

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

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza provozu uzlu sítě 22 kV vzhledem k jednofázovým  
zemním poruchám**

**vedoucí práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**

**2012**

**autor: Zdeněk Hadáček**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk HADÁČEK**  
Osobní číslo: **E09N0115P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Analýza provozu uzlu sítě 22 kV vzhledem k jednofázovým zemním poruchám**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište způsoby provozu uzlu transformátoru VVN/VN a kritéria jeho návrhu.
2. Určete kapacitní zemní proudy vedení a celkové zemní kapacitní proudy při různých provozních zapojeních nyní a ve výhledu 20 let.
3. Analyzujte hodnoty naměřené z dispečinku E.ON v oblasti Tábor.
4. Vyhodnoťte velikosti mezních kapacitních proudů oblastí vzhledem ke zbytkovému proudu v místě poruchy a určete způsob provozu uzlu transformátoru plánované TR Tábor Náchod.
5. Navrhněte metodiku pro určení velikosti zbytkového kapacitního proudu pro kontrolu uzemnění stávajících vedení a pro návrh nových sítí.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na teoretický popis provozu uzlu sítě 22 kV a to především s ohledem na jednofázovou zemní poruchu. Jsou představeny možnosti výpočtu kapacitních proudů s přímou aplikací na distribuční síť v oblasti Tábor. Výstupem je zhodnocení dosavadního i budoucího stavu, návrh provedení uzlu plánované TR 110/22 kV Náchod a návrh metodiky pro určení zbytkového proudu pro kontrolu uzemnění stávajících a navrhovaných sítí.

## **Klíčová slova**

Zemní spojení, kapacitní proud, Petersenova (zhášecí) tlumivka, ladění zhášecí tlumivky, napěťová nesymetrie, metoda souměrných složek, uzemnění, zbytkový proud.

**Abstract**

The diploma thesis, which is presented below, focuses on theoretical description of 22 kV network neutral grounding operation with regard to single phase to ground fault. The possibilities of capacitive current computation are presented with direct applications for distribution network in Tábor area. The output is evaluation of present and future situation, the suggestion of network neutral grounding of projected substation 110/22 kV Náchod and proposal for methodology of residual current determination for verification of present and future networks grounding.

**Key words**

Network neutral grounding operation, single phase to ground fault, capacitive current, Petersen (arc suppression) coil, arc suppression coil tuning, voltage unbalance, method of symmetrical components, network grounding, residual current.

## **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 vypracoval 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 9. 5. 2012

Zdeněk Hadáček

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za vstřícný postoj a metodické vedení práce. Dále Ing. Danielu Koubovi za cenné rady a postřehy. V neposlední řadě pak rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ZPŮSOBY PROVOZU UZLU SÍTÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ZEMNĚNÍ UZLU.....	12
1.2 TEORIE K JEDNOFÁZOVÝM ZEMNÍM PORUCHÁM.....	13
1.2.1 Model sítě VN.....	13
1.2.2 Metoda souměrných složek.....	14
1.2.3 Obecné náhradní schéma.....	18
1.3 ROZDĚLENÍ SÍTÍ.....	21
1.3.1 Síť s izolovaným uzlem.....	21
1.3.2 Kompenzované síť.....	25
1.3.3 Síť s uzlem uzemněným přes odpor.....	30
1.3.4 Síť s přímo uzemněným uzlem.....	32
1.4 NAPĚŤOVÁ NESYMETRIE NA VN.....	33
1.5 PROBLEMATIKA LADĚNÍ ZHÁŠECÍ TLUMIVKY.....	37
1.5.1 Metody ladění zhašecí tlumivky.....	38
1.5.2 Jak správně naladit zhašecí tlumivku?.....	40
1.6 KRITÉRIA NÁVRHU UZLU TRANSFORMÁTORU.....	41
1.7 KOMPENZACE ZBYTKOVÉHO PROUDU V MÍSTĚ PORUCHY.....	44
1.7.1 Swedish Neutral.....	44
1.7.2 Přizemnění postižené fáze.....	45
<b>2 KAPACITNÍ PROUDY V OBLASTI TÁBOR</b> .....	<b>47</b>
2.1 TEORIE VÝPOČTU KAPACITNÍCH PROUDŮ.....	47
2.1.1 Venkovní vedení.....	47
2.1.2 Kabelová vedení.....	50
2.2 SOUČASNÝ STAV.....	53
2.3 VÝHLED 20 LET.....	56
<b>3 NÁVRH ZPŮSOBU PROVOZU UZLU TR 110/22 KV NÁCHOD</b> .....	<b>61</b>
<b>4 UZEMNĚNÍ V SÍTÍCH VYSOKÉHO NAPĚTÍ</b> .....	<b>64</b>
4.1 TEORIE UZEMŇOVÁNÍ V SÍTÍCH VN.....	64
4.1.1 Dotykové a krokové napětí.....	64
4.1.2 Zemní proud.....	69
4.1.3 Odpor uzemnění a jeho dimenzování na dotykové napětí.....	70
4.2 MOŽNÉ LIMITY ROZŠÍŘOVÁNÍ KOMPENZOVANÝCH SÍTÍ.....	72
4.2.1 Vzhledem k venkovním vedením.....	72
4.2.2 Vzhledem k trafostanicím VN/NN.....	73
4.2.3 Zhodnocení limitů.....	74
4.3 METODIKA URČENÍ VELIKOSTI ZBYTKOVÉHO KAPACITNÍHO PROUDU PRO KONTROLU UZEMNĚNÍ.....	75
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>78</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>79</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>81</b>
PŘÍLOHA A – ZAPOJENÍ VÝVODŮ TR TÁBOR A TR PLANÁ NAD LUŽNICÍ.....	81
PŘÍLOHA B – ZAPOJENÍ TR NÁCHOD DO SÍTĚ 22 kV.....	81
PŘÍLOHA C – ZAÚSTĚNÍ VÝVODŮ TR NÁCHOD DO STÁVAJÍCÍ SÍTĚ 22 kV.....	81



