (-1 + \bar{a})\bar{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{j130^\circ}\bar{U}_{fa} \end{aligned} \quad (2.4 - 7)$$

Poruchový proud při dokonalém zemním spojení vypočítám dosazením napětí z (2.4 – 7) do (2.4 – 4) a upravením tohoto vztahu.

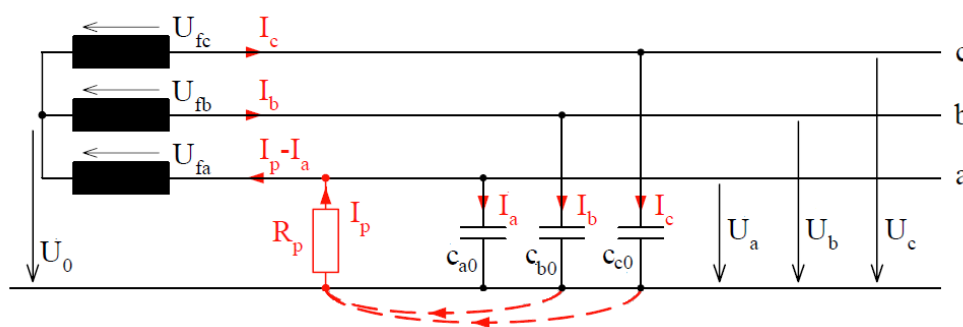
$$\begin{aligned} \bar{I}_p &= j\omega c_0[(-1 + \bar{a}^2) + (-1 + \bar{a})]\bar{U}_{fa} \\ \bar{I}_p &= j\omega c_0(-2 + \bar{a}^2 + \bar{a} + 1 - 1)\bar{U}_{fa} \\ \bar{I}_p &= 3j\omega c_0\bar{U}_{fa} = -3j\omega c_0\bar{U}_0 \end{aligned} \quad (2.4 - 8)$$

Poruchový proud pro dokonalé zemní spojení je také někdy značen jako  $\bar{I}_{KAP}$ . Hodnota kapacitního proudu je charakteristickou hodnotou sítě.

$$\bar{I}_p = \bar{I}_{KAP} = \bar{U}_f \cdot 3j\omega c_0 \quad (2.4 - 9)$$

## 2.5 Výpočet odporového zemního spojení pomocí fázových hodnot

O odporové zemní spojení se jedná tehdy, je-li hodnota přechodové rezistance v místě poruchy nezanedbatelná (řádově stovky  $\Omega$ ).



Obr 2.5 – 1 Odporové zemní spojení [15]

Jak již bylo řečeno, v případě odporové zemní poruchy nelze předpokládat nulové napětí postižené fáze a pro poruchový proud platí vztah: [15]

$$\bar{I}_p = \frac{-\bar{U}_a}{R_p} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (2.5 - 1)$$

V odporovém zemním spojení platí opět vztahy (2.4 – 3) a (2.4 – 5). Dosazením těchto vztahů do (2.5 – 1) a následnou úpravou získám vztah pro výpočet napětí nulového bodu.

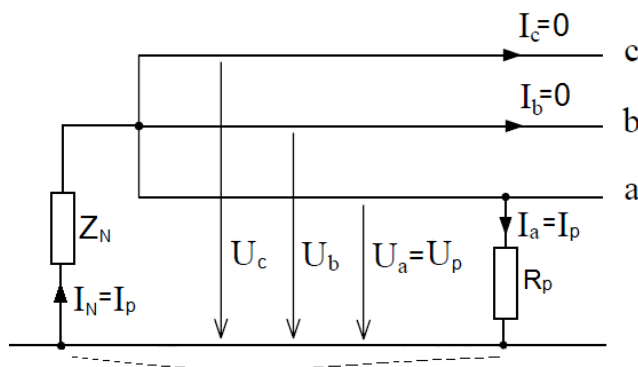


$$\begin{aligned}
 j\omega c_{a0}\bar{U}_a + j\omega c_{b0}\bar{U}_b + j\omega c_{c0}\bar{U}_c &= \frac{-\bar{U}_a}{R_p} \\
 j\omega c_{a0}(\bar{U}_{fa} + \bar{U}_0) + j\omega c_{b0}(\bar{U}_{fb} + \bar{U}_0) + j\omega c_{c0}(\bar{U}_{fc} + \bar{U}_0) &= \frac{-(\bar{U}_{fa} + \bar{U}_0)}{R_p} \\
 j\omega \bar{U}_0(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + j\omega(c_{a0}\bar{U}_{fa} + c_{b0}\bar{U}_{fb} + c_{c0}\bar{U}_{fc}) &= \frac{-\bar{U}_{fa} - \bar{U}_0}{R_p} \\
 \bar{U}_0 \left[ j\omega(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + \frac{1}{R_p} \right] &= \bar{U}_{fa} \left[ -j\omega(c_{a0} + c_{b0}\bar{a}^2 + c_{c0}\bar{a}) - \frac{1}{R_p} \right] \\
 \bar{U}_0 &= - \frac{j\omega(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + \frac{1}{R_p}}{j\omega(c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}) + \frac{1}{R_p}} \cdot \bar{U}_{fa}
 \end{aligned}
 \tag{2.5 - 2}$$

Ze vztahu (2.5 – 2) je vidět, že napětí nulového bodu při odporové poruše není nulové. Jeho hodnota bude záviset na velikosti rezistivity poruchy.

## 2.6 Obecný výpočet zemního spojení metodou souměrných složek

Pro výpočet nesymetrických poruch je daleko výhodnější než předchozí řešení využít metodu souměrných složek popsanou v kapitole 1.3.4. Na obrázku 2.6 – 1 je obecný model sítě se znázorněnou odporovou zemní poruchou.



Obr 2.6 – 1 Obecný model sítě se zemní poruchou [4]

Při výpočtu budu vycházet z charakteristických vztahů pro zemní spojení, které jsou patrné z obrázku 2.6 – 1.

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_a &= \bar{U}_p \\
 \bar{I}_b &= 0 \\
 \bar{I}_c &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.6 - 1}$$

Aplikuji-li vztah 1.4.4 – 5 na proudy, získám vztah (2.6 – 2) pro složkové proudy a jeho přepsáním vztah (2.6 – 3).

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{(1)} \\ \bar{I}_{(2)} \\ \bar{I}_{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 1/3 \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \end{bmatrix} \quad (2.6 - 2)$$

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_a = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_p \quad (2.6 - 3)$$

Z uvedených vztahů je vidět, že proudy sousledné, zpětné a netočivé složky jsou totožné. Proto mohou jednotlivé složkové soustavy propojit do série s rezistancí poruchy. Výsledné obecné náhradní schéma je na obrázku 2.6 – 2, kde:

$\bar{Z}_{OT}$  – složkové impedance transformátoru,

$\bar{Z}_{OV}$  – složkové impedance vedení,

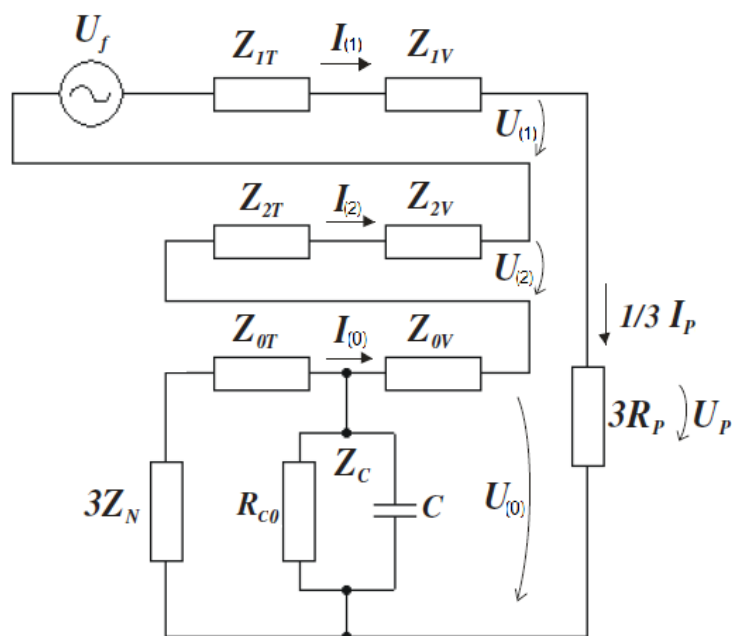
$\bar{Z}_N$  – impedance v uzlu transformátoru,

$\bar{Z}_C$  – příčná impedance vedení,

C – kapacita celého vedení proti zemi,

$R_{c0}$  – svodová rezistance celého vedení,

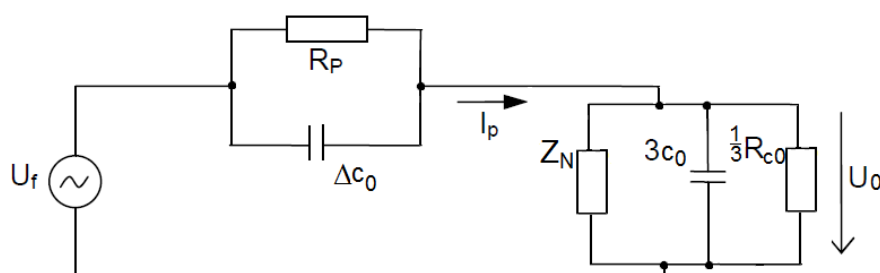
$R_p$  – rezistance poruchy.



Obr 2.6 - 2 Obecné náhradní schéma zemního spojení [14]

Jelikož jsou podélné impedance vedení vzhledem k příčné impedanci  $Z_C$  zanedbatelné, je možné ze schématu vypustit celou souslednou, zpětnou a netočivou impedanci vedení. Dále je možné zanedbat impedance transformátoru, jelikož jsou velmi malé, a také mezifázové

kapacity. Takto zjednodušené schéma je znázorněno na obrázku 2.6 – 3.



Obr 2.6 – 3 – Zjednodušené obecné náhradní schéma zemního spojení.

Ze zjednodušeného náhradního schématu si vyjádřím admitanci  $Y_1$  a  $Y_2$ .

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{R_p} \quad (2.6 - 4)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{\bar{Z}_N}, \quad \text{přičemž platí: } -jX_{c0} = \frac{1}{j3\omega c_0} \quad (2.6 - 5)$$

Kde:  $R_{c0} (\Omega)$  – svodová rezistance jedné fáze celé sítě,

$c_0$  (F) – kapacita jedné fáze proti zemi celého vedení,

$\bar{Z}_N (\Omega)$  – impedance v uzlu transformátoru.

Metodou uzlového napětí poté mohu určit napětí nulového bodu transformátoru.

$$\bar{U}_0 = \frac{\bar{Y}_1}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2} \cdot \bar{U}_f = \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{\bar{Z}_N}} \cdot \bar{U}_f \quad (2.6 - 6)$$

Napětí jednotlivých fází lze odvodit opět pomocí smyček z modelu sítě.

$$\bar{U}_a = \bar{U}_{fa} - \bar{U}_0 = \bar{U}_f - \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{\bar{Z}_N}} \cdot \bar{U}_f \quad (2.6 - 7)$$

$$\bar{U}_b = \bar{U}_{fb} - \bar{U}_0 = \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_f - \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{\bar{Z}_N}} \cdot \bar{U}_f \quad (2.6 - 8)$$

$$\bar{U}_c = \bar{U}_{fc} - \bar{U}_0 = \bar{a} \cdot \bar{U}_f - \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{\bar{Z}_N}} \cdot \bar{U}_f \quad (2.6 - 9)$$

Ze vztahů pro výpočet jednotlivých fázových napětí je vidět závislost napětí na rezistanci poruchy. V případě kovové poruchy ( $R_p = 0$ ) bych úpravou vztahů dokázala, že napětí postižené fáze bude nulové a napětí zdravých fází stoupne na hodnotu sdruženou. Naopak při vysoce odporovém spojení bude napětí nulového bodu zanedbatelné a hodnoty napětí budou přibližně stejné jako v bezporuchovém stavu. To dokazuje dřívější teoretické předpoklady zemního spojení.

Pro výpočet poruchového proudu platí vztah 2.6 – 10.

$$\bar{I}_p = \bar{Y}_2 \cdot \bar{U}_0 = \left( \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{\bar{Z}_N} \right) \cdot \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{\bar{Z}_N}} \cdot \bar{U}_f \quad (2.6 - 10)$$

Jelikož je svodová rezistance řádově 20 – 50 krát větší než kapacitní reaktance, mohu výpočet dále zjednodušit vypuštěním této rezistance. V případě izolované soustavy by se impedance nulového bodu  $Z_N$  blížila k nekonečnu. Pro kovové zemní spojení by proto vztah (2.6 – 10) opět přešel na známý vztah 2.4 – 8 pro výpočet kapacitního proudu.

$$\bar{I}_p = 3j \cdot \omega \cdot c_0 \cdot \bar{U}_f \quad (2.6 - 11)$$

### 3 Příčiny vzniku nesymetrie fázových napětí

Nesymetrie fázových napětí vzniká nejen při zemním spojení, jak bylo popsáno v kapitole 2. Dalšími činiteli, které ovlivňují souměrnost fázových napětí, jsou pasivní parametry vedení, jak bylo zmíněno v kapitole 1. Hlavními činiteli nesymetrie jsou nesymetrie svodových rezistancí a nesymetrie kapacit. Nesymetrie svodových rezistancí je dána snížením izolační schopnosti některé z fází vlivem poškození izolátoru nebo přiblížením k porostu. Kapacita vedení je závislá na uspořádání vodičů – na výšce vodičů nad zemí, na vzdálenosti vodičů od sebe a na jejich délce. V této práci se zaměřím na vznik a výpočet nesymetrie zemních kapacit venkovních a kabelových vedení. Určení kapacitní nesymetrie provedu zvlášť pro vedení venkovní a pro kabely.

Kapacitní nesymetrie venkovních vedení vzniká vlivem uspořádání vodičů jednotlivých fází na stožárech. Rozdílné kapacity vodičů vznikají různými vzdálenostmi od ostatních fází a jiným výškovým uložením vodiče nad zemí. Vliv těchto faktorů na velikost kapacitní nesymetrie uvedu na příkladu pro rovinné uspořádání a pro uspořádání do trojúhelníku.

U jednožilových kabelů vzniká kapacitní nesymetrie vlivem rozdílných délek vodičů jednotlivých fází při jejich ukládání. Vliv délky vodiče na jeho kapacitu bude také uveden na praktickém příkladu.

#### 3.1 Výpočet zemních kapacit venkovního vedení

Pro určení nesymetrie zemních kapacit vedení nejprve odvodím výpočet dílčích kapacit. Všechny parametry budu určovat na vzdálenost 1 km vodiče, proto zde nebudu uvažovat délku vodiče. Odvozené vztahy poté aplikuji na výpočet kapacit vodičů venkovního vedení.

Při výpočtu budu vycházet ze soustavy maticových rovnic  $U = \delta Q$  a  $Q = kU$ . (3.1 – 1)

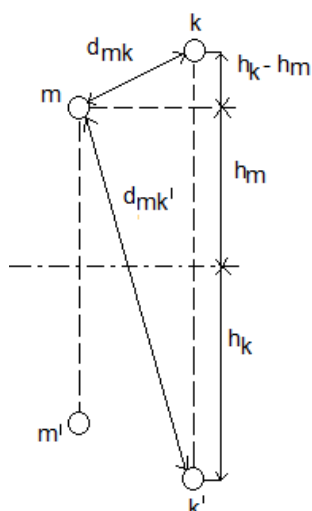
Kde:  $U$  – potenciál vodiče,

$Q$  – lineární hustota náboje,

$\delta$  – potenciálový součinitel,

$k$  – kapacitní součinitel,  $k = \delta^{-1}$ .

Pro výpočet zemních kapacit vedení použiji metodu zrcadlení, kdy symetricky podle roviny země ke každému skutečnému vodiči ( $k$ ) s lineární hustotou náboje  $Q_k$  přiřadím vodič fiktivní ( $k'$ ) stejných rozměrů s lineární hustotou  $Q_{k'} = -Q_k$ , jak je znázorněno na obrázku 3.1 – 1.



Obr 3.1 – 1 Dvě dvojice skutečných a fiktivních vodičů [4]

Pro potenciál v libovolném bodě na povrchu vodiče  $m$  bude platit vztah (3.1 – 2).

$$U_m = \sum_{k,k'=1}^n (U_{mk} + U_{mk'}) = \sum_{k,k'=1}^n \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{mk'}}{d_{mk}} = \sum_{k=1}^n \delta_{km} Q_k \quad (3.1 - 2)$$

Kde:  $U_{mk}$  ( $U_{mk'}$ ) – příspěvek vodiče  $k$  ( $k'$ ) na potenciál v bodě na povrchu vodiče  $m$ ,

$\epsilon$  – permitivita materiálu,  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

$\epsilon_0$  – permitivita vakua,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ,

$\epsilon_r$  – relativní permitivita vodiče, izolace a prostředí (pro neizolovaný vodič ve vzduchu

$\epsilon_r = 1$ ).

Pro vzdálenost vodiče sama od sebe platí, že  $d_{kk} = r_k$ , kde  $r_k$  je poloměr vodiče, a vzdálenost mezi skutečnými vodiči  $k$  a  $m$  je  $d_{km} = d_{mk}$ .

Z obrázku 3.1 – 1 dále vyplývá, že vzdálenost skutečného a fiktivního vodiče  $d_{kk'} = 2h_k$ , a lze také určit vzdálenost skutečného vodiče od neodpovídajícího fiktivního vodiče

$$d_{km'} = d_{m'k} = d_{mk'} = d_{k'm} = \sqrt{(h_k + h_m)^2 + [d_{km}^2 - (h_k - h_m)^2]} = \sqrt{4h_k h_m + d_{km}^2} \quad (3.1 - 3)$$

Ze vztahu (3.1 – 2) si vyjádřím potenciálový součinitel  $\delta$ . Za  $d_{mk}$  a  $d_{mk'}$  dosadím vzdálenosti formulované v (3.1 – 3) a přirozené logaritmy převedu na dekadické.

$$\delta_{mk} = \delta_{km} = \frac{1}{0,0242 \cdot \epsilon_r} \log \frac{\sqrt{4h_k h_m + d_{km}^2}}{d_{mk}} \quad (3.1 - 4)$$

$$\delta_{mm} = \frac{1}{0,0242 \cdot \epsilon_r} \log \frac{2h_m}{r_m} \quad (3.1 - 5)$$

Z potenciálových součinitelů sestavím matici  $\underline{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_{kk} & \delta_{km} \\ \delta_{mk} & \delta_{mm} \end{bmatrix}$  a její inverzí získám matici kapacitních součinitelů  $\underline{k} = \underline{\delta}^{-1}$ . Součtem kapacitních součinitelů příslušných k danému vodiči vypočtu dílčí kapacitu vodiče  $c_{m0}$  a  $c_{mk}$ .

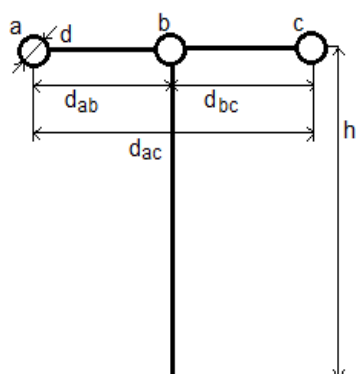
$$c_{m0} = k_{mm} + \sum_{k=1, k \neq m}^n k_{mk} \quad c_{mk} = c_{km} = -k_{mk} \quad (3.1 - 6)$$

Z dílčích kapacit mohu určit provozní kapacitu jednotlivých fází.

$$\bar{C}_m = \frac{c_{m0}\bar{U}_m + \sum_{k=1}^n c_{mk}(\bar{U}_m - \bar{U}_k)}{\bar{U}_m} = \frac{\bar{Q}_m}{\bar{U}_m} \quad (3.1 - 7)$$

Výše uvedené vztahy použiji pro určení kapacity jednoduchého trojfázového venkovního vedení. Příklad výpočtu provedu pro dvě uspořádání vodičů – rovinné a do trojúhelníku, které jsou znázorněné na obrázku 3.1.1 – 1 a 3.1.2 – 1. Výpočty budu provádět na hladině 22 kV pro lana AlFe 8 se jmenovitým průřezem 120 mm<sup>2</sup>.

### 3.1.1 Výpočet zemních kapacit pro rovinné uspořádání



Jmenovitý průřez:	$S = 120 \text{ mm}^2$
Matematický průměr vodiče:	$d = 13,11 \text{ mm}$ ( $r = 6,555 \text{ mm}$ )
Vzdálenosti vodičů:	$d_{ab} = 0,9 \text{ m}$
	$d_{bc} = 0,9 \text{ m}$
	$d_{ac} = 1,8 \text{ m}$
Výška vodičů nad zemí:	$h = 8 \text{ m}$

Obr 3.1.1 – 1 Rovinné uspořádání

Výpočet potenciálových součinitelů podle vztahů (3.1 – 4) a (3.1 – 5):

$$\delta_{ab} = \delta_{ba} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 8 \cdot 8 + 0,9^2}}{0,9} = 51,648 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot F^{-1}$$

$$\delta_{ac} = \delta_{ca} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 8 \cdot 8 + 1,8^2}}{1,8} = 39,300 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot F^{-1}$$

$$\delta_{bc} = \delta_{cb} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 8 \cdot 8 + 0,9^2}}{0,9} = 51,648 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot F^{-1}$$

$$\delta_{aa} = \delta_{bb} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{2 \cdot 8}{6,555 \cdot 10^{-3}} = 139,906 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot F^{-1}$$

Vyjádření matice potenciálových součinitelů  $\delta$  a kapacitních součinitelů  $k$ :

$$\bar{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} \\ \delta_{ba} & \delta_{bb} & \delta_{bc} \\ \delta_{ca} & \delta_{cb} & \delta_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 139,906 & 51,648 & 39,300 \\ 51,648 & 139,906 & 51,648 \\ 39,300 & 51,648 & 139,906 \end{bmatrix} \cdot 10^6 km \cdot F^{-1}$$

$$\bar{k} = \bar{\delta}^{-1} = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,514 & -2,617 & -1,426 \\ -2,617 & 9,080 & -2,617 \\ -1,426 & -2,617 & 8,514 \end{bmatrix} \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

Výpočet dílčích kapacit  $c$  podle vztahů (3.1 – 6):

$$c_{ab} = c_{ba} = 2,617 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

$$c_{ac} = c_{ca} = 1,426 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

$$c_{bc} = c_{cb} = 2,617 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

$$c_{a0} = 8,514 - 2,617 - 1,426 = 4,472 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

$$c_{b0} = 9,080 - 2,617 - 2,617 = 3,846 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

$$c_{c0} = 8,514 - 1,426 - 2,617 = 4,472 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

Dle vztahu (2.4 – 8) mohu dopočítat velikosti kapacitních proudů jednotlivých fází.

$$\bar{I}_{kap-a0} = \bar{I}_{kap-c0} = 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 4,472 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 0,0535 A$$

$$\bar{I}_{kap-b0} = 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 3,846 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 0,046 A$$

Normou udávaný kapacitní proud pro venkovní vedení 22 kV je 63 mA, což mnou zvolené uspořádání splňuje.

Ze zemních kapacit jednotlivých fází vypočtu jejich střední hodnotu. Porovnáním střední hodnoty s kapacitami jednotlivých fází dostanu maximální odchylku kapacit pro rovinné uspořádání.

$$c_0 = \frac{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}}{3} = \frac{4,472 + 3,846 + 4,472}{3} \cdot 10^{-9} = 4,263 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

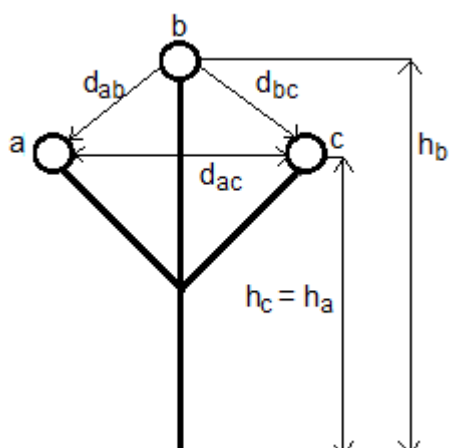
$$\Delta c_0 = (4,263 - 3,846) \cdot 10^{-9} = 0,417 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

Pro vyjádření kapacitní nesymetrie v procentech budu jako 100% uvažovat střední hodnotu kapacity.

$$\Delta c_0 = \frac{0,417 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{4,263 \cdot 10^{-9}} = 9,784\%$$



## 3.1.2 Výpočet zemních kapacit pro uspořádání do trojúhelníku – „pařát“



Jmenovitý průřez:	$S = 120 \text{ mm}^2$
Matematický průměr vodiče:	$d = 13,11 \text{ mm}$ ( $r = 6,555 \text{ mm}$ )
Vzdálenosti vodičů:	$d_{ab} = 1,526 \text{ m}$ $d_{bc} = 1,526 \text{ m}$ $d_{ac} = 1,6 \text{ m}$
Výška vodičů nad zemí:	$h_a = h_c = 8 \text{ m}$ $h_b = 9,3 \text{ m}$

Obr 3.1.2 – 1 Uspořádání do trojúhelníku

Výpočet potenciálových součinitelů podle vzorců (3.1 – 4) a (3.1 – 5).

$$\delta_{ab} = \delta_{ba} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 8 \cdot 9,3 + 1,526^2}}{1,526} = 43,57 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{F}^{-1}$$

$$\delta_{ac} = \delta_{ca} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 8 \cdot 8 + 1,6^2}}{1,6} = 41,389 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{F}^{-1}$$

$$\delta_{bc} = \delta_{cb} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{\sqrt{4 \cdot 9,3 \cdot 8 + 1,526^2}}{1,526} = 43,57 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{F}^{-1}$$

$$\delta_{aa} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{2 \cdot 8}{6,555 \cdot 10^{-3}} = 139,906 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{F}^{-1}$$

$$\delta_{bb} = \frac{1}{0,0242 \cdot 1} \log \frac{2 \cdot 9,3}{6,555 \cdot 10^{-3}} = 142,606 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{F}^{-1}$$

Vyjádření matice potenciálových součinitelů  $\delta$  a kapacitních součinitelů  $k$ :

$$\underline{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} \\ \delta_{ba} & \delta_{bb} & \delta_{bc} \\ \delta_{ca} & \delta_{cb} & \delta_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 139,906 & 43,570 & 41,389 \\ 43,570 & 142,606 & 43,570 \\ 41,389 & 43,570 & 139,906 \end{bmatrix} \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{F}^{-1}$$

$$\underline{k} = \underline{\delta}^{-1} = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,308 & -1,975 & -1,843 \\ -1,975 & 8,219 & -1,975 \\ -1,843 & -1,975 & 8,308 \end{bmatrix} \cdot 10^{-9} \text{ F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Výpočet dílčích kapacit  $c$  podle vztahů (3.1 – 6):

$$c_{ab} = c_{ba} = 1,975 \cdot 10^{-9} \text{ F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$c_{ac} = c_{ca} = 1,843 \cdot 10^{-9} \text{ F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$c_{bc} = c_{cb} = 1,975 \cdot 10^{-9} \text{ F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$c_{a0} = 8,308 - 1,975 - 1,843 = 4,49 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

$$c_{b0} = 8,219 - 1,975 - 1,975 = 4,269 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

$$c_{c0} = 9,267 - 1,843 - 1,975 = 4,49 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

Dle vztahu (2.4 – 8) mohu stejně jako v rovinném uspořádání dopočítat velikosti kapacitních proudů jednotlivých fází.

$$\bar{I}_{kap-a0} = \bar{I}_{kap-c0} = 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 4,49 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 0,0538A$$

$$\bar{I}_{kap-b0} = 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 4,269 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 0,0511A$$

Ze zemních kapacit jednotlivých fází opět vypočtu jejich střední hodnotu. Porovnáním střední hodnoty s kapacitami jednotlivých fází dostanu maximální odchylku kapacit pro uspořádání do trojúhelníku.

$$c_0 = \frac{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}}{3} = \frac{4,49 + 4,269 + 4,49}{3} \cdot 10^{-9} = 4,416 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

$$\Delta c_0 = (4,416 - 4,269) \cdot 10^{-9} = 0,148 \cdot 10^{-9} F \cdot km^{-1}$$

Pro vyjádření kapacitní nesymetrie v procentech budu jako 100% uvažovat střední hodnotu kapacity.

$$\Delta c_0 = \frac{0,148 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{4,416 \cdot 10^{-9}} = 3,341\%$$

### 3.1.3 Vliv uspořádání vodičů venkovního vedení na kapacitní nesymetrii

Pro názorné porovnání velikostí zemních kapacit mezi sebou převedu dílčí kapacity na procenta. Nejprve porovnam rozdíly zemních kapacit jednotlivých fází v daném uspořádání, kdy  $c_{a0}$  zvolím jako 100 % a poté porovnam velikosti kapacit obou uspořádání mezi sebou, kde za 100 % budu považovat  $c_{a0}$  uspořádání do trojúhelníku.

Tab. 3.1.3 – 1 Porovnání zemních kapacit jednotlivých fází

	rovinné uspořádání (%)	uspořádání do trojúhelníku (%)
c_a0	100	100
c_b0	86,009	95,071
c_c0	100	100

Z tabulky 3.1.3 – 1 je vidět, že kapacita prostředního vodiče je nižší než kapacita vodičů krajních. V rovinném uspořádání činí tento rozdíl téměř 14 % oproti kapacitám vodičů

krajních. V případě uspořádání do trojúhelníku činí tento rozdíl necelých 5 %, proto je toto uspořádání z hlediska nesymetrie kapacit výhodnější.

Pro výpočet zemních kapacit jsem vytvořila program v MS Excel, pomocí kterého jsem hledala uspořádání vodičů s nejmenší kapacitní nesymetrií. Pro uspořádání vodičů do rovnostranného trojúhelníku vyšly rozdíly kapacit mírně vyšší než ve vypočteném příkladu trojúhelníkového uspořádání. Nejnižší rozdíly mezi kapacitami jednotlivých fází (při stejné rozteči stožáru jako v modelovém příkladu) mi vyšly pro uspořádání do rovnoramenného trojúhelníku s rozměry:

Vzdálenosti vodičů:  $d_{ab} = 2,294 \text{ m}$   
 $d_{bc} = 2,294 \text{ m}$   
 $d_{ac} = 1,6 \text{ m}$

Výška vodičů nad zemí:  $h_a = h_c = 8 \text{ m}$   
 $h_b = 10,15 \text{ m}$

Rozdíl zemní kapacity prostředního vodiče zde vyšel  $0,003 \% c_{a0}$ .

Pro rovinné uspořádání platí, že čím větší je vzdálenost mezi jednotlivými fázemi, tím je kapacitní nesymetrie nižší. Pro rozpětí stožáru 5 m je rozdíl kapacity prostředního vodiče o 3 % nižší než v modelovém příkladu. S větším rozpětím však stoupají i náklady na výstavbu vedení a proto se takto široké stožáry v praxi neuplatňují.

Tab. 3.1.3 – 2 Porovnání zemních kapacit jednotlivých fází

	rovinné uspořádání (%)	uspořádání do trojúhelníka (%)
c_a0	99,599	100
c_b0	85,657	95,071
c_c0	99,599	100

Porovnání kapacit obou uspořádání, kde krajní vodiče jsou ve stejné výšce nad zemí, ukázalo, že rovinné uspořádání má nižší zemní kapacity krajních vodičů, než uspořádání do trojúhelníku.

Z výpočtů pro kapacity vedení je patrné, že velikosti zemních kapacit jsou závislé na výšce vodiče nad zemí. V předchozích výpočtech jsem výšku považovala za konstantní, ale vlivem členitosti terénu se tato hodnota mění. Velikost kapacitní nesymetrie se s nižší výškou nad zemí snižuje. S ohledem na ekonomičnost se v praxi stavějí stožáry s výškou do 10 m nad zemí.

### 3.2 Výpočet kapacitní nesymetrie kabelového vedení

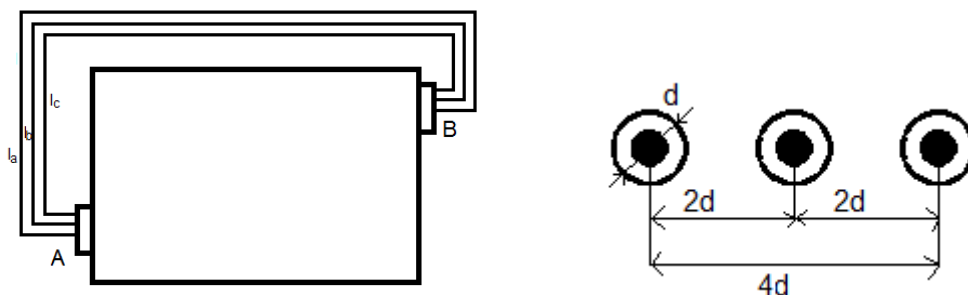
Jednožilový kabel má jedinou kapacitu – kapacitu vodiče proti plášti, která je zároveň kapacitou provozní. Pro výpočet kapacity kabelu platí obdobný vztah jako pro venkovní vedení.

$$C = c_{k0} = \frac{0,0242 \cdot \varepsilon_r}{\log \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.2 - 1)$$

Kde:  $r_1$  – poloměr vodiče,  
 $r_2$  – vnitřní poloměr kovové obálky,  
 $\varepsilon_r$  – poměrná permitivita izolantu.