## Seznam symbolů

### Fyzikální veličiny a konstanty

$C$ [F]	Elektrická kapacita
$c$ [F·km <sup>-1</sup> ]	Kapacitní součinitel
$d$ [m]	Vzdálenost mezi vodiči
$E_{PR}$ [V]	Nárůst potenciálu země
$e$ [-]	Eulerovo číslo
$G$ [S]	Elektrický svod
$H$ [m]	Závěsná výška skutečného vodiče
$h$ [m]	Výška přímkového vodiče nad zemí
$I$ [A]	Elektrický proud
$k$ [-]	Součinitel tvaru zemniče
$L$ [H]	Indukčnost
$l$ [m]	Délka kabelu (vedení)
$P$ [W]	Činný výkon
$p$ [m]	Průhyb skutečného vodiče
$Q$ [VAr]	Jalový výkon
$R$ [Ω]	Elektrický odpor
$r$ [m]	Poloměr vodiče
$r$ [m]	Vzdálenost od středu elektrody
$S$ [m <sup>2</sup> ]	Průřez vodiče
$S$ [VA]	Zdánlivý výkon
$s$ [m]	Délka kroku a délka překlenuté vzdálenosti
$t$ [s]	Čas
$U$ [V]	Elektrické napětí
$Y$ [S]	Admitance
$Z$ [Ω]	Elektrická impedance
$\alpha$ [-]	Činitel útlumu
$\alpha$ [-]	Operátor natočení
$\delta$ [km·F <sup>-1</sup> ]	Potenciálový součinitel
$\varepsilon_0$ [F·m <sup>-1</sup> ]	Permitivita vakua
$\varepsilon_r$ [-]	Relativní permitivita
$\varepsilon$ [-]	Činitel nesymetrie

$\pi$ [-]	Ludolfovo číslo
$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	Rezistivita
$\varphi$ [V]	Elektrický potenciál
$\omega$ [ $1\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Úhlová frekvence

## Indexy

<i>I, 2, 0</i>	Sousledná, zpětná a netočivá složka
<i>DOT</i>	Dotykové napětí
<i>E</i>	Zemní (proud, odpor)
<i>f</i>	Fázová hodnota
<i>K</i>	Krokové (napětí)
<i>KAP, C</i>	Kapacitní (proud)
<i>L</i>	Induktivní (proud)
<i>N</i>	Uzlový (proud, napětí, odporník)
<i>POR, P, F</i>	Poruchový (proud, napětí)
<i>REZ</i>	Rezonanční
<i>RES</i>	Zbytkový (proud)
<i>R, S, T</i>	Označení fází
<i>TP</i>	Dovolené dotykové napětí
<i>W</i>	Činný (proud)

## Zkratky

ASC	Arc suppression coil
GFN	Ground fault neutraliser
NN	Nízké napětí
RCC	Residual current compensation
SVS	Static VAr system
TR	Transformovna
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
XLPE	Cross-linked polyethylene
ZS	Zemní spojení
ZVN	Zvlášť vysoké napětí

## Úvod

Předkládaná studie pojednává o provozu uzlu sítě 22 kV a problematice s tím spojené. Záměrem práce je zaprvé teoretické zhodnocení jednotlivých způsobů provozu uzlu s přímou aplikací získaných poznatků na návrh provedení uzlu plánované transformovny 110/22 kV Náchod společnosti E.ON Česká republika, s.r.o. Zadruhé pak navržení metodiky pro určení velikosti zbytkového kapacitního proudu pro kontrolu uzemnění stávajících a nových vedení. Koncept je rozdělen do čtyř hlavních částí.

V první části studie jsou představeny konkrétní způsoby provozu uzlu sítě 22 kV a s tím tématu úzce spojená. Jedná se především o napěťovou nesymetrii, možnosti ladění zhášecí tlumivky či kompenzaci zbytkového proudu poruchy. V rámci této kapitoly jsou rovněž sestavena kritéria návrhu uzlu transformátoru.

Druhá část je zaměřena na teoretický výpočet kapacitních proudů s následnou aplikací na oblast Tábor. Tím je stanoven současný kapacitní proud a na základě pozorovaného trendu je provedena predikce ve výhledu 20 let.

Ve třetí části je s respektováním poznatků z předchozích kapitol navrženo provedení uzlu plánované TR 110/22 kV Náchod.

Čtvrtá část pojednává o uzemnění sítí vysokého napětí. Jsou nastíněny možné limity pro budoucí rozšiřování kompenzovaných sítí a navržena metodika pro určení velikosti zbytkového kapacitního proudu pro kontrolu uzemnění stávajících a nových vedení.

# 1 Způsoby provozu uzlu sítí vysokého napětí

## 1.1 Úvod do problematiky zemnění uzlu

Problematika uzemnění uzlu vyvstala hned současně se zavedením třífázových sítí, tedy na přelomu 19. a 20. století. Z počátku se sítě provozovaly přímo uzemněné a izolované, což vzhledem k tehdejším zkratovým výkonům a rozsahům sítí nepředstavovalo potíže. Ty nastaly až s nástupem elektrifikace v prvních desetiletích 20. století, kdy se elektrické sítě začaly propojovat a výkony připojovaných generátorů rostly s poptávkou po elektrické energii. Tou dobou se začalo uvažovat i o jiných způsobech provedení uzlu transformátoru, které by řešily nedostatky současných. Pro omezení zkratového proudu přímo uzemněného uzlu se zavedl odporník, čímž vzniklo uzemnění uzlu přes odporník. Pro eliminaci poruchového kapacitního proudu a snížení přepětí při přechodných zemních spojení se začala používat Petersenova (zhášecí) tlumivka, čímž vznikly sítě kompenzované.

Dlouhou dobu se zdálo, že kompenzované sítě jsou dostatečné jak pro současnost, tak budoucnost, ovšem výstavba kabelových sítí pro velká města na hladině 22 kV vedla k vytváření velkých kapacitních celků, se kterými dosud nebyla dostatečná zkušenost a se kterými se ve výzkumných pracích nepočítalo. Tyto nové sítě začaly být více a více zahuštěné a používání kompenzovaného uzlu začalo postrádat svou zásadní výhodu – možnost provozu po dobu vyhledávání poruchy. U velkého celku totiž roste pravděpodobnost další poruchy vlivem zvýšení napětí ve zdravých fázích. Dalším významným důvodem hovořícím proti kompenzovanému uzlu bylo použití papírové izolace napuštěné olejem pro VN kabely. U těchto typů kabelu se často stávalo, že olej stékal a vznikala tak izolačně slabá místa, která nevydržela zvýšená napětí daná zemním spojením. Došlo tak k totální destrukci kabelu, kdy se jednofázová porucha stávala v krátké době vícefázovou a krátkodobé kompenzování pak postrádalo smysl. Toto vše vedlo k zavedení rezistoru do uzlu transformátoru pro kabelové sítě a sítě velkého rozsahu.

Přesvědčení o nepostradatelnosti odporníku v uzlu transformátoru pro kabelové distribuční sítě VN platilo dlouhá léta a do jisté míry se s ním lze setkat i dnes. Na druhou stranu se vyskytují podložené názory, že při současných kvalitách polyethylenové izolace je možné i kabelovou síť provozovat kompenzovaně, k čemuž také v současnosti dochází.

Obecně lze tvrdit, že uzel se zhášecí tlumivkou je nejpoužívanější pro VN distribuční sítě nejen u nás, ale i v celé Evropě. Centrální, východní a severní Evropa patřila po celou dobu k průkopníkům tohoto způsobu a v poslední době se tímto směrem začaly orientovat i země, které doteď využívaly jiný způsob – Francie (impedance), Itálie (izolované).