Jelikož se poměrná permitivita izolantu určuje velice obtížně (složitě prostředí), určuje se hodnota poměrné kapacity měřením při teplotě 22°C a její hodnota je udávána v katalogu výrobce.

U venkovních vedení byla nesymetrie dána konstrukcí stožáru, která určovala, jak se budou vodiče navzájem ovlivňovat. Stínění kabelu zajišťuje, že se vodiče neovlivňují a tudíž nebudou počítat kapacitní nesymetrii z hlediska různých vzdáleností od ostatních vodičů. Z hlediska kapacit jsou kabely v podstatě souměrné. To však platí jen při stejné délce fázových vodičů. Kapacita kabelu je závislá na délce, a proto bude kapacitní nesymetrie vznikat při ukládání vodičů, kdy bude rozdílná délka jednotlivých fází. Praktický příklad uložení tří jednožilových kabelů vedle sebe z místa A do místa B je na obrázku 3.2 – 1. Pro výpočet kapacity kabelového vedení budu uvažovat jednožilový kabel 22 – AXEKVCEY 1x240. Pro mnou vybraný kabel jsem našla hodnotu měrné kapacity 0,3  $\mu\text{F}/\text{km}$  (viz příloha č. 3).



Obr 3.2 – 1 Příklad uložení vodičů vedle sebe

Uvažovaný kabel o obsahu 240 mm<sup>2</sup> má průměr  $d = 39$  mm a délka vnějšího vodiče je 100 metrů. Z obrázku 3.2 – 1 vypočtu délku zbylých dvou fází  $l_b$  a  $l_c$ .

$$l_b = l_a - 8 \cdot 2d = 100 - 8 \cdot 2 \cdot 0,039 = 99,376\text{m}$$

$$l_c = l_a - 8 \cdot 4d = 98,752m$$

Kapacitu jednotlivých fází určím z měrné kapacity a délky příslušného kabelu.

$$C_{a0} = l_a \cdot c = 0,1 \cdot 0,3 = 0,03 \cdot 10^{-6}F$$

$$C_{b0} = 0,099376 \cdot 0,3 = 0,02981 \cdot 10^{-6}F$$

$$C_{c0} = 0,098752 \cdot 0,3 = 0,02963 \cdot 10^{-6}F$$

Hodnoty kapacitních proudů pro kabelové vedení opět spočtu dle vztahu (2.4 – 8).

$$\bar{I}_{kap-a0} = 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 0,03 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 0,359 A$$

$$\bar{I}_{kap-b0} = 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 0,02981 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 0,357 A$$

$$\bar{I}_{kap-c0} = 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 0,02963 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 0,355 A$$

Střední hodnotu kapacity a maximální odchylku určím obdobně jako pro venkovní vedení.

$$c_0 = \frac{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}}{3} = \frac{0,03 + 0,02981 + 0,02963}{3} \cdot 10^{-6} = 0,02981 \cdot 10^{-6}F \cdot km^{-1}$$

$$\Delta c_0 = (0,03 - 0,02981) \cdot 10^{-6} = 0,187 \cdot 10^{-9}F \cdot km^{-1}$$

$$\Delta c_0 = \frac{0,187 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{0,02981 \cdot 10^{-9}} = 0,628\%$$

Pro názornost jsem dále spočítala zemní kapacity pro stejné uložení vodičů o délkách  $l_a$  25 m, 50 m a 200 m.

Tab 3.2 – 1 Procentní porovnání kapacit jednotlivých fází pro délku vodiče  $l_a$  25 m, 50 m, 100 m a 200 m.

	Délka 25m (%)	Délka 50m (%)	Délka 100m (%)	Délka 200m (%)
c_a0	100	100	100	100
c_b0	97,504	98,752	99,376	99,688
c_c0	95,008	97,504	98,752	99,376

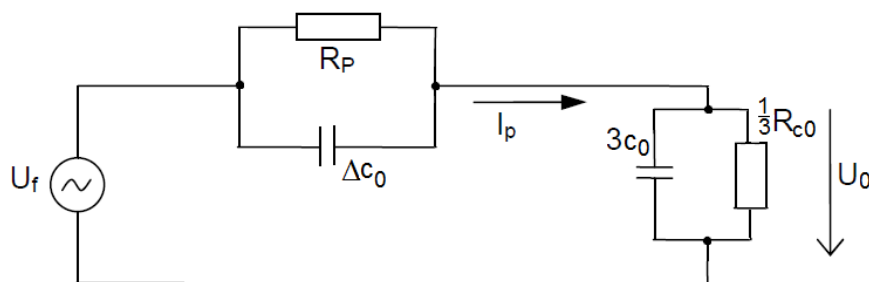
Z tabulky 3.2 – 1 je vidět, jak malé rozdíly v délkách kabelů způsobí rozdílné kapacity jednotlivých fází. Proto by se při pokládce kabelů mělo dbát na to, aby rozdíly v délkách jednotlivých fází byly co nejmenší.

## 4 Vliv nesymetrie na aktivní přenosové parametry

Pro znázornění vlivu nesymetrie na aktivní přenosové parametry uvedu několik reprezentativních příkladů. Pro všechny modelované situace budu uvažovat síť o napětí 22 kV a kapacitním proudem 100 A. Pro výpočty opět použiji program Microsoft Excel a vytvořím v něm program na výpočet napětí a proudu pro jednotlivé soustavy.

### 4.1 Izolovaná soustava

K výpočtu zemního spojení v izolované soustavě využiji metodu souměrných složek uvedenou ve druhé kapitole této práce. Jelikož jsem v předešlých teoretických výpočtech uvažovala symetrickou síť, musím předchozí obecné schéma 2.6 – 2 doplnit o prvek respektující nesymetrii vznikající rozdílnými zemními kapacitami jednotlivých fází. Impedance uzlu  $Z_N$  je v případě izolované soustavy blízká nekonečnu, proto z tohoto náhradního schématu vypadne. Výsledné náhradní schéma je na obrázku 4.1 – 1.



Obr 4.1 – 1 Náhradní schéma izolované soustavy

Pro admitance  $Y_1$  a  $Y_2$  platí z náhradního schématu obdobné vztahy jako v kapitole 2.6.

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{-j\Delta X_{c0}}, \quad \text{kde: } -j\Delta X_{c0} = \frac{1}{j\omega\Delta c_0} \quad (4.1 - 1)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}}, \quad \text{kde: } -jX_{c0} = \frac{1}{3j\omega c_0} \quad (4.1 - 2)$$

Pro poruchový proud a napětí platí:

$$\bar{U}_0 = \frac{\bar{Y}_1}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2} \cdot \bar{U}_f \quad (4.1 - 3)$$

$$\bar{I}_p = \bar{Y}_2 \cdot \bar{U}_0 \quad (4.1 - 4)$$

Pro kontrolu správnosti výpočtu budu nejprve uvažovat rezistanci poruchy  $R_p$  blízkou nekonečnu, to znamená bezporuchový stav. Pokud bych zároveň uvažovala nulovou kapacitní nesymetrii  $\Delta c_0$ , byl by obvod rozpojen a výše vyjádřené vztahy by přešly ve vztahy pro ideální bezporuchový stav uvedené v úvodu práce. Napětí nulového bodu transformátoru

by bylo nulové. Jelikož kapacitní nesymetrii vedení musím uvažovat, napětí  $U_0$  nebude nulové a bude dosahovat hodnot do jednoho procenta  $U_f$ .

Naopak pro rezistanci  $R_p$  rovné nule se jedná o dokonalé zemní spojení. Stanovím-li svodovou rezistanci  $R_{c0}$  mnohokrát vyšší než kapacitní reaktanci  $X_{c0}$ , poruchový proud  $I_p$

$$\text{bude dán opět vztahem: } \bar{I}_p = \frac{\bar{U}_0}{-jX_{c0}} = 3j\omega c_0 \bar{U}_0$$

Pro napětí jednotlivých fází platí podle vztahů 2.6 – 7 až 2.6 – 9:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_{fa} - \bar{U}_0 = \bar{U}_f - \frac{\bar{Y}_1}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2} \cdot \bar{U}_f \quad (4.1 - 5)$$

$$\bar{U}_b = \bar{U}_{fb} - \bar{U}_0 = \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_f - \frac{\bar{Y}_1}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2} \cdot \bar{U}_f \quad (4.1 - 6)$$

$$\bar{U}_c = \bar{U}_{fc} - \bar{U}_0 = \bar{a} \cdot \bar{U}_f - \frac{\bar{Y}_1}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2} \cdot \bar{U}_f \quad (4.1 - 7)$$

#### 4.1.1 Namodelovaný příklad pro izolovanou soustavu

V modelovém příkladu budu vycházet ze schématu 4.1 – 1 a z něho vyplývajících vztahů 4.1 – 1 až 4.1 – 7. Výpočet bude proveden pro venkovní vedení uspořádané do trojúhelníku, které je uvažováno v předchozí kapitole. Zadané hodnoty jsou:

- napětí sítě  $U = 22 \text{ kV}$ ,
- frekvence sítě  $f = 50 \text{ Hz}$ ,
- kapacitní proud  $\bar{I}_{kap} = 100 \text{ A}$ ,
- kapacitní nesymetrie  $\Delta c_0 = 3,3 \%$ ,
- svodová rezistance  $R_{c0} = 0,5 \%$ ,
- rezistance poruchy  $R_p = 300 \Omega$ .

Z těchto hodnot mohu podle vztahu 2.4 – 7 vypočítat kapacitu celé sítě  $c_0$ .

$$c_0 = \frac{\bar{I}_{kap}}{3\omega\bar{U}_f} = \frac{100}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 22000/\sqrt{3}} = 8,353 \mu F$$

Z celkové kapacity vypočtu kapacitní susceptanci  $X_{c0}$ .

$$X_{c0} = \frac{1}{3\omega c_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8,353 \cdot 10^{-6}} = 127,017 \Omega$$

Kapacitní nesymetrii určím jako procentní část celkové kapacity sítě  $C_0$  a svodovou rezistanci  $R_{c0}$  jako procentní část kapacitní reaktance  $X_{c0}$ .

$$\Delta c_0 = 3,3 \cdot (8,353 \cdot 10^{-6} / 100) = 0,276 \mu F$$

$$\frac{1}{3}R_{c0} = 127,017 \cdot (100/0,5) = 25403,412 \Omega$$

Admittance obvodu vypočtu podle vztahu 4.1 – 1 a 4.1 – 2:

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{300} + \frac{1}{-j \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,276 \cdot 10^{-6}}} = 0,0333 + j0,000866 \Omega$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{1}{25403,412} + \frac{1}{-j127,017} = 0,0000394 + j0,00787 \Omega$$

Podle vztahů 4.1 – 3 a 4.1 – 4 vypočtu napětí nulového bodu a hodnotu poruchového proudu.

$$\begin{aligned} \bar{U}_0 &= \frac{0,0333 + j0,000866}{0,0333 + j0,000866 + 0,0000394 + j0,00787} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 2028,006 - j4459,941 \\ &= 4899,375 \cdot e^{-j65,5} V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_p &= (0,0000394 + j0,00787) \cdot (2028,006 - j4459,941) = 35,193 + j15,791 \\ &= 38,573 \cdot e^{j24,166} A \end{aligned}$$

Pro výpočet napětí jednotlivých fází použijí vztahy 4.1 – 5 až 4.1 – 7.

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= \frac{22000}{\sqrt{3}} - (2028,006 - j4459,941) = 10673,700 + j4459,941 \\ &= 11568,014 \cdot e^{j22,7} V \end{aligned}$$

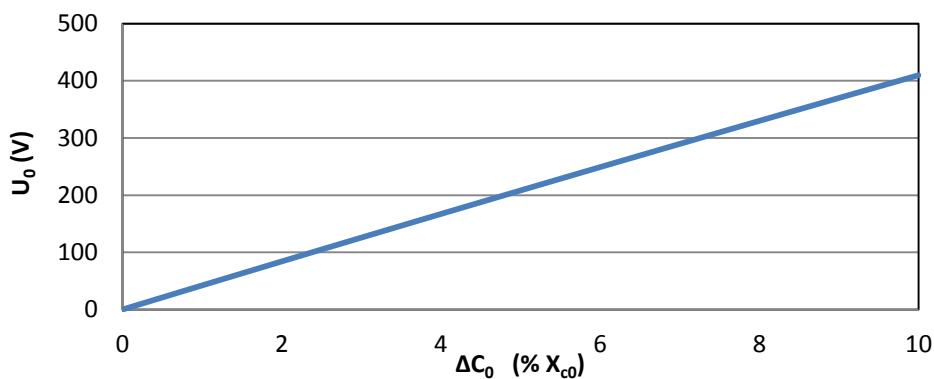
$$\begin{aligned} \bar{U}_b &= \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} - (2028,006 - j4459,941) = -8378,859 - j6540,059 \\ &= 10629 \cdot e^{-j142} V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_c &= \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} - (2028,006 - j4459,941) = -8378,859 + j15459,941 \\ &= 17584,511 \cdot e^{j118,5} V \end{aligned}$$

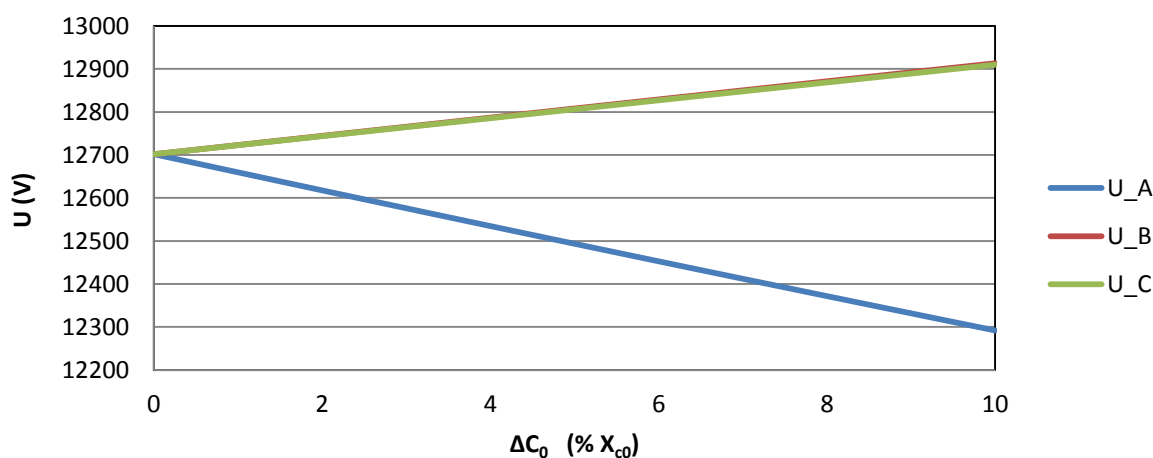
Namodelovaný příklad a závislost napětí a proudů na parametrech sítě jsem pomocí programu Microsoft Excel graficky znázornila v následujících grafech.

V prvních třech grafech je znázorněna závislost napětí nulového bodu a fázových napětí na velikosti kapacitní nesymetrie v bezporuchovém stavu a při zemním spojení s rezistivitou poruchy  $R_p=300 \Omega$ .