## 1.2 Teorie k jednofázovým zemním poruchám

Současná teorie jednofázových zemních poruch je výsledkem dlouholetého bádání, výzkumů a experimentů. V minulosti již bylo napsáno mnoho a i dnes se této problematice věnuje nemalá pozornost. Je to především dáno neustálým vývojem distribučních sítí a novými požadavky na jejich provoz.

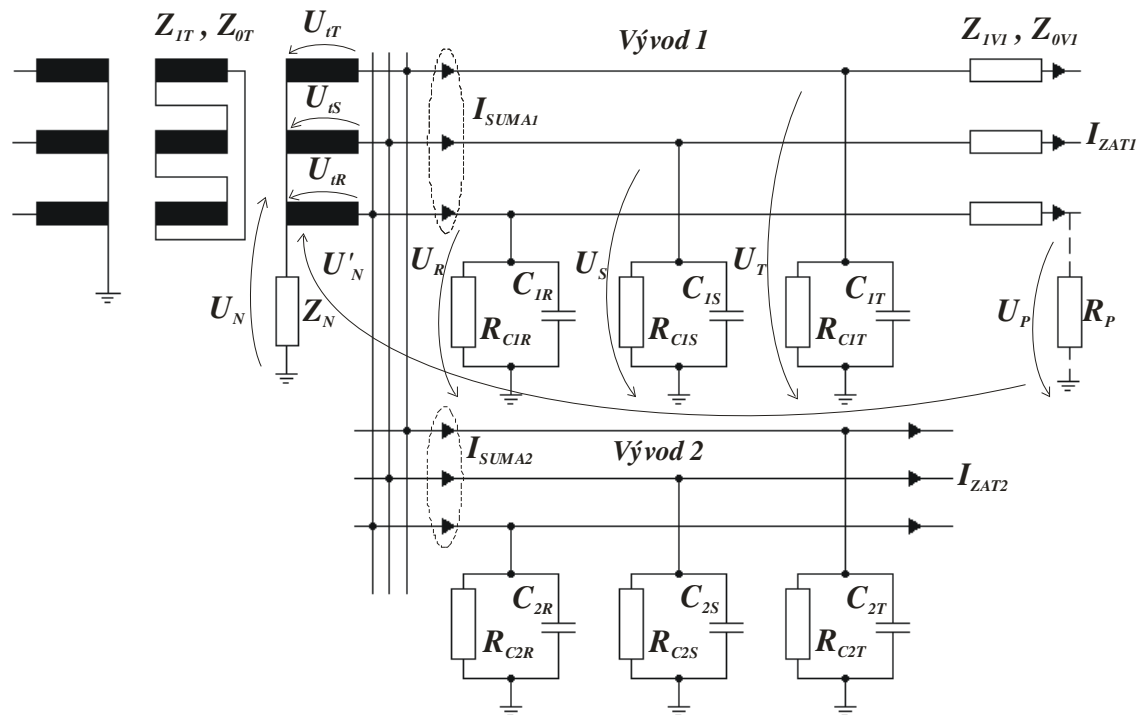
Předně je nutné stanovit vhodný model, který bude co nejlépe respektovat reálně provozované distribuční sítě. V literatuře je často použito schéma pouze s jedním vývodem, což může vést ke zkreslené představě. Zaprvé v podstatě žádná distribuční síť nemá pouze jeden vývod, zadruhé není na první pohled průhledné, že do poruchového proudu přispívá celá síť, nejen postižený vývod a za třetí pomocí jednoho vývodu není možno vysvětlit funkci ochran a vyhledávání zemní poruchy. Všechny tyto poznatky pak vedou na model sítě se dvěma vývody.

Dalším krokem je posléze stanovení náhradního schématu platného pro všechny způsoby provedení uzlu transformátoru, ze kterého bude možno odvodit základní vztahy pro napěťové a proudové poměry. Toto obecné schéma tradičně vychází z metody souměrných složek, proto tomu bude tak i zde.

### 1.2.1 Model sítě VN

Pro analýzu napěťových poměrů a poruchového proudu je u modelu sítě vysokého napětí s obecnou impedancí  $Z_N$  a odporem poruchy  $R_P$  běžně zanedbána zátěž, jedná se tedy o stav naprázdno. Ovšem proud tekoucí do zátěže je nutné uvažovat například pro pochopení funkce ochran určujících postižený vývod, proto je v modelu pro přehlednost proud zátěže zakreslen. Síť je zastoupena dvěma vývody – postižený vývod, ve kterém došlo k jednofázové poruše a zdravý vývod, který představuje zbytek celé sítě. Každý vývod je reprezentován kapacitami a svodovými odpory proti zemi a příslušnými impedancemi vedení. Mezifázové impedance jsou zanedbány. Pro jednoduchost lze nyní uvažovat jednotlivé parametry proti zemi symetrické, ovšem jak bude ukázáno později (kapitola 1.4), v síti se vždy jistá nesymetrie vyskytuje. Nejvyšší možnou nesymetrii pak představuje právě jednofázová zemní porucha.

Schéma výše popsaného modelu je zobrazeno na obr. 1.1. Z modelu je patrné nejběžnější zapojení transformátoru 110/22 kV a následně i přítomnost terciálního vinutí užitečného pro uzavírání netočivých složek (respektive třetích násobků 3. harmonické).



Obrázek 1.1 – Model obecné sítě se dvěma vývody [3].

### 1.2.2 Metoda souměrných složek

Je obecně známo, že analýza symetrických trojfázových obvodů je podstatně jednodušší, než analýza obvodů nesymetrických. Lze s výhodou využít symetričnosti obvodu a pracovat pouze s jedním fázorem. Toto zjednodušení ovšem u nesymetrických obvodů odpadá a je nutné systém analyzovat mnohem komplexněji. V současné době lze daný obvod popsat některou z metod pro obecnou analýzu obvodů (uzlová napětí, smyčkové proudy,...) a formulovat tak soustavu rovnic, která je s pomocí výpočetní techniky snadno řešitelná. Navzdory tomuto faktu, na poli analýzy nesymetrických obvodů hraje stále nezanedbatelnou roli metoda souměrných složek (Ch. L. Fortescue<sup>1</sup>, 1918). Důvodem je tomu historické zavedení této metody, kvalitní fyzikální interpretace jednotlivých složek (netočivá složka způsobující jednosměrnou magnetizaci transformátorového jádra, zpětná přídavné ohřívání točivých strojů) a v neposlední řadě relativně schůdné řešení poruchových stavů soustavy.