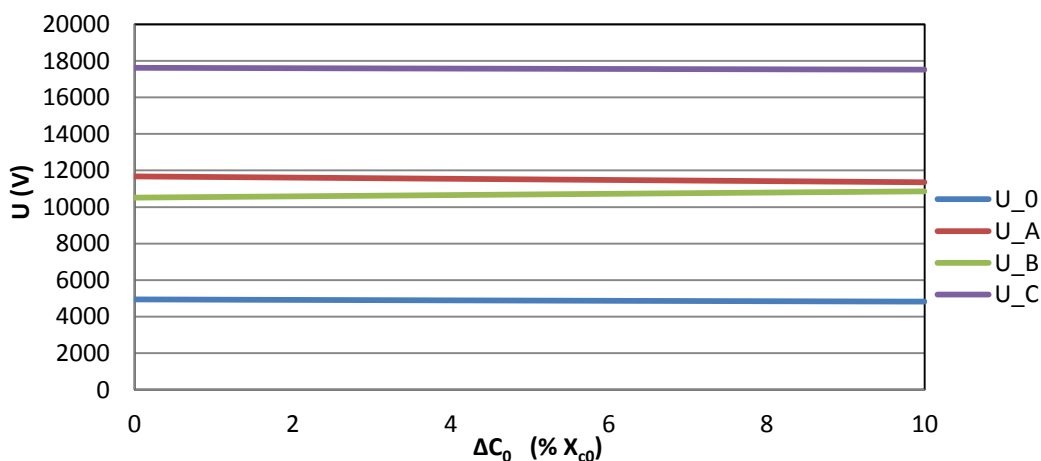




Obr 4.1.1 – 1 Závislost napětí nulového bodu na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu



Obr 4.1.1 – 2 Závislost fázových napětí na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu

Obr 4.1.1 – 3 Závislost napětí na kapacitní nesymetrii v poruchovém stavu ( $R_p=300 \Omega$ )

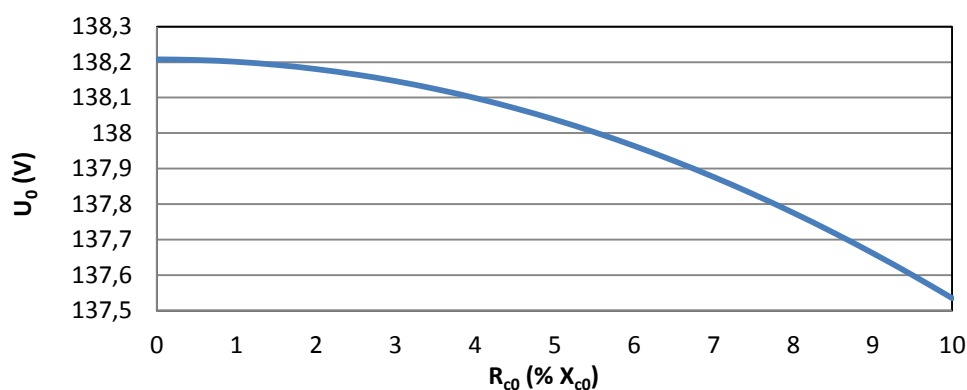
Prvním grafem jsem potvrdila teoretické úvahy z kapitoly 2.1 o vlivu rozdílných kapacit jednotlivých fází na velikost napětí nulového bodu. V případě symetrické sítě ( $\Delta C_0 = 0$ ) je napětí nulové a se zvyšující se nesymetrií napětí nulového bodu roste. Jelikož kabely jsou v podstatě souměrné a vzájemně odstíněné, bude se toto napětí v bezporuchovém stavu blížit k nule. Pro mnou uvažované venkovní vedení uspořádané do trojúhelníku bude napětí  $U_0$

přibližně  $1\% U_f$ . Pro vedení uspořádané do roviny bude hodnota  $U_0$  přes  $3\% U_f$ .

Ve druhém grafu je vidět vliv rostoucího napětí nulového bodu při zvyšující se nesymetrii na fázové vodiče v bezporuchovém stavu. Napětí ve fázi A se snižuje, zatímco napětí fáze B a C jsou téměř totožné rostoucí funkce.

Ve třetím grafu je uvažované zemní spojení (s rezistivitou poruchy  $R_p = 300 \Omega$ ) a ukazuje, že kapacitní nesymetrie nemá na nulové napětí (resp. fázová napětí) téměř žádný vliv. Napětí  $U_0$ ,  $U_a$  a  $U_c$  se se zvyšující se kapacitní nesymetrií mírně snižují, naopak napětí  $U_b$  se se zvyšující nesymetrií zvyšuje. V případě poruchy tudíž bude z hlediska velikosti napětí mezi různými uspořádáními malý rozdíl.

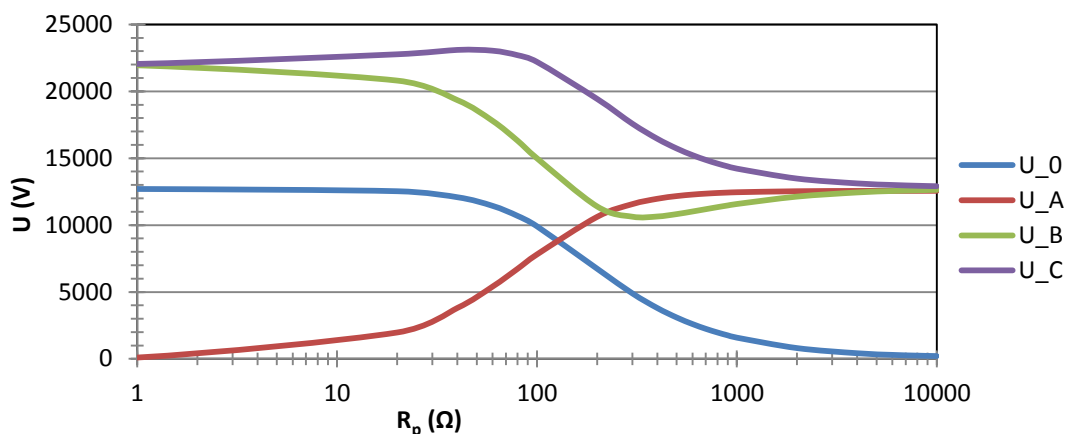
Na dalším grafu bude vidět velikost napětí nulového bodu v závislosti na svodové rezistanci sítě.



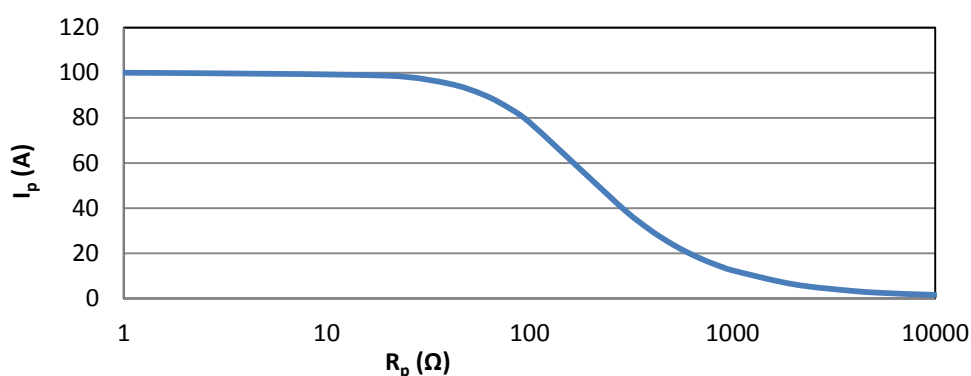
Obr. 4.1.1 – 4 Závislost napětí nulového bodu na svodové rezistanci sítě v bezporuchovém stavu

Z grafu je patrné, že napětí nulového bodu klesá se zvyšující se konduktancí sítě. V případě, že rezistance příčné cesty je několikanásobně vyšší než kapacitní susceptance, je možné svodovou rezistanci zanedbat a admitance  $Y_2$  je dána pouze příčnými kapacitami. Pro venkovní vedení se velikost svodové rezistence pohybuje okolo  $0,5\% X_c$ . Pro kabelové vedení se tato hodnota liší dle použité izolace. U starších kabelů dosahuje svodová rezistence až  $5\% X_c$ , pro novější kabely je tato hodnota nižší (cca  $2\%$  i méně).

V posledních dvou grafech je znázorněna závislost napětí a poruchového proudu na rezistanci poruchy.



Obr 4.1.1 – 5 Závislost napětí na rezistanci poruchy



Obr 4.1.1 – 6 Závislost proudu na rezistanci poruchy

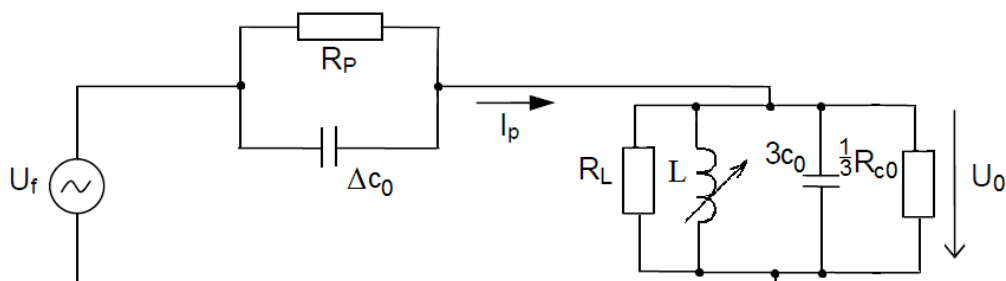
Z grafů je vidět, jak rezistance poruchy ovlivňuje velikost napětí a poruchového proudu. V případě kovové poruchy ( $R_p = 0 \Omega$ ) má napětí nulového bodu hodnotu 12,7 kV, což odpovídá hodnotě fázového napětí. Napětí postižené fáze A se rovná nule a zdravé fáze B a C mají hodnotu 22 kV, což odpovídá hodnotě sdruženého napětí. Poruchový proud má maximální možnou hodnotu, která je daná rozlohou sítě a je rovna kapacitnímu proudu sítě.

Pokud budu uvažovat vysoce ohmovou poruchu ( $R_p \sim 10000 \Omega$ ), napětí nulového bodu se blíží k nule (jeho velikost bude dána kapacitní nesymetrií) a napětí všech fází má hodnotu fázového napětí. Poruchový proud se blíží k nule. To odpovídá bezporuchovému stavu. Tím jsem potvrdila teoretické úvahy z druhé kapitoly této práce.

Norma ČSN 33 3070 udává jako mez pro detekci zemního spojení překročení 33 %  $U_f$ , tomu v síti 22 kV odpovídá zhruba hodnota 4,23 kV. Z grafu 4.1.1 – 5 lze odečíst pro tuto hodnotu napětí rezistanci poruchy 400 Ω. V praxi bývá tato hodnota pro vyhodnocení zemního spojení nižší (v rozmezí 20 % – 25 %  $U_f$ ).

## 4.2 Soustava uzemněná přes zhášecí tlumivku

Pro výpočet zemního spojení v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku vytvořím obdobné schéma, jako pro síť izolovanou. Impedanci nulového bodu zde bude tvořit indukčnost  $L$  (pro síť 22 kV bývá velikost kompenzačních tlumivek 0,14 H – 3,6 H) a rezistance  $R_L$ .



Obr 4.2 – 1 Náhradní schéma soustavy uzemněné přes tlumivku

Admittance obvodu určím obdobně jako v izolované soustavě.

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{-j\Delta X_{c0}}, \quad \text{kde: } -j\Delta X_{c0} = \frac{1}{j\omega\Delta c_0} \quad (4.2 - 1)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{jX_L} + \frac{1}{R_L}, \quad \text{kde: } -jX_{c0} = \frac{1}{3j\omega c_0} \quad (4.2 - 2)$$

$$jX_L = j\omega L$$

Pro poruchový proud, napětí nulového bodu a napětí jednotlivých fází pak platí vztahy 4.1 – 3 až 4.1 - 7 pro izolovanou soustavu.

Pro porovnávání kompenzovaných sítí se využívá činitel útlumu sítě  $\alpha$  a činitel nesymetrie  $\varepsilon$ . Tyto činitele udává norma a vypočtou se dle vztahu (4.2 – 3) a (4.2 – 4).

$$\alpha = \frac{I_W}{I_{kap}} \quad \text{kde: } I_W - \text{činný svodový proud,} \quad (4.2 - 3)$$

$I_{kap}$  – kapacitní proud sítě.

$$\varepsilon = \frac{U_{rez}}{U_{Nzt}} \quad \text{kde: } U_{rez} - \text{rezonanční napětí na tlumivce,} \quad (4.2 - 4)$$

$U_{Nzt}$  – jmenovité napětí zhášecí tlumivky.

Dle normy ČSN 33 3070 se v českých podmínkách pohybuje činitel útlumu sítě mezi 3 % až 6 %. Činitel nesymetrie by měl být nižší než 1 %.

### 4.2.1 Namodelovaný příklad pro soustavu uzemněnou přes tlumivku

V modelovém příkladu budu vycházet ze schématu 4.2 – 1 a z něho vyplývajících vztahů pro impedance, proud a napětí. Výpočet bude proveden opět pro venkovní vedení

uspořádané do trojúhelníku se zadanými hodnotami:

- napětí sítě  $U = 22 \text{ kV}$ ,
- frekvence sítě  $f = 50 \text{ Hz}$ ,
- kapacitní proud  $\bar{I}_{kap} = 100 \text{ A}$ ,
- kapacitní nesymetrie  $\Delta c_0 = 3,3 \%$ ,
- svodová rezistence  $R_{c0} = 0,5 \%$ ,
- rezistance tlumivky  $R_L = 1,5 \%$ ,
- rezistance poruchy  $R_p = 300 \Omega$ .

Jelikož je zadání shodné s izolovanou soustavou, platí pro celkovou kapacitu, kapacitní nesymetrii a svodovou rezistanci stejné hodnoty.

$$c_0 = 8,353 \mu\text{F}; X_{c0} = 127,017 \Omega; \Delta c_0 = 0,276 \mu\text{F}; \frac{1}{3} R_{c0} = 25403,412 \Omega$$

Indukčnost tlumivky spočítám z podmínky pro vyladěný stav, kdy:

$$X_L = X_{c0} = 127,017 \Omega.$$

$$L = \frac{X_{c0}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{127,017}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,404 \text{ H}$$

Rezistance zhasací tlumivky je dána procentní částí její indukčnosti.

$$R_L = \frac{127,017 \cdot 100}{1,5} = 8467,804 \Omega$$

Proud protékající tlumivkou vypočtu z impedance tlumivky a fázového napětí.

$$\begin{aligned} \bar{I}_L &= \bar{Z}_L \cdot \bar{U}_f = \frac{R_L \cdot X_L}{R_L + X_L} \cdot \bar{U}_f = \frac{8467,804 \cdot j127,017}{8467,804 + j127,017} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 1,5 - j100 \\ &= 100,01 \cdot e^{-j89,1} \text{ A} \end{aligned}$$

Admittance obvodu vypočtu z náhradního schématu 4.2 – 1 podle vztahu 4.2 – 1 a 4.2 – 2. Jelikož je obvod v rezonanci (tlumivka naladěna), admittance  $\bar{Y}_2$  bude obsahovat jen činnou složku danou rezistancemi  $R_{c0}$  a  $R_L$ .

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{300} + \frac{1}{-j \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,276 \cdot 10^{-6}}} = 0,00333 + j0,0000866 \Omega$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{1}{25403,412} + \frac{1}{-j127,017} + \frac{1}{8467,804} + \frac{1}{j127,017} = 0,000157 \Omega$$

Podle vztahů 4.1 – 3 a 4.1 – 4 vypočtu napětí nulového bodu a hodnotu poruchového

proudu.

$$\begin{aligned}\bar{U}_0 &= \frac{0,0333 + j0,0000866}{0,0333 + j0,0000866 + 0,000157} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 12129,123 + j14,205 \\ &= 12129,131 \cdot e^{j0,1} \text{ V}\end{aligned}$$

$$\bar{I}_p = (0,000157) \cdot (12129,123 + j14,205) = 1,91 + j0,00224 = 1,91 \cdot e^{j0,1} \text{ A}$$

Pro výpočet napětí jednotlivých fází použiji vztahy 4.1 – 5 až 4.1 – 7.