Než ovšem bude představena samotná metoda souměrných složek, je vhodné nadefinovat souměrnou trojfázovou soustavu napětí. Ta je daná stejnou amplitudou a fázovým natočením o  $\pm 120^\circ$ . Pro okamžité hodnoty napětí pak platí soustava (1.1), pro zobrazení v komplexní rovině (1.2). Zároveň lze taktéž předpokládat, že vnitřní napětí transformátoru

<sup>1</sup> Ch. L. Fortescue (1876–1936) - americký elektroinženýr. Roku 1918 poprvé představil odborné veřejnosti metodu souměrných složek. Tato metoda byla podrobně popsána v publikaci: „Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks“.

označená v modelu sítě  $U_{iR}$ ,  $U_{iS}$ ,  $U_{iT}$  budou taktéž souměrná. Z důvodu pozdějšího využití je proto souměrná soustava definována pomocí těchto napětí.

$$\begin{aligned} u_{iR} &= \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \sin(\omega \cdot t) & \hat{U}_{iR} &= U_f \cdot e^{j \cdot 0} & &= U_f \\ u_{iS} &= \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) & \hat{U}_{iS} &= U_f \cdot e^{-j \cdot 120} = \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_{iR} = \hat{a}^2 \cdot U_f & (1.1) & \\ u_{iT} &= \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ) & \hat{U}_{iT} &= U_f \cdot e^{+j \cdot 120} = \hat{a} \cdot \hat{U}_{iR} = \hat{a} \cdot U_f & (1.2) & \end{aligned}$$

Kde:  $U_f$  [V] je efektivní hodnota fázového napětí,  $\omega$  [1·s<sup>-1</sup>] je úhlová frekvence,  $t$  [s] čas,  $e$  [-] je Eulerovo číslo a  $a$  [-] je operátor natočení, pro který platí:

$$\hat{a} = e^{+j \cdot 120} = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \hat{a}^2 = e^{-j \cdot 120} = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad 1 + \hat{a} + \hat{a}^2 = 0 \quad (1.3)$$

Metoda souměrných složek je založena na následujícím teorému: *Každou obecně nesouměrnou trojfázovou soustavu, reprezentovanou třemi fázory, lze rozložit na tři soustavy souměrné, při čemž každá má opět tři fázory.* Tato myšlenka je prezentována rovnicemi (1.4), (1.5) a (1.6). Soustava souměrných složek je tvořena soustavou **souslednou** (stejný sled fází jako původní nesouměrná soustava), **zpětnou** (opačný sled fází než původní nesouměrná soustava) a **netočivou** (není žádné fázové pootočení mezi fázory). V anglické literatuře jsou tyto soustavy nazývány – „*positive, negative, zero*“, což vede k doslovnému překladu na *pozitivní, negativní a nulová*. Všechny tři soustavy se pak otáčí ve stejném směru a stejnou úhlovou rychlostí  $\omega$  jako původní nesouměrná soustava.

#### Soustava sousledná

$$\hat{U}_{(1)R} = \hat{U}_{(1)}, \quad \hat{U}_{(1)S} = \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_{(1)}, \quad \hat{U}_{(1)T} = \hat{a} \cdot \hat{U}_{(1)} \quad (1.4)$$

#### Soustava zpětná

$$\hat{U}_{(2)R} = \hat{U}_{(1)}, \quad \hat{U}_{(2)S} = \hat{a} \cdot \hat{U}_{(1)}, \quad \hat{U}_{(2)T} = \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_{(1)} \quad (1.5)$$

#### Soustava netočivá

$$\hat{U}_{(0)R} = \hat{U}_{(0)S} = \hat{U}_{(0)T} = \hat{U}_{(0)} \quad (1.6)$$

K prvnímu teorému bude zřejmě platit i myšlenka opačná, tedy že ze soustav souměrných složek lze vhodným sčítáním fázorů jednotlivých složek získat obecně nesouměrnou soustavu. Toto tvrzení je vyjádřeno rovnicí (1.7). Při uvažování fáze  $R$  jako vztažné lze psát rovnice (1.8), což při využití maticového zápisu vede k rovnici (1.9).

$$\begin{aligned}
 \hat{U}_R &= \hat{U}_{(1)R} + \hat{U}_{(2)R} + \hat{U}_{(0)R} & \hat{U}_R &= \hat{U}_{(1)} + \hat{U}_{(2)} + \hat{U}_{(0)} \\
 \hat{U}_S &= \hat{U}_{(1)S} + \hat{U}_{(2)S} + \hat{U}_{(0)S} & \hat{U}_S &= \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_{(1)} + \hat{a} \cdot \hat{U}_{(2)} + \hat{U}_{(0)} \\
 \hat{U}_T &= \hat{U}_{(1)T} + \hat{U}_{(2)T} + \hat{U}_{(0)T} & \hat{U}_T &= \hat{a} \cdot \hat{U}_{(1)} + \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_{(2)} + \hat{U}_{(0)}
 \end{aligned} \quad (1.7) \quad (1.8)$$

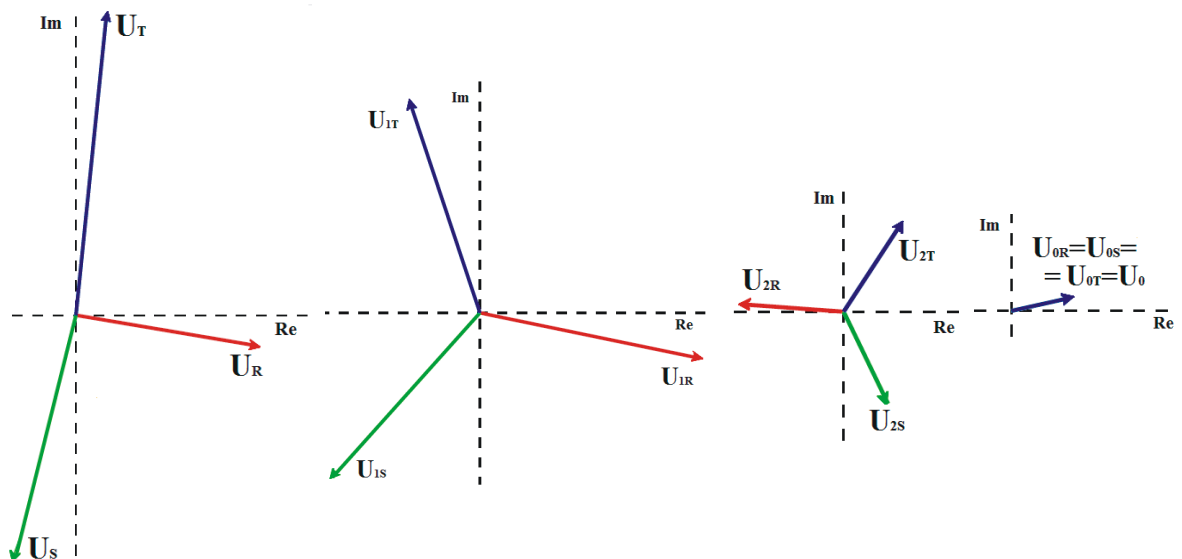
$$\mathbf{U}_{RST} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{U}_{120} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{bmatrix} \hat{U}_R \\ \hat{U}_S \\ \hat{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \hat{a}^2 & \hat{a} & 1 \\ \hat{a} & \hat{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_{(1)} \\ \hat{U}_{(2)} \\ \hat{U}_{(0)} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Kde:  $\mathbf{U}_{RST}$  [V] je vektor fázorů nesymetrické soustavy,  $\mathbf{F}$  [-] je matice souměrných složek a  $\mathbf{U}_{120}$  [V] je vektor fázorů souměrných složek.