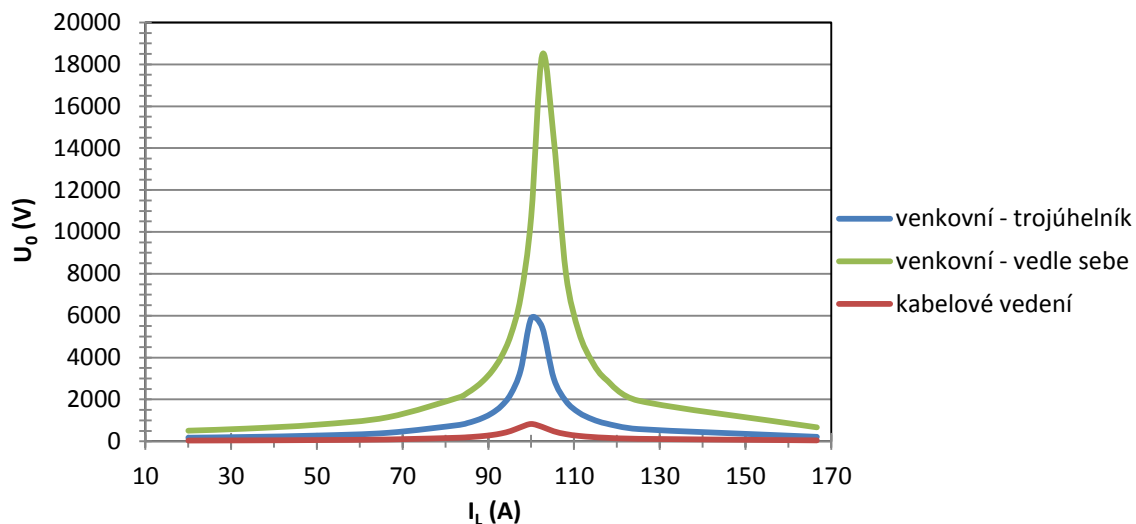
$$\bar{U}_a = \frac{22000}{\sqrt{3}} - (12129,123 + j14,205) = 572,123 - j14,205 = 572,76 \cdot e^{-j1,4} \text{ V}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_b &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} - (12129,123 + j14,205) = -18479,975 - j11014,205 \\ &= 21513,303 \cdot e^{-j149,2} \text{ V}\end{aligned}$$

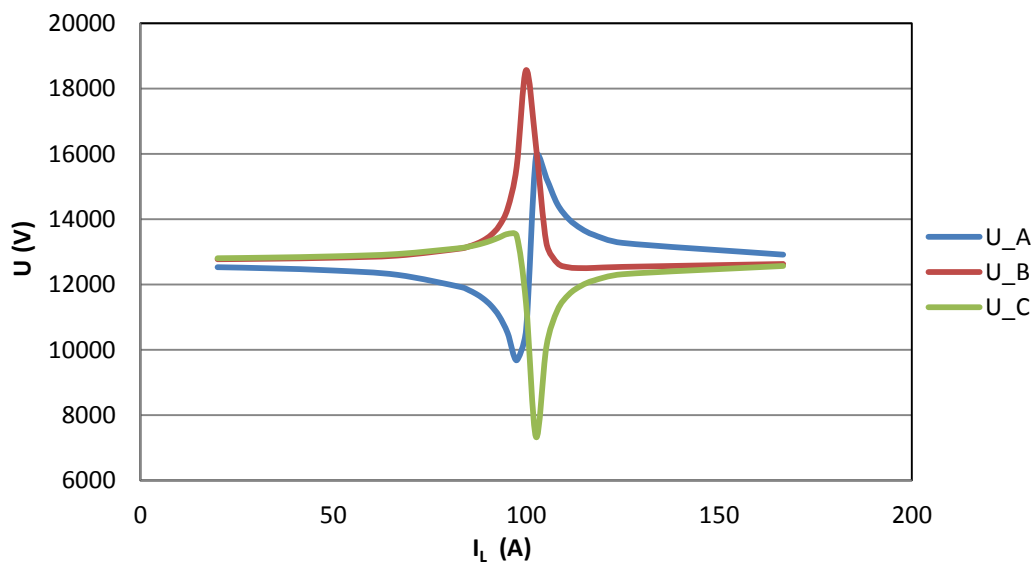
$$\begin{aligned}\bar{U}_c &= \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} - (12129,123 + j14,205) = -18479,975 + j10985,795 \\ &= 21498,771 \cdot e^{j149,3} \text{ V}\end{aligned}$$

Namodelovaný příklad pro kompenzovanou soustavu a závislost napětí a proudů na parametrech sítě jsem opět pomocí programu Microsoft Excel graficky znázornila v následujících grafech. Pro kabelové vedení je uvažována nesymetrie z předešlé části práce ( $\Delta c_0 = 0,6 \%$ ) a svodová rezistance  $R_{c0} = 2 \%$ .

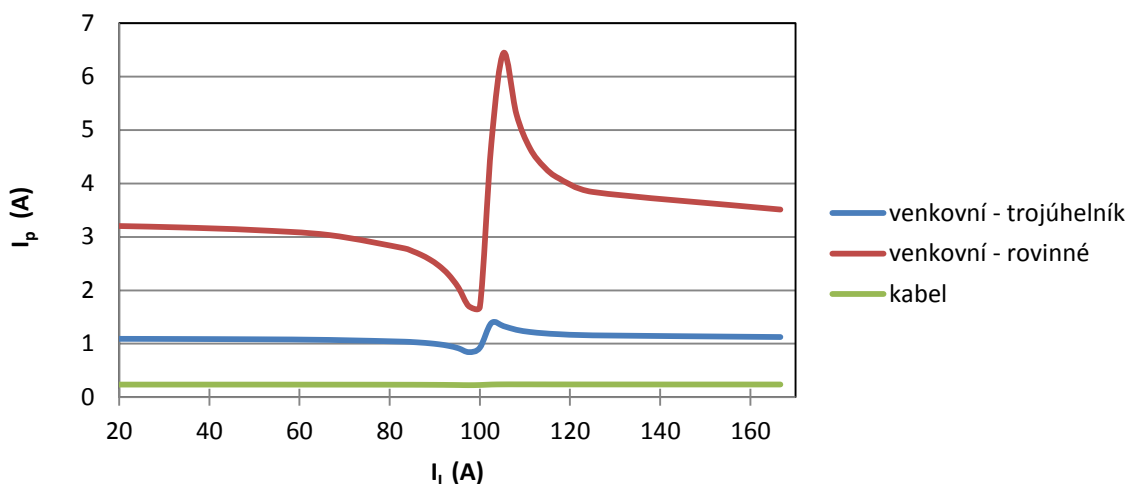
V prvních dvou grafech je znázorněna závislost napětí nulového bodu na proudu tlumivkou pro venkovní a kabelové vedení v bezporuchovém stavu a závislost fázových napětí na vyladění tlumivky. Na třetím grafu je vidět závislost poruchového proudu na vyladění tlumivky.



Obr 4.2.1 – 1 Závislost napětí nulového bodu na vyladění tlumivky v bezporuchovém stavu



Obr 4.2.1 – 2 Závislost fázových napětí na vyladění tlumivky (pro uspořádání do trojúhelníku) v bezporuchovém stavu



Obr 4.2.1 – 3 Závislost poruchového proudu na vyladění tlumivky v bezporuchovém stavu

Při vyladění tlumivky ( $I_L = 100$  A) je kapacita sítě v rezonanci s reaktancí tlumivky a ve jmenovateli zlomku zbyde pouze rezistivita tlumivky a svodová rezistivita sítě (velmi malé). Proto bude napětí nulového bodu nabývat vysoké hodnoty. To způsobí velkou nesymetrii fázových napětí. Vyšší hodnoty fázových napětí namáhají izolaci a tím zvyšují pravděpodobnost poruchy. Proto není možné síť provozovat ve vyladěném stavu a hledají se různé metody, jak tento nežádoucí stav omezit. Z grafu je také vidět, jaký má vliv kapacitní nesymetrie na velikost napětí nulového bodu ve vyladěném stavu. Pro uspořádání vodičů vedle sebe ( $\Delta c_0 = 10$  %) je velikost napětí téměř dvojnásobná oproti uspořádání vedení do trojúhelníku ( $\Delta c_0 = 3,3$  %). Proto se nová vedení stavějí do trojúhelníku (pařát, delta).

Jednou z metod, jak omezit napěťovou špičku používanou v praxi, je provozovat síť rozladěnou. Doporučené přeladění nebo podladění tlumivky dle [6] je takové, aby velikost zbytkového poruchového proudu byla do 10 % kapacitního proudu sítě. Rozladění tlumivky má za následek zvýšení poruchového proudu (znázorněno na obrázku 4.1.2 – 3) a z toho plynoucí vyšší krokové a dotykové napětí. V praxi se dá tento způsob vylepšit o provozování sítě v rozladěném stavu a při detekování poruchy provést rychlé doladění na předem definovanou hodnotu.

Dalším způsobem omezení špičky napětí je například zatlumení pomocí přídavného rezistoru, který je připojen k pomocnému vinutí zhášecí tlumivky. Tím je tlumen rezonanční obvod tvořený tlumivkou a kapacitami sítě. Napětí  $U_0$  ve vyladěném stavu je při zatlumení rezistorem mnohem nižší a nesymetrie fázových napětí je také nižší.

Na třetím grafu je znázorněna velikost poruchového proudu na vyladění tlumivky. Dle normy ČSN 33 3070 by zbytkový proud neměl přesahovat 10 %  $I_{kap}$  a zároveň by neměl být vyšší než 60 A.



Dle vzorců (4.2 – 3) a (4.2 – 4) určím činitele útlumu a činitele nesymetrie pro mnou vybraná vedení. Hodnota činného svodového proudu bude dána velikostí zbytkového poruchového proudu ve vykompenzovaném stavu, který odečtu z grafu 4.1.2 – 3. Jmenovité napětí zhášecí tlumivky je 22 kV a rezonanční napětí vyčtu z grafu 4.1.2 – 1.

$$I_{W-\Delta} = 0,925 \text{ A}; \quad U_{rez-\Delta} = 5873,5 \text{ V.}$$

$$I_{W-r} = 1,687 \text{ A}; \quad U_{rez-r} = 10715,3 \text{ V.}$$

$$I_{W-k} = 0,228 \text{ A}; \quad U_{rez-k} = 828,4 \text{ V.}$$

$$\alpha_{\Delta} = \frac{I_{W-\Delta}}{I_{kap}} = \frac{0,925}{100} = 0,00925$$

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{U_{rez-\Delta}}{U_{NZT}} = \frac{5873,5}{12\,701,7} = 0,462$$

$$\alpha_r = \frac{I_{W-r}}{I_{kap}} = \frac{1,687}{100} = 0,0169$$

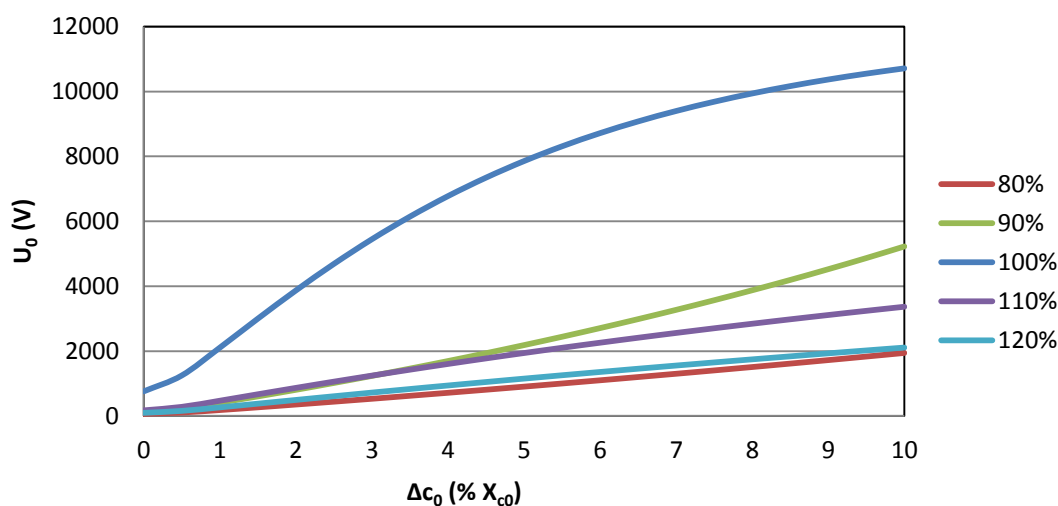
$$\varepsilon_r = \frac{U_{rez-r}}{U_{NZT}} = \frac{10715,3}{12\,701,7} = 0,844$$

$$\alpha_k = \frac{I_{W-k}}{I_{kap}} = \frac{0,228}{100} = 0,00228$$

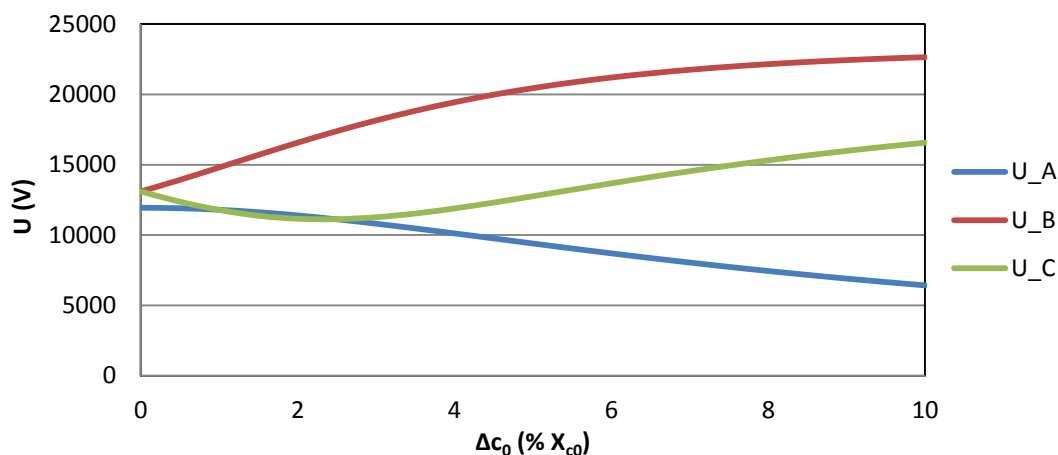
$$\varepsilon_k = \frac{U_{rez-k}}{U_{NZT}} = \frac{828,4}{12\,701,7} = 0,0652$$

Při porovnání vypočtených hodnot s hodnotami z kapitoly 4.2 mi vyšel nižší činitel útlumu sítě a několikanásobně vyšší činitel nesymetrie. Proto není mnou zvolenou sít' možné provozovat ve vyladěném stavu. Již při samotném ladění by napětí na tlumivce vzrostlo nad mez signalizující zemní spojení a ladění by bylo ukončeno.

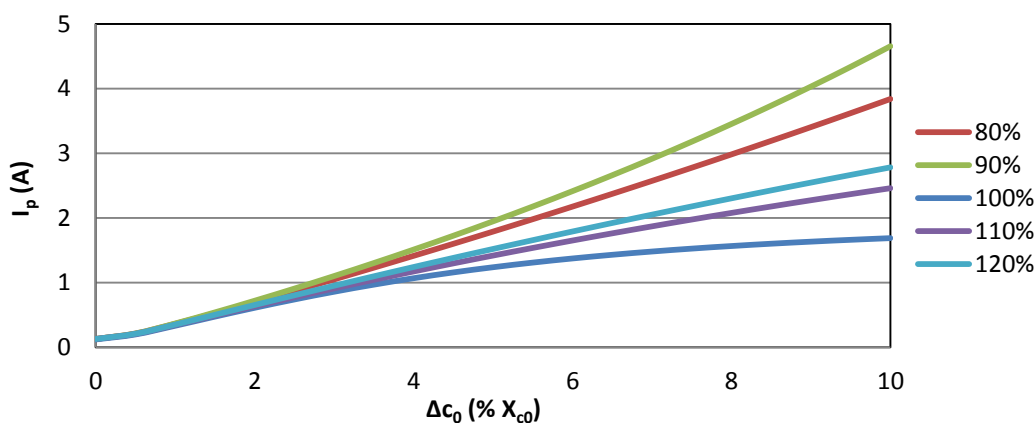
Na následujících obrázcích je znázorněn vliv kapacitní nesymetrie na napětí nulového bodu, fázová napětí a poruchový proud v bezporuchovém stavu pro různě vyladěné tlumivky.



Obr. 4.2.1 – 4 Závíslost napětí nulového bodu na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu



Obr. 4.2.1 – 5 Závislost fázových napětí na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu pro vyladěnou tlumivku

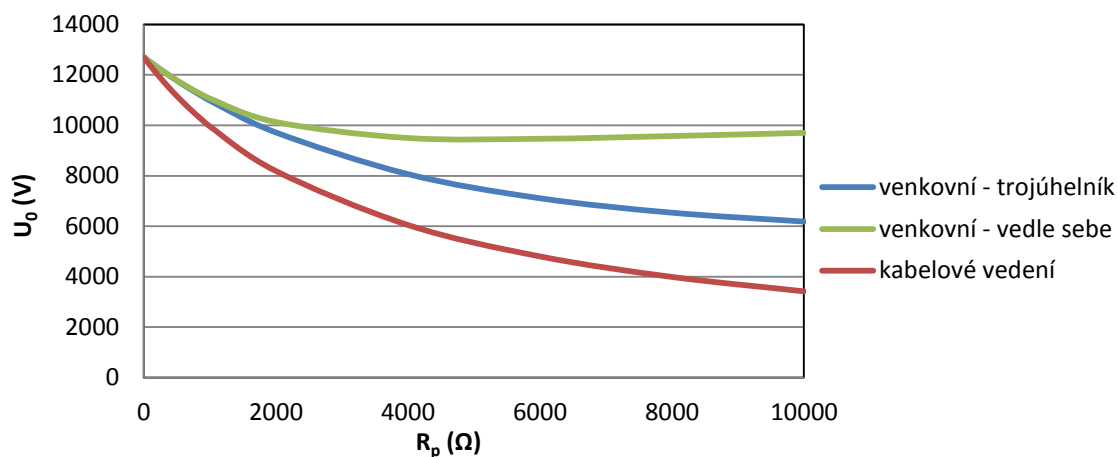


Obr. 4.2.1 – 6 Závislost poruchového proudu na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu

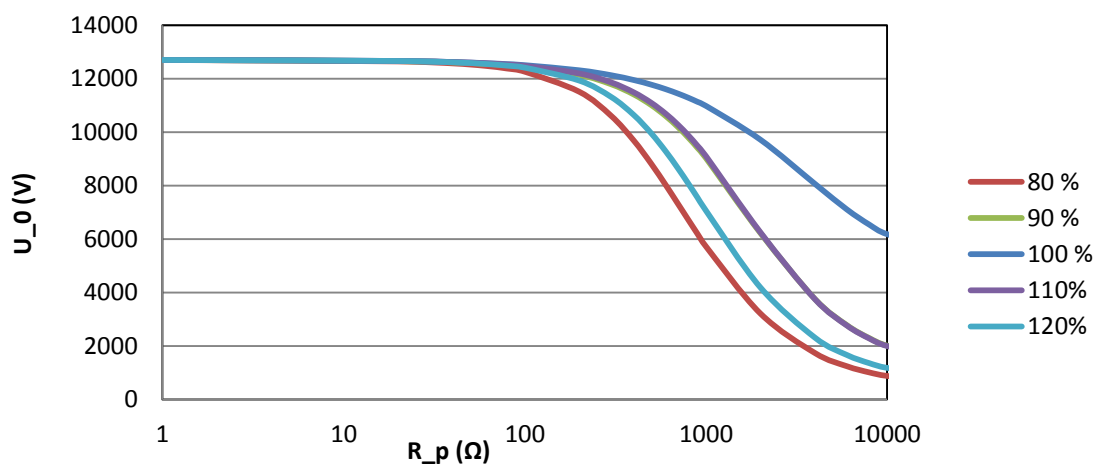
Z prvního grafu je patrné, že s rostoucí nesymetrií se zvyšuje napětí nulového bodu. To způsobuje nesymetrii fázových napětí, zobrazenou na druhém grafu, a zvýšení poruchového proudu, které je znázorněno ve třetím grafu. Kapacitní nesymetrie proto způsobuje problémy při nastavování kompenzačního výkonu tlumivky. Z prvního grafu je vidět, že pro vyladěnou tlumivku je závislost na kapacitní nesymetrii největší.

V případě dokonalého zemního spojení by kapacitní nesymetrie neměla na velikost napětí nulového bodu žádný vliv, a tím ani na velikosti fázových napětí a poruchového proudu.

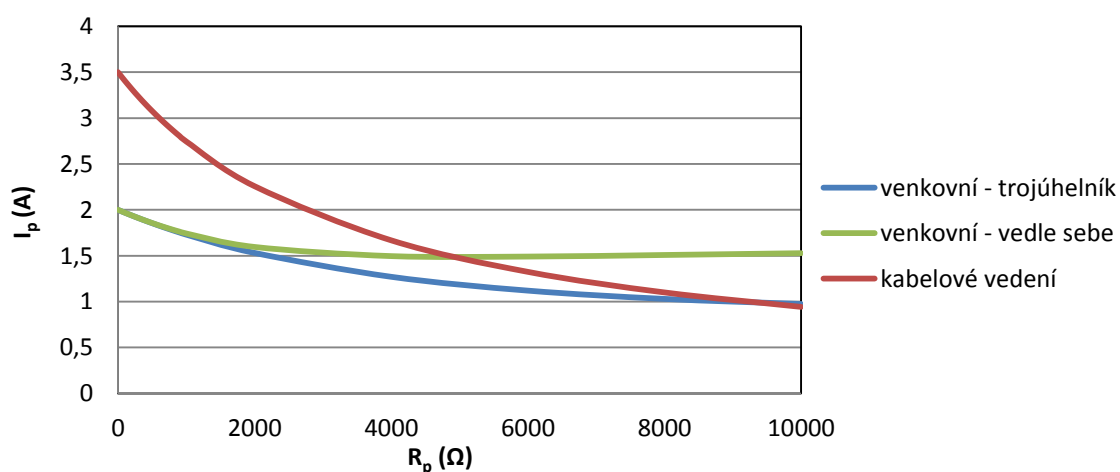
V dalších grafech je vidět závislost napětí a proudů na velikosti rezistence poruchy.



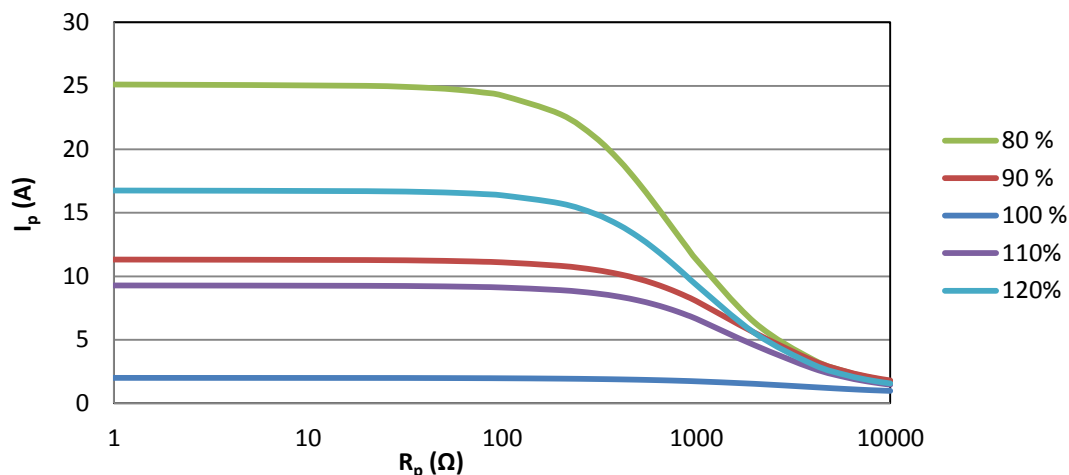
Obr 4.2.1 – 7 Závislost napětí nulového bodu na rezistanci poruchy ve vyladěném stavu



Obr 4.2.1 – 8 Závislost napětí nulového bodu na rezistanci poruchy pro různě vyladěné tlumivky



Obr 4.2.1 – 9 Závislost poruchového proudu na rezistanci poruchy ve vyladěném stavu



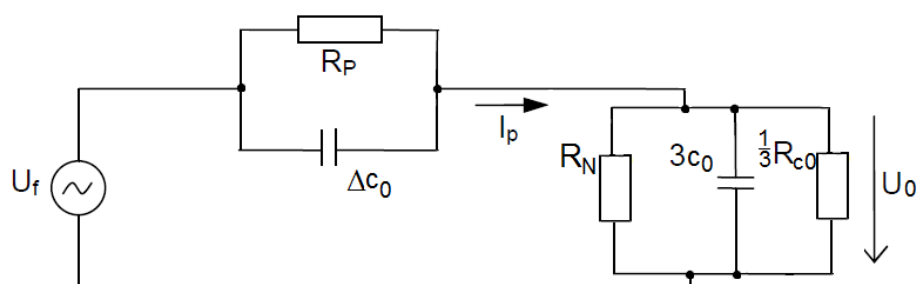
Obr 4.2.1 – 10 Závislost poruchového proudu na rezistanci poruchy pro různé vyladění tlumivky

Z prvních dvou grafů je vidět závislost napětí nulového bodu a poruchového proudu na rezistanci poruchy pro venkovní a kabelové vedení. Pro venkovní vedení je poruchový proud v případě dokonalého zemního spojení nižší než u kabelového vedení. Na dvou grafech je znázorněn vliv vyladění tlumivky na napětí nulového bodu a poruchový proud. V případě vyladěné tlumivky napětí nulového bodu klesá pomaleji než v případě přeladěné či podladěné tlumivky. Pro vyladěnou tlumivku bude poruchový proud nejnižší, a čím více bude tlumivka rozladěná, tím bude poruchový proud vyšší.

Ve vyladěném stavu by bylo napětí vždy vyšší než 33 %  $U_f$ . To znamená, že by bylo zemní spojení signalizováno i v případě bezporuchového stavu. Pro síť podladěnou či přeladěnou o 10 % bude zemní spojení signalizováno při rezistanci poruchy přibližně 4000  $\Omega$ .

### 4.3 Soustava uzemněná přes rezistor

Pro výpočet zemního spojení v síti uzemněné přes rezistor opět vytvořím obdobné schéma, jako pro síť izolovanou a kompenzovanou zhášecí tlumivkou. Impedanci nulového bodu transformátoru bude zde tvořit kompenzační rezistor  $R_N$ .



Obr 4.3 – 1 Náhradní schéma soustavy uzemněné přes rezistor.

Admitanci obvodu určím obdobně jako v předchozích soustavách.

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{-j\Delta X_{c0}}, \quad \text{kde: } -j\Delta X_{c0} = \frac{1}{j\omega\Delta c_0} \quad (4.3 - 1)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{3}{R_{c0}} + \frac{1}{-jX_{c0}} + \frac{1}{R_N}, \quad \text{kde: } -jX_{c0} = \frac{1}{3j\omega c_0} \quad (4.3 - 2)$$

Pro poruchový proud, napětí nulového bodu a napětí jednotlivých fází pak platí vztahy 4.1 – 3 až 4.1 – 7 pro izolovanou soustavu.

### 4.3.1 Namodelovaný příklad pro soustavu uzemněnou přes rezistor

V modelovém příkladu budu vycházet ze schématu 4.3 – 1 a z něho vyplývajících vztahů pro admitance, proud a napětí. V teoretické části práce bylo uvedeno, že tento typ uzemnění se používá převážně na kabelové vedení. Proto bude výpočet proveden pro kabelové vedení se zadanými hodnotami:

- napětí sítě  $U = 22 \text{ kV}$ ,
- frekvence sítě  $f = 50 \text{ Hz}$ ,
- kapacitní proud  $\bar{I}_{kap} = 100 \text{ A}$ ,
- kapacitní nesymetrie  $\Delta c_0 = 0,6 \%$ ,
- svodová rezistance  $R_{c0} = 2 \%$ ,
- jmenovitý proud odporníku  $I_{RN} = 300 \text{ A}$ ,
- rezistance poruchy  $R_p = 300 \Omega$ .

Pro celkovou kapacitu platí opět hodnota vypočtená pro izolovanou soustavu.

$$c_0 = 8,353 \mu\text{F}; \quad X_{c0} = 127,017 \Omega$$

Svodovou rezistanci  $R_{c0}$  určím jako procentní část kapacitní reaktance  $X_{c0}$ .

$$\frac{1}{3}R_{c0} = 127,017 \cdot (100/2) = 6350,853 \Omega$$

Kapacitní nesymetrie je zadána jako 0,6 procenta z celkové kapacity.

$$\Delta c_0 = \frac{0,6 \cdot 8,353 \cdot 10^{-6}}{100} = 0,0501 \mu\text{F}$$

Rezistivita odporníku připojeného k uzlu sítě se spočítá z ohmova zákona jako podíl efektivní hodnoty napětí na odporníku a jmenovitého proudu odporníku.

$$R_N = (12701,71)/300 = 42,339 \Omega$$

Admittance obvodu vypočtu z náhradního schématu 4.3 – 1 podle vztahu 4.3 – 1 a 4.3 – 2:

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{300} + \frac{1}{-j \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0501 \cdot 10^{-6}}} = 0,0333 + j0,0000157 \Omega$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{1}{6350,853} + \frac{1}{-j127,017} + \frac{1}{42,339} = 0,0238 + j0,00787 \Omega$$

Podle vztahů 4.1 – 3 a 4.1 – 4 vypočtu napětí nulového bodu a hodnotu poruchového proudu.

$$\begin{aligned} \bar{U}_0 &= \frac{0,0333 + j0,0000262}{0,0333 + j0,0000262 + 0,0237 + j0,00787} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 1441,826 - j412,183 \\ &= 1499,586 \cdot e^{-j16} V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_p &= (0,0238 + j0,00787) \cdot (2016,944 - j4468,589) = 37,526 + j1,551 \\ &= 37,558 \cdot e^{j2,4} A \end{aligned}$$

Pro výpočet napětí jednotlivých fází použijí vztahy 4.1 – 5 až 4.1 – 7.

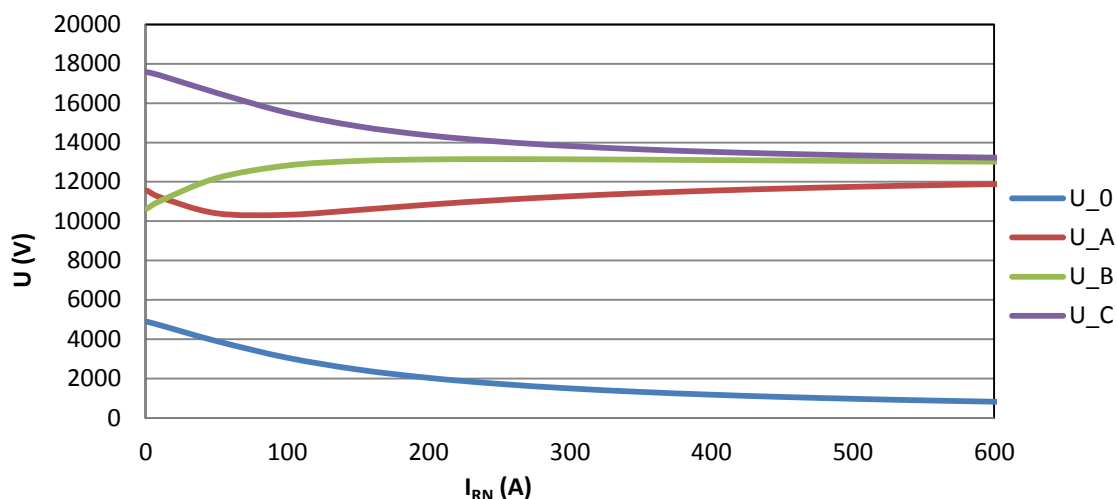
$$\bar{U}_a = \frac{22000}{\sqrt{3}} - (1441,826 - j412,183) = 11259,88 + j412,183 = 11267,421 \cdot e^{j2,1} V$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_b &= \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} - (1441,826 - j412,183) = -7792,679 - j10587,817 \\ &= 13146,396 \cdot e^{-j126,4} V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_c &= \left( -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} - (1441,826 - j412,183) = -7797,255 + j11410,348 \\ &= 13818,964 \cdot e^{j124,3} V \end{aligned}$$

Namodelovaný příklad pro soustavu uzemněnou přes rezistor jsem opět graficky znázornila v následujících grafech.

V prvním grafu je znázorněna závislost napětí na proudu rezistorem při poruše ( $R_p=300 \Omega$ ).

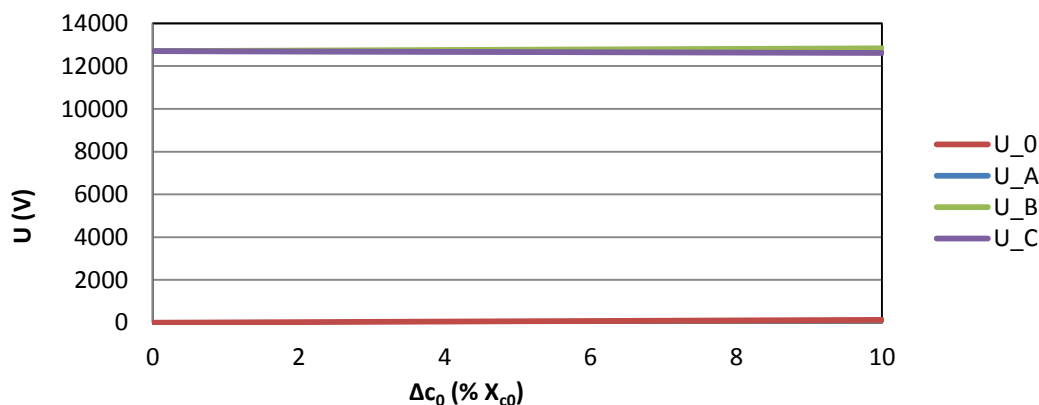


Obr 4.3.1 – 1 Závislost napětí na proudu rezistorem při poruše

Z grafu je vidět, že použití rezistorů s proudovou hodnotou nad 300 A nemá z hlediska zlepšení napěťových poměrů v síti příliš velký význam. Proto se pro kompenzaci kabelových vedení používají nejčastěji rezistory se zmíněným jmenovitým proudem, kterému odpovídá v síti 22 kV rezistivita  $R_N = 127 \Omega$ .