Postup při práci s metodou souměrných složek je následující: *Rozklad nesouměrné soustavy na tři soustavy souměrné, analýza obvodu pomocí souměrných soustav, opětovné složení na nesouměrnou soustavu a tím nalezení řešení.* Je tedy vhodné uvést i relaci pro rozklad nesouměrné soustavy a tím získání vektoru souměrných složek. Platí vztah (1.10), který lze dále rozepsat do soustavy rovnic (1.11):

$$\mathbf{U}_{120} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{U}_{RST} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{bmatrix} \hat{U}_{(1)} \\ \hat{U}_{(2)} \\ \hat{U}_{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_R \\ \hat{U}_S \\ \hat{U}_T \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

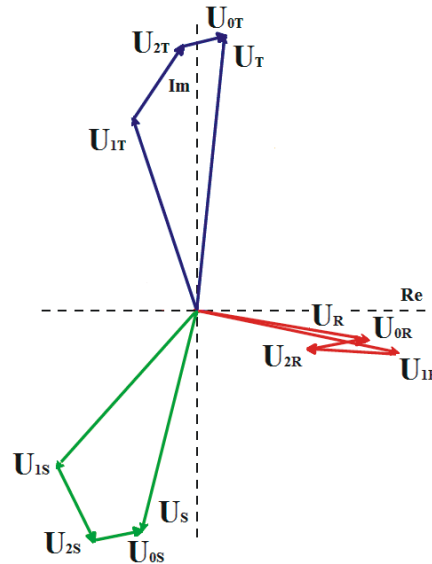
$$\begin{aligned}
 \hat{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{U}_R + \hat{a} \cdot \hat{U}_S + \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_T) \\
 \hat{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{U}_R + \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_S + \hat{a} \cdot \hat{U}_T) \\
 \hat{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{U}_R + \hat{U}_S + \hat{U}_T)
 \end{aligned} \quad (1.11)$$



Obrázek 1.2 – Nesouměrná soustava a jednotlivé souměrné složky – sousledná, zpětná a netočivá.



Pro názornost metody souměrných složek jsou využívány fázorové diagramy, tak jak je tomu na obr. 1.2, respektive obr. 1.3. Zároveň je vhodné konstatovat, že uvedené rovnice platí nejen pro napětí, ale i proudy.



Obrázek 1.3 – Superpozice souměrných složek ve výslednou nesouměrnou soustavu.

Výše byl popsán rozklad z nesouměrné soustavy na tři souměrné složkové soustavy, kdy každá je reprezentována základním obvodem. Ten je dán soustavou (1.12), přičemž lze za pomoci předchozích rovnic odvodit, že zpětná a netočivá soustava neobsahují vnitřní napětí zdroje. V tom případě soustava (1.12) přechází v (1.13) a lze definovat základní obvody pro jednotlivé složky, viz obr. 1.4.

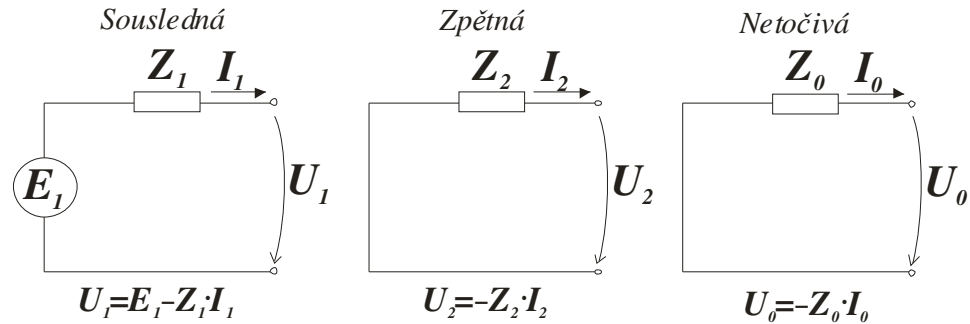
$$\mathbf{U}_{120} = \mathbf{E}_{120} - \mathbf{Z}_{120} \cdot \mathbf{I}_{120} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{E}_1 \\ \hat{E}_2 \\ \hat{E}_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{Z}_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \hat{I}_0 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{E}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{Z}_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \hat{I}_0 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Kde:  $E$  [V] je vnitřní napětí zdroje (v podstatě se jedná o napětí  $U_{fR}=U_f$ ),  $Z_{1,2,0}$  [ $\Omega$ ] jsou sousledná, zpětná a netočivá impedance obvodu a  $I_{1,2,0}$  [A] jsou sousledný, zpětný a netočivý proud.

Znalost jednotlivých složkových obvodů ovšem stále není dostatečná k analýze poruchového stavu. Soustavu (1.13) je nutné doplnit o další tři nezávislé rovnice –

tzv. charakteristické. Tyto rovnice jsou pro každý typ poruchy jiné a na nich v konečném důsledku závisí, jak bude závěrečné náhradní schéma vypadat. Náhradní schéma je totiž tvořeno právě na základě výše zmíněných šesti rovnic. Názorný příklad odvození pro jednofázovou zemní poruchu bude proveden v následující kapitole.

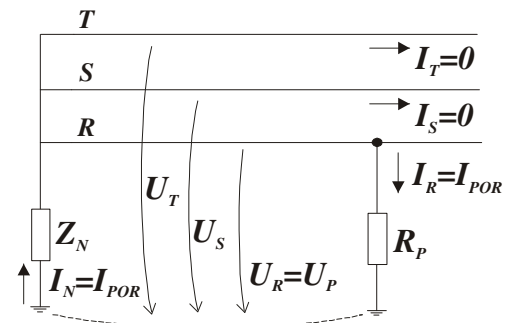


Obrázek 1.4 – Náhradní obvody složkových soustav.

### 1.2.3 Obecné náhradní schéma

Jak bylo předesláno v předchozím, nyní bude odvozeno a následně krátce pojednáno o náhradním schématu pro jednofázovou poruchu. Jednofázová porucha je volena záměrně, jelikož jedním z cílů práce je návrh provedení uzlu transformátoru a ten stojí a padá právě na tomto druhu poruchy.