Pokud bych uvažovala jmenovitý proud rezistorem vyšší hodnoty ( $I_{RN} > 500$  A), nejednalo by se již o soustavu odporově uzemněnou, ale účinně uzemněnou. Naopak pro jmenovitý proud o nižších hodnotách ( $I_{RN} < 100$  A) by se jednalo spíše o soustavu izolovanou.

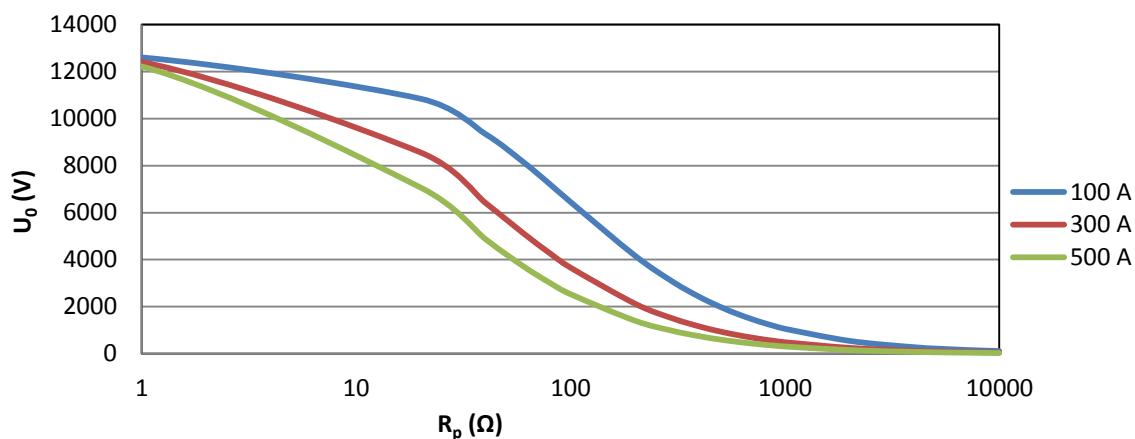
Na následujícím grafu je znázorněna závislost napětí na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu.



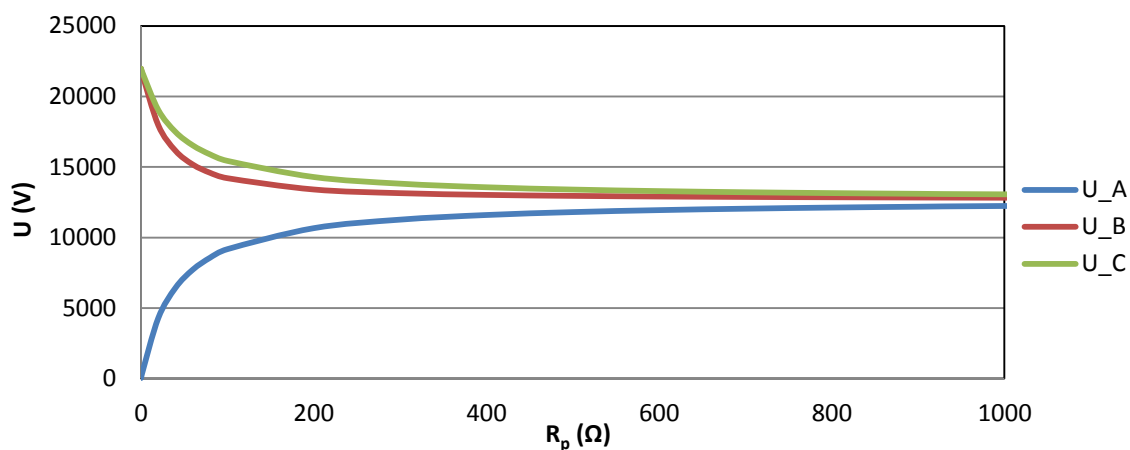
Obr 4.3.1 – 2 Závislost napětí na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu

Z grafu je patrné, že kapacitní nesymetrie nemá na velikost napětí vliv a to jak v bezporuchovém, tak v poruchovém stavu. Proto je tento typ uzemnění z hlediska nesymetrie nezajímavý.

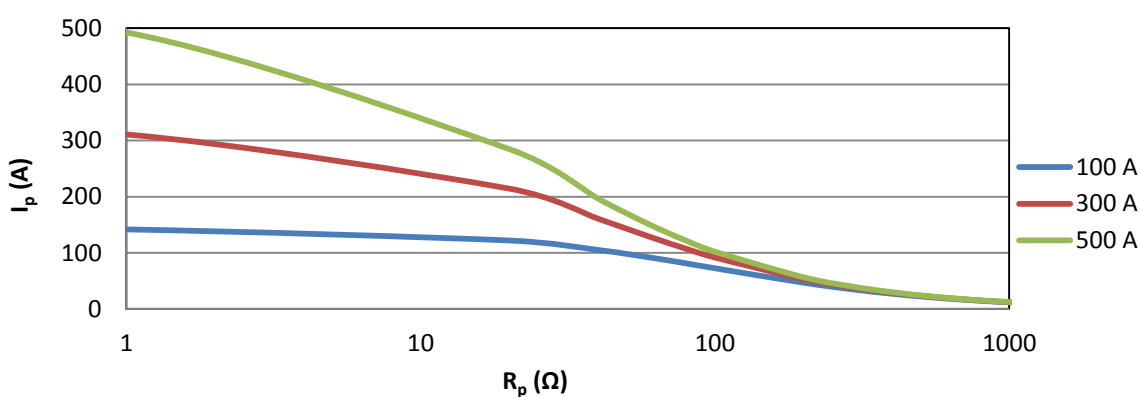
Na dalších grafech je znázorněn vliv rezistence poruchy na napětí a poruchový proud pro různé hodnoty odporníku  $R_N$ .



Obr 4.3.1 – 3 Závislost napětí nulového bodu na rezistanci poruchy



Obr 4.3.1 – 4 Závislost fázových napětí na rezistanci poruchy pro uzlový odporník  $127 \Omega$



Obr 4.3.1 – 5 Závislost poruchového proudu na rezistanci poruchy

Z prvního grafu závislosti na rezistanci poruchy je patrný vliv velikost odporníku na velikost napětí nulového bodu. S vyšší hodnotou jmenovitého proudu odporníkem napětí klesá rychleji než pro nižší hodnoty. Hodnotu 33 %  $U_f$  charakterizující zemní spojení

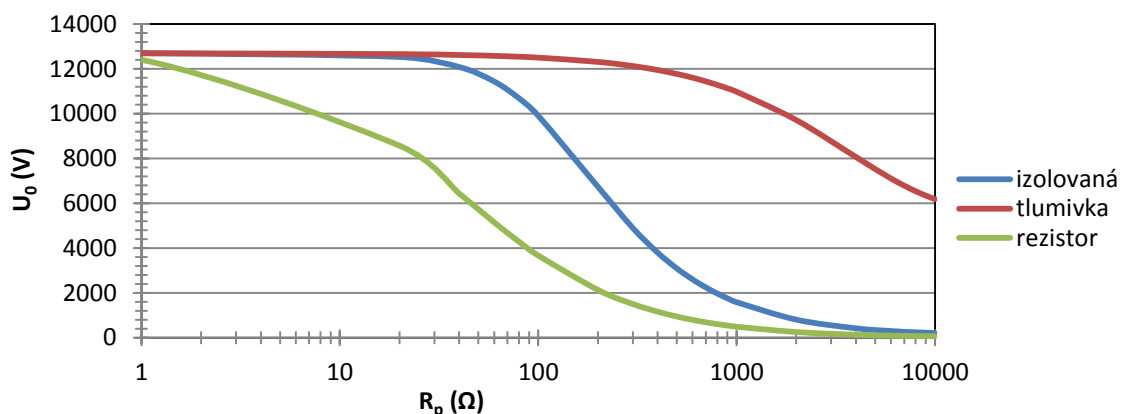


přesáhne při rezistanci poruchy  $80 \Omega$ .

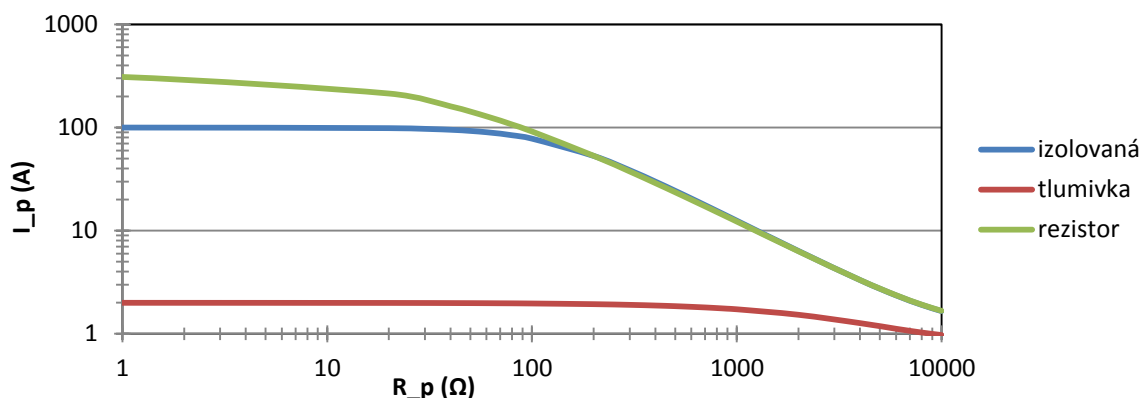
Z druhého grafu je vidět závislost fázových napětí pro uzlový odporník  $127 \Omega$ . V případě dokonalého zemního spojení mají fázová napětí podobné hodnoty jako v izolované soustavě a s rostoucí rezistancí poruchy se rychle blíží hodnotám fázových napětí v bezporuchovém stavu. Na třetím grafu je znázorněn poruchový proud opět pro různé hodnoty odporníků. Pro dokonalé zemní spojení je poruchový proud převážně činného charakteru daný velikostí jmenovitého proudu odporníkem. Dle normy ČSN 33 3070 se kabelové sítě mohou provozovat do velikosti zbytkového poruchového proudu v místě poruchy  $450 \text{ A}$ .

#### 4.4 Porovnání způsobů provozu nulového uzlu

Pro porovnání jednotlivých typů uzemnění uzlu vytvořím graf závislosti napětí nulového bodu na rezistanci poruchy a graf závislosti poruchového proudu na rezistanci poruchy pro soustavu izolovanou a uzemněnou přes tlumivku a přes rezistor.



Obr 4.4 – 1 Závislost napětí nulového bodu na rezistanci poruchy



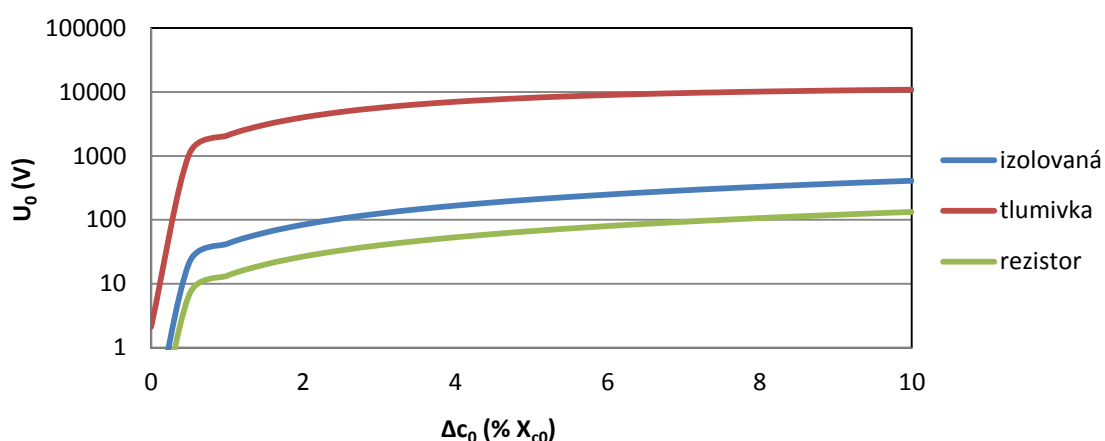
Obr 4.4 – 2 Závislost poruchového proudu na rezistanci poruchy

Z prvního grafu je vidět, že v případě dokonalého zemního spojení jsou napětí nulového bodu pro všechny soustavy přibližně stejná, rovná fázovému napětí postižené fáze A. Rozdíl

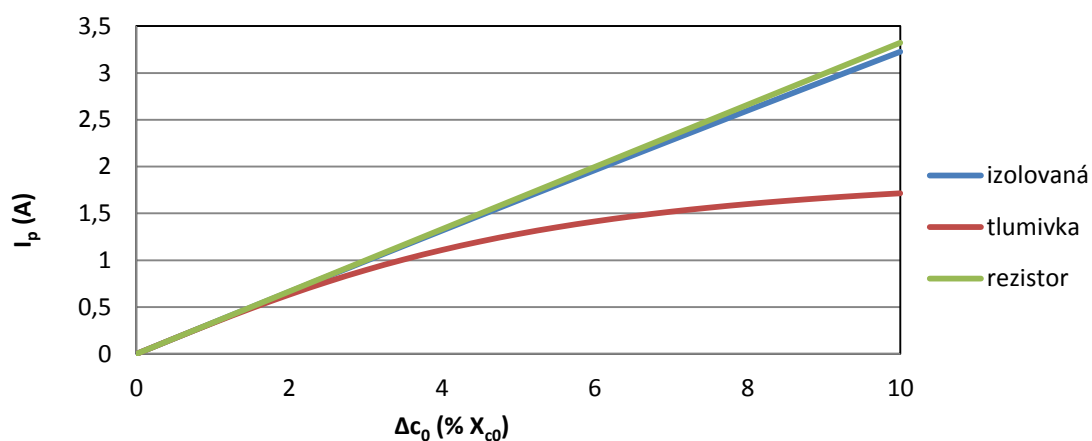
v těchto soustavách je v rychlosti poklesu napětí v závislosti na rezistanci poruchy. Z grafu vyplývá, že v případě soustavy uzemněné přes rezistor klesá napětí nulového bodu nejrychleji, naopak v soustavě uzemněné přes zhášecí tlumivku klesá velice pomalu. Pokud porovnáme rezistanci poruchy, při které je detekováno zemní spojení, u soustavy odporově uzemněné je tato hodnota nejnižší – 80  $\Omega$ , u izolované soustavy přibližně 400  $\Omega$  a v případě soustavy kompenzované zhášecí tlumivkou je tato hodnota nejvyšší, vyšší než 10 k $\Omega$ .

Z druhého grafu je vidět závislost poruchového proudu na rezistanci poruchy. V případě soustavy kompenzované zhášecí tlumivkou v přesně vyladěném stavu bude poruchový proud nejnižší (daný pouze nevykompenzovatelnou částí proudu – rezistancí tlumivky a svodovou rezistancí). Naopak největší poruchový proud teče soustavou uzemněnou přes rezistor. To klade nároky na uzemnění při dodržení krokových a dotykových napětí.

Na následujícím grafu je znázorněn vliv nesymetrie na napětí nulového bodu a poruchový proud v bezporuchovém stavu pro soustavu izolovanou, kompenzovanou zhášecí tlumivkou a rezistorem.



Obr. 4.4 – 3 Závislost napětí nulového bodu na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu



Obr. 4.4 – 4 Závislost poruchového proudu na kapacitní nesymetrii v bezporuchovém stavu

Z grafů je vidět, že z hlediska nesymetrie je nejlepší provozovat síť uzemněnou přes rezistor. Naopak nejvíce závislá na kapacitní nesymetrii je kompenzovaná soustava, kde napětí nulového bodu s nesymetrií roste do vysokých hodnot. Poruchový proud s kapacitní nesymetrií roste nejvíce v soustavě odporově uzemněné a izolované.

## Závěr

Záměrem mé diplomové práce bylo vyšetřit napěťové a proudové poměry při nesymetrických poruchách v sítích vn. Dále jsem se zaměřovala na vliv uspořádání vodičů venkovního a kabelového vedení na přenosové parametry. Mým cílem bylo tyto teoretické poznatky potvrdit na konkrétních příkladech.

Práci jsem rozčlenila do čtyř částí. V úvodu práce jsem uvedla několik teoretických poznatků o elektrizační soustavě. Zaměřila jsem se na soustavu vysokého napětí a rozlišila jsem tři typy uzemnění nulového bodu transformátoru používané na této hladině. Uvedla jsem teoretické úvahy o napěťových a proudových poměrech v bezporuchovém stavu a v případě zemního spojení v jednotlivých typech uzemnění. Jako nejvhodnější způsob výpočtu jednofázové poruchy jsem usoudila metodu souměrných složek, kterou jsem zde obecně popsala a v další části práce používala pro výpočty.