Úkolem je sestavení charakteristických rovnic a následné vhodné pospojování náhradních složkových obvodů tak, aby byly splněny právě tyto rovnice. K tomu poslouží zjednodušené schéma jednofázové zemní poruchy, přičemž je uvažováno odporové spojení se zemí (v praxi zřídka kdy dojde k čistě kovovému spojení). Pro zjednodušení se běžně vychází ze stavu naprázdno, čímž je výpočet zjednodušen o vliv provozních proudů.



Obrázek 1.5 – Pomocné schéma pro 1f poruchu.

Z hodnot jednotlivých veličin na obr. 1.5 lze aplikací rovnice (1.10) na proudy psát rovnici (1.14), což lze jinak zapsat pomocí rovnice (1.15).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{(1)} \\ \hat{I}_{(2)} \\ \hat{I}_{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_R \\ \hat{I}_R \\ \hat{I}_R \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

$$\hat{I}_{(1)} = \hat{I}_{(2)} = \hat{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_R = \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_{POR} \quad (1.15)$$

Dle rovnice (1.8) lze pro napětí psát rovnici:

$$\hat{U}_R = \hat{U}_P = \hat{U}_{(1)} + \hat{U}_{(2)} + \hat{U}_{(0)} \quad (1.16)$$

Z uvedených rovnic lze vyčíst, že napětí sousledné, zpětné a netočivé složky se sčítají s napětím poruchy a vytváří tak napěťovou smyčku. Zároveň platí, že proudy sousledné, netočivé a zpětné složky jsou totožné. Je zřejmé, že jednotlivé složkové soustavy budou propojeny do série s odporem poruchy (přechodným odporem).

Výsledné obecné náhradní schéma je zobrazeno na obr. 1.6, kde platí následující značení:

$\hat{Z}_{1,2,0T}$  Složkové impedance transformátoru

$\hat{Z}_{1,2,0V}$  Složkové impedance vedení

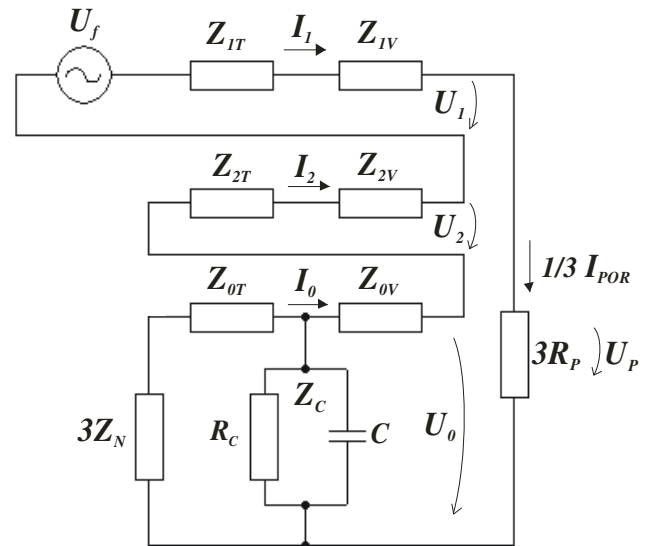
$\hat{Z}_N$  Impedance v uzlu transformátoru

$\hat{Z}_C$  Příčná impedance vedení

$C$  Kapacita celého vedení proti zemi

$R_C$  Izolační odpor celého vedení

$R_P$  Přechodový odpor (odpor poruchy)



Obrázek 1.6 – Obecné náhradní schéma pro jednofázovou poruchu [4].

Jak je patrné, jednotlivé složkové soustavy byly uvedeny podrobněji – sousledná a zpětná jsou tvořeny impedancí transformátoru a vedení. Netočivá pak sério-paralelní kombinací impedancí transformátoru a vedení, uzlové a příčné impedance.

Za zmínku stojí, kde se v náhradním schématu vzaly trojnásobky uzlové impedance  $Z_N$  a přechodového odporu  $R_P$ . Je to dáno úbytky napětí na obou prvcích – ve skutečném modelu přes oba prvky teče proud označený na obr. 1.5 jako  $I_R = I_{POR} = I_N$ , avšak v náhradním schématu přes tyto prvky teče proud  $I_0 = I_1 = I_2$ . Dle rovnice (1.15) je zřejmý poměr mezi proudy  $I_{POR}$  a  $I_0$  a aby v náhradním schématu nedošlo k rozepři a proud  $I_0$  byl stále  $I_0$  a ne  $3I_0$ , musí se do náhradního schématu zavést trojnásobky zmíněné impedance, resp. odporu. Tato situace je popsána rovnicemi (1.17) a (1.18).

$$\hat{U}_P = \hat{I}_{POR} \cdot R_P = 3 \cdot \hat{I}_0 \cdot R_P = \hat{I}_0 \cdot (3R_P) \quad (1.17)$$

$$\hat{U}_N = \hat{I}_N \cdot \hat{Z}_N = 3 \cdot \hat{I}_0 \cdot \hat{Z}_N = \hat{I}_0 \cdot (3\hat{Z}_N) \quad (1.18)$$

Na základě výše sestaveného náhradního schématu lze stanovit vztahy obecně platné pro všechny způsoby provozu uzlu. Rozdíl ve výsledcích pro jednotlivá provedení uzlu je pak dán pouze rozdílnou uzlovou impedancí  $Z_N$ .

Pro proud netočivé složky (resp. sousledné a zpětné) lze formulovat vztah (1.19) a následně pro proud poruchy (1.20).

$$\hat{I}_0 = \frac{U_f}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \quad (1.19)$$

$$\hat{I}_{POR} = 3 \cdot \hat{I}_0 = \frac{3 \cdot U_f}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \quad (1.20)$$

Pro analýzu napěťových poměrů je nutné stanovit jednotlivá složková napětí. Za použití rovnic (1.13) lze psát následující vztahy:

$$\hat{U}_1 = \hat{E}_1 - \hat{Z}_1 \cdot \hat{I}_1 = U_f - \hat{Z}_1 \cdot \frac{U_f}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \quad (1.21)$$

$$\hat{U}_2 = -\hat{Z}_2 \cdot \hat{I}_2 = -\hat{Z}_2 \cdot \frac{U_f}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \quad (1.22)$$

$$\hat{U}_0 = -\hat{Z}_0 \cdot \hat{I}_0 = -\hat{Z}_0 \cdot \frac{U_f}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \quad (1.23)$$

Poté už lze za pomoci rovnic (1.8), (1.17), (1.19) a výše popsaných složkových napětí při uvažování  $Z_1 = Z_2$  psát pro napětí jednotlivých fází:

$$\hat{U}_R = \hat{U}_P = 3 \cdot \hat{I}_0 \cdot R_p = \frac{3 \cdot R_p}{2 \cdot \hat{Z}_1 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \cdot U_f \quad (1.24)$$

$$\hat{U}_S = \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_1 + \hat{a} \cdot \hat{U}_2 + \hat{U}_0 = \dots = \left( \hat{a}^2 - \frac{\hat{Z}_0 - \hat{Z}_1}{2 \cdot \hat{Z}_1 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \right) \cdot U_f \quad (1.25)$$

$$\hat{U}_T = \hat{a} \cdot \hat{U}_1 + \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_2 + \hat{U}_0 = \dots = \left( \hat{a} - \frac{\hat{Z}_0 - \hat{Z}_1}{2 \cdot \hat{Z}_1 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \right) \cdot U_f \quad (1.26)$$

V modelu sítě jsou naznačena dvě uzlová napětí – jedno proti zemi v místě zdroje značené  $U_N$  a druhé proti zemi v místě poruchy značené  $U_N^l$ . Tyto napětí se nepatrně liší a jejich rozdíl bude zřejmě růst s rostoucí vzdáleností místa poruchy od napájecího transformátoru. Při zanedbání netočivé složky impedance transformátoru lze psát pro uzlové napětí v místě zdroje:

$$\hat{U}_N = \hat{I}_0 \cdot \frac{3 \cdot \hat{Z}_N \cdot \hat{Z}_C}{3 \cdot \hat{Z}_N + \hat{Z}_C} = \frac{3 \cdot \hat{Z}_N \cdot \hat{Z}_C}{(2 \cdot \hat{Z}_1 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p) \cdot (3 \cdot \hat{Z}_N + \hat{Z}_C)} \cdot U_f \quad (1.27)$$

Pro vyjádření napětí  $U'_N$  lze využít např. vztah (1.25) a dále myšlenku, že toto napětí vyjadřuje vysunutí uzlu napětí v místě poruchy vůči uzlu zdroje. V rovnici (1.25) pak napětí  $\hat{U}_S$  představuje napětí zdravé fáze  $S$  proti zemi, napětí  $\hat{a}^2 U_f$  bude napětí fáze  $S$  na transformátoru a poslední člen zřejmě bude ono napětí uzlu sítě proti zemi v místě poruchy. Lze psát:

$$\hat{U}'_N = \frac{\hat{Z}_0 - \hat{Z}_1}{2 \cdot \hat{Z}_1 + \hat{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \cdot U_f \quad (1.28)$$

Z výše uvedených vztahů a schémat je patrné, že jediné, čím se jednotlivé způsoby provozu uzlu transformátoru liší, je uzlová impedance  $Z_N$ . Její změna silně ovlivňuje chování a podmínky provozu celé sítě při nesymetrických stavech a to počínaje mírnou kapacitní nesymetrií a konče kovovou jednofázovou poruchou.

### 1.3 Rozdělení sítí

V následující části budou popsány způsoby provozu uzlu transformátoru, které mají v České republice největší tradici. Jedná se o sítě izolované, kompenzované přes tlumivku, uzemněné přes rezistor a přímo uzemněné.

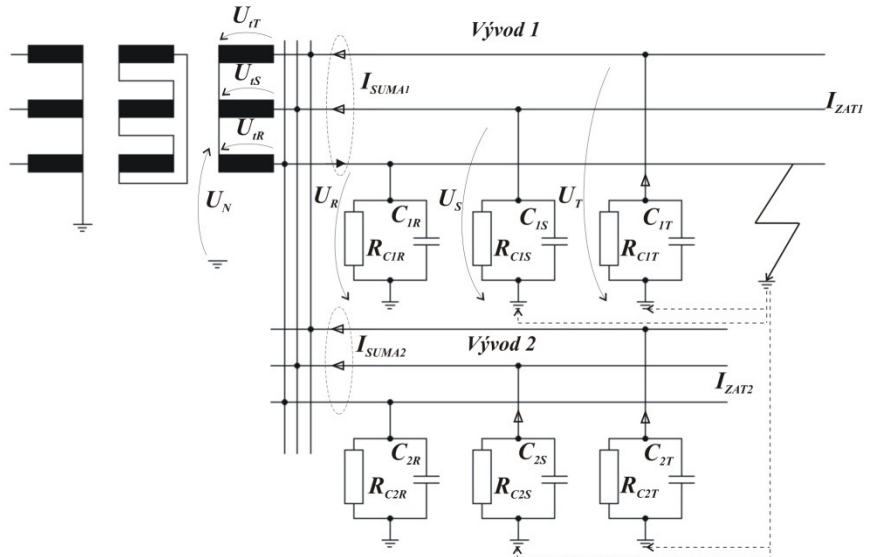
Jak bude uvedeno níže, pro jednotlivé způsoby provozu uzlu lze obecné náhradní schéma zjednodušit a uvedené obecné vztahy nabudou přijatelnější charakter.

#### 1.3.1 Síť s izolovaným uzlem

Sítě s izolovaným uzlem patří historicky k nejstaršímu, avšak v současné době neperspektivnímu způsobu provozu uzlu, který pro distribuční sítě VN dnešního rozsahu nenachází uplatnění. Jediná místa, kde lze ještě izolované sítě najít, jsou malé dožívající sítě, nebo vlastní napájení elektráren a průmyslových závodů.

Charakteristickým znakem takto provozovaných sítí je, jak z názvu plyne, odizolování uzlu transformátoru od země. ( $Z_N \rightarrow \infty$ ). Tento fakt se při bezporuchovém stavu a při neuvažování nesymetrií neprojevuje a síť se chová stejně jako za použití jiných způsobů provedení uzlu. Specifické chování je patrné zejména až při jednofázové zemní poruše, zde nazývané zemní spojení. Síť se zemním spojením ve fázi  $R$  je naznačena na obr. 1.7. Poruchový proud se uzavírá přes místo zemního spojení, vinutí transformátoru, svodové odpory a kapacity zdravých fází a to nejen postiženého vývodu, ale celé sítě.

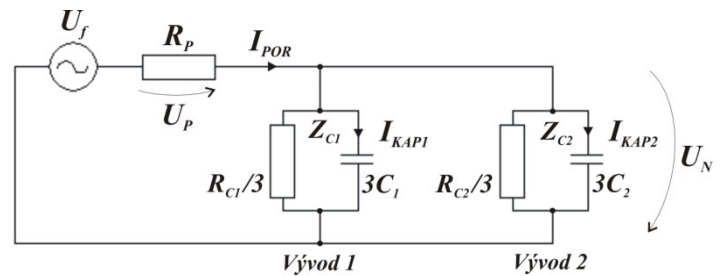
Jak již bylo předesláno, obecné náhradní schéma lze zjednodušit a to bez významného ovlivnění získaných výsledků. Podélné impedance vedení jsou vzhledem k příčné impedanci  $Z_C$  zanedbatelné – ze schématu možno vypustit celou souslednou



Obrázek 1.7 – Zemní spojení v izolované síti.

a zpětnou impedanci a taktéž netočivou impedanci vedení. Netočivá impedance transformátoru je taktéž velmi malá a zároveň se při izolovaném uzlu vůbec neuplatní. Rovněž mezifázové kapacity není nutno uvažovat. Při zavedení těchto úvah se původní schéma (obr. 1.6) změní na zjednodušené schéma (obr. 1.8).