Při uspořádání vodičů venkovního vedení na konzoli jsou některé vodiče více ovlivňovány vodiči ostatních fází, než jiné. Tím vzniká kapacitní nesymetrie, která je pro různá uspořádání rozdílná. Vliv uspořádání na velikost nesymetrie jsem ukázala na dvou nejčastěji používaných typech uspořádání – pařátu a rovinném uspořádání. Výpočet jsem si usnadnila použitím programu MS Excel, ve kterém jsem vytvořila výpočtový program pro velikosti kapacit venkovního vedení. Z výpočtu jsem došla k závěru, že z hlediska kapacitní nesymetrie je výhodnější uspořádání do trojúhelníku ( $\Delta c_0 = 3,3 \%$ ). Kapacitní nesymetrie pro rovinné uspořádání v mém příkladu vyšla přibližně třikrát vyšší ( $\Delta c_0 = 10 \%$ ). Tyto hodnoty nesymetrie jsem použila pro výpočty ve čtvrté kapitole k vyhodnocení vlivu nesymetrie na aktivní přenosové parametry. Dále jsem pomocí vytvořeného programu hledala takové uspořádání vodičů, aby kapacitní nesymetrie byla co nejnižší. Nalezené rozměry jsou uvedené v kapitole 3.1.3. Jelikož jsou kabely v podstatě souměrné a vzájemně odstíněné, nemá uspořádání na velikost kapacitní nesymetrie vliv. Nesymetrie kabelového vedení vzniká při pokládání kabelů, kdy nejsou hlídány shodné délky jednotlivých fázových vodičů. Vliv rozdílné délky fázových vodičů jsem poukázala na praktickém příkladu. Z tohoto způsobu uložení jsem vypočetla kapacitní nesymetrii  $\Delta c_0 = 0,6 \%$ .

V práci jsem se zaměřila na praktické příklady jednofázové zemní poruchy v jednotlivých typech sítí. Pro usnadnění výpočtu jsem opět použila MS Excel, ve kterém jsem vytvořila výpočtové programy pro jednotlivé typy uzemnění. Namodelované příklady a závislosti napětí a poruchového proudu na některých parametrech sítě jsem znázornila pomocí grafů. Pomocí grafů jsem došla k závěru, že kapacitní nesymetrie v bezporuchovém stavu

nejvíce ovlivňuje soustavu kompenzovanou zhášecí tlumivkou. Při vyladěném stavu dosahuje napětí nulového bodu venkovního vedení uspořádaného do trojúhelníku téměř 6 kV. Pro rovinné uspořádání je tato hodnota přibližně třikrát vyšší. Z těchto hodnot vyplývá, že mnou uvažovanou soustavu nelze provozovat ve vyladěném stavu, protože již při samotném ladění by docházelo k signalizaci zemního spojení. Navíc při vyladění tlumivky dochází k velké nesymetrii fázových napětí. Na kapacitní nesymetrii je nejméně závislá soustava uzemněná přes rezistor, proto je z tohoto hlediska pro mne nezajímavá. V případě vzniku jednofázové poruchy je kapacitní závislost mnohem nižší pro všechny druhy uzemnění.

Výpočtové programy vytvořené v MS Excel jsou přiloženy na CD v souboru *Diplomová\_práce\_výpočty.xls*.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MERTLOVÁ, J., TAJTL, T., HEJTMÁNKOVÁ, P.: *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*, Plzeň: ZČU, 2004.
- [2] TROJÁNEK, Z.; HÁJEK, J.; KVASNICA, P.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1987.
- [3] TESAŘOVÁ, M.: *Přednášky z předmětu Elektroenergetika 2*. Plzeň, 2011. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická.
- [4] HODINKA, H.; FECKO, Š.; NĚMEČEK, F.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1989.
- [5] HEJTMÁNKOVÁ, P.: *Přednášky z předmětu teoretická elektrotechnika*. Plzeň, 2012. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická.
- [6] ČSN 33 3070. *Elektrotechnické předpisy. Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. Český normalizační institut, Praha, 1987.
- [7] TESAŘOVÁ, M., ŠTROBLOVÁ, M.: *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň, ZČU, 2000.
- [8] MERTLOVÁ J., NOHÁČOVÁ L.: *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň, ZČU, 2008.
- [9] Čeps, a. s. [online]. [cit. 2012-10-10]. Dostupné z:  
<http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/default.aspx>
- [10] Varia, s. r. o. [online]. [cit. 2013-28-1]. Dostupné z:  
[http://katalog.variapraha.cz/vyhledavanie.php?akcia=detail&Cislo\\_vyr=AL3D2HA0000000000000](http://katalog.variapraha.cz/vyhledavanie.php?akcia=detail&Cislo_vyr=AL3D2HA0000000000000)
- [11] MAROUŠEK, L.: *Zvyšování spolehlivosti zemních ochran v sítích s kompenzací zemních kapacitních proudů*. Plzeň, 2009. 72 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická.
- [12] HLAVÁČEK, J.: *Řešení problémů provozu uzlu v kabelové síti 22 kV*. Plzeň 2009. 67 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická.
- [13] PAPAY, J.: *Vliv nesymetrie fázových napětí na provoz distribuční sítě*. Plzeň, 2011. 54 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická.
- [14] HADÁČEK, Z.: *Analýza provozu uzlu sítě 22 kV vzhledem k jednofázovým zemním poruchám*. Plzeň 2012. 87 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická.
- [15] Zemní spojení [online]. [cit. 2013-6-3]. Dostupné z:  
<http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>

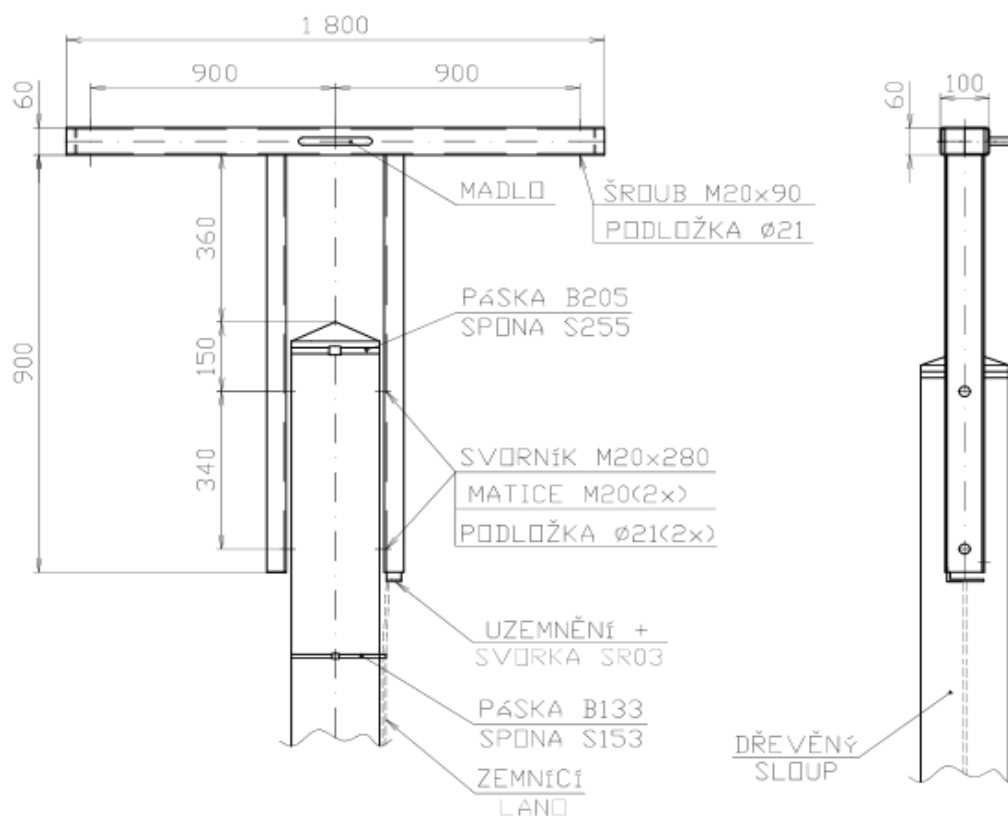
- [16] Energetika servis, s. r. o. [online]. [cit. 2013-21-3]. Dostupné z: <http://www.energetika-servis.cz/katalog.html>
- [17] PREDistribuce, a. s. [online]. [cit. 2013-8-4]. Dostupné z: <http://www.predistribuce.cz/distribuce/distribucni-sit/zhotovitele/katalog-prvku.html>
- [18] Ege, spol. s r. o.

## Přílohy

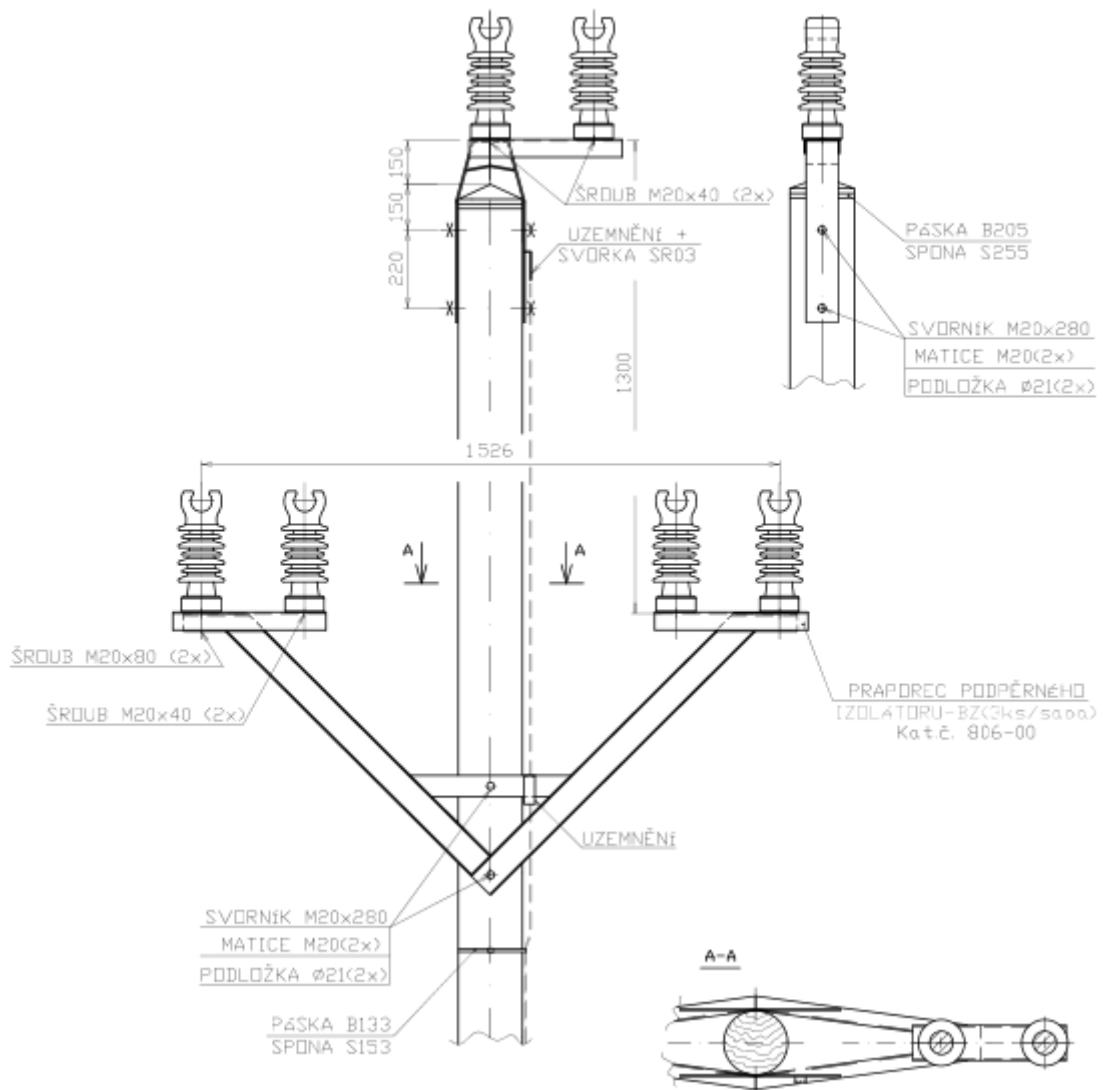
Příloha č. 1 Matematické průřezy a průměry lana

Jmenovitý průřez [mm <sup>2</sup> ]	Matematický průřez lana S [mm <sup>2</sup> ] a průměr lana d [mm]							
	AlFe 8		AlFe 6		AlFe 4		AlFe 3	
	S	d	S	d	S	d	S	d
35	39,38	7,08	40,08	8,10	43,75	7,46	47,71	9,35
50	56,25	8,46	56,29	9,60	74,39	11,20	68,71	11,22
70	78,75	10,01	77,72	11,55	94,15	12,60	96,51	13,30
95	106,88	11,67	105,02	13,35	116,24	14,00	123,28	14,40
120	135,00	13,11	143,48	15,65	147,11	15,75	167,79	16,80
150	168,75	14,66	174,27	17,25	188,96	17,85	192,62	18,00
185	208,13	16,28	215,45	19,20	227,83	19,60	245,13	20,79
210	236,25	17,34	244,85	20,20	261,54	21,00	274,63	22,02
240	270,00	18,34	276,14	21,70	298,01	22,55	317,05	23,65
300	337,50	20,73	344,35	24,20	380,91	25,65	407,17	26,25
350	393,75	22,39	408,33	22,80	426,18	27,20	461,65	27,90
450	479,00	28,67	525,00	25,85	562,50	26,76	600,00	27,64
650	755,90	36,07	781,67	31,55	837,50	32,65	893,33	33,73

Příloha č. 2 Rozměry konzol pro venkovní vedení







## Příloha č. 3 Parametry jednožilového kabelu 22 - AXEKVCEY

PRE	Podniková norma PRE a PREd		Číslo PN:	SK 221
	JEDNOŽILOVÝ KABEL 22-AXEKVCEY		Stav:	1/2
			Účinnost od 7. 1. 2009 verze 3:	
<b>Konstrukce kabelu:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hliníkové, kalaté kompr. jádro</li> <li>2. Vnitřní polovodičivá vrstva</li> <li>3. Izolace z XLPE</li> <li>4. Vnější polovodičivá vrstva</li> <li>5. Stínění z měděných drátů a protispirala (C)</li> <li>6. Vodoblokující separační vrstva proti podélnému šíření vody pod pláštěm</li> <li>7. PE(E) plášť</li> <li>8. PVC (Y) plášť</li> </ol>				
<b>Jmenovité napětí:</b> 12,7/22kV <b>Barva pláště:</b> červená (RAL 3000) <b>Zkušební napětí:</b> 50kV <b>Max. dovolená trvalá teplota jádra:</b> 90°C				
<b>Použití:</b> Pro venkovní prostředí, v zemi, pro vnitřní prostředí a v kabelových kanálech. Minimální teplota pro pokládku kabelů je 0°C.				
<b>Technické vlastnosti</b>				
Imenovitý průřez	mm <sup>2</sup>	120	240	
Průměr jádra	mm	13,0	18,9	
Imenovitá tloušťka izolace	mm	5,5	5,5	
Průměr nad izolací	mm	25,0 - 27,0	30,6 - 32,6	
Geometr. průř. stíněním	mm <sup>2</sup>	16,0	25,0	
Imenovitá tloušťka pláště PE	mm	2,5	2,5	
Imenovitá tloušťka pláště PVC	mm	1,5	1,5	
Vnější průměr kabelu	mm	33-38	39-44	
Min. dovolený poloměr ohybu	cm	57,0	66,0	
Hmotnost oca	kg/km	1500	2150	
<b>Elektrické vlastnosti</b>				
Imenovitý průřez	mm <sup>2</sup>	120	240	
Činný odpor při 20°C	max. Ω/km	0,253	0,128	
Kapacita	cca μF/km	0,23	0,30	
Induktance	cca mH/km	0,39	0,35	
Zemní ztrátový proud 3 fázový systém	A/km	2,6	3,4	
1s zkratová zatížitelnost (konečná teplota jádra 250°C)	kA	11,3	22,6	
1s zkratová zatížitelnost (konečná teplota stínění 80°C)	kA	3,2	5,0	
Proudová zatížitelnost v zemi	A	274	400	
	••••	306	437	
Proudová zatížitelnost ve vzduchu	A	317	486	
	••••	377	569	
Zatížitelnost kabelů je stanovena ve smyslu ČSN 33 2000 5 523				