V takto zjednodušeném schéma se uzlové napětí v místě poruchy  $U'_N$  rovná uzlovému napětí v místě zdroje  $U_N$  a zároveň netočivé složce napětí  $U_0$  (často nazýváno nulové napětí). Pracuje se tak pouze s uzlovým napětím v místě zdroje, pro které platí vztah:



Obrázek 1.8 – Zjednodušené náhradní schéma - izolovaná síť.

$$\hat{U}_N = \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + \frac{3}{R_C} + j3 \cdot \omega \cdot C} \cdot U_f \quad (1.29)$$

Přičemž platí následující značení:

$$\frac{1}{R_C} = \frac{1}{R_{C1}} + \frac{1}{R_{C2}}, \quad C = C_1 + C_2 \quad (1.30)$$

Kde:  $\frac{1}{R_C}$  (S) je svod jedné fáze celé sítě,  $\frac{1}{R_{C1,2}}$  (S) je svod jedné fáze vývodů 1 a 2,  $C$  (F) je kapacita jedné fáze proti zemi celého vedení a  $C_{1,2}$  (F) je kapacita jedné fáze proti zemi vývodů 1 a 2.

Pro poruchový proud lze psát vztah:

$$\hat{I}_{POR} = \left( \frac{3}{R_C} + j3 \cdot \omega \cdot C \right) \cdot \hat{U}_N = \left( \frac{3}{R_C} + j3 \cdot \omega \cdot C \right) \cdot \frac{\frac{1}{R_P}}{\frac{1}{R_P} + \frac{3}{R_C} + j3 \cdot \omega \cdot C} \cdot U_f \quad (1.31)$$

V případě dobře udržované zdravé sítě je dle [3] svodový odpor 20 – 50 krát větší než kapacitní reaktance, což vede k dalšímu zjednodušení v podobě vypuštění svodu z výše uvedených vztahů. Pro poruchový proud při kovové zemní poruše ( $R_P = 0$ ) pak platí známý vztah (1.32), který je v literatuře uváděn jako *kapacitní proud sítě*. Jelikož kapacita  $C$  je dána rozsahem sítě, je tak i kapacitní proud měřítkem<sup>2</sup> pro rozsah sítě a tím i pro způsob provozu uzlu transformátoru. Pro kovovou poruchu zároveň platí další známá poučka  $U_N = U_f$ .

$$\hat{I}_{POR} = j3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_f = \hat{I}_{KAP} \quad (1.32)$$

Pro napětí jednotlivých fází platí vztahy (1.33) až (1.35), které korespondují jak se vztahy (1.24) až (1.26), tak s modelem sítě, ve kterém lze pomocí jednoduchých smyček popsat jednotlivá napětí.

$$\hat{U}_R = \hat{U}_{iR} - \hat{U}_N = U_f - \frac{\frac{1}{R_P}}{\frac{1}{R_P} + \frac{3}{R_C} + j3 \cdot \omega \cdot C} \cdot U_f \quad (1.33)$$

$$\hat{U}_S = \hat{U}_{iS} - \hat{U}_N = \hat{a}^2 \cdot U_f - \frac{\frac{1}{R_P}}{\frac{1}{R_P} + \frac{3}{R_C} + j3 \cdot \omega \cdot C} \cdot U_f \quad (1.34)$$

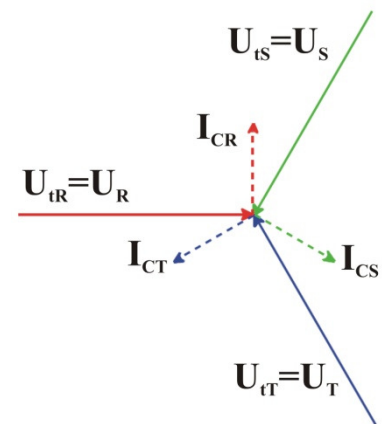
$$\hat{U}_T = \hat{U}_{iT} - \hat{U}_N = \hat{a} \cdot U_f - \frac{\frac{1}{R_P}}{\frac{1}{R_P} + \frac{3}{R_C} + j3 \cdot \omega \cdot C} \cdot U_f \quad (1.35)$$

Jak je patrné, napětí postižené fáze  $R$  i zdravých fází  $S$  a  $T$  silně závisí na odporu poruchy  $R_P$ . Pro případ kovové poruchy (viz. Obr 1.10) bude napětí fáze  $R$  rovno nule a zároveň lze úpravou dokázat, že napětí zdravých fází vzroste z fázové hodnoty na hodnotu sdruženou. Naopak pro vysoko ohmovou poruchu bude napětí  $U_N$  tak malé, že ani nemusí být porucha zpozorována<sup>3</sup>. Nejlépe jsou pak poměry v síti patrné z fázorových diagramů.

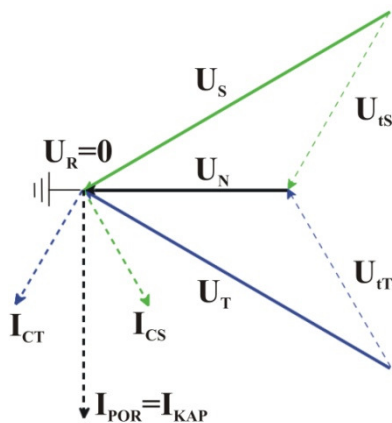
<sup>2</sup> Dle ČSN 33 3070 se izolované sítě mohou provozovat do 10 A kapacitního proudu, od 10 A je doporučeno kompenzovat a od 20 A je nutné kompenzovat. Venkovní sítě s kompenzací se smějí použít do 100 A kapacitního proudu, pro smíšené sítě do 300 A a pro kabelové sítě do 450 A.

<sup>3</sup> Dle ČSN 33 3070 se jedná o zemní spojení v případě, kdy hodnota uzlového napětí  $U_N$  překročí 33% z hodnoty fázového napětí  $U_f$ . V praxi bývá nastavena hodnota pro vyhodnocení ZS v rozmezí 20-25% z  $U_f$ .

Na obr. 1.9 je zachycena síť v bezporuchovém stavu (není uvažována žádná nesymetrie). Kapacitní proudy jednotlivých fází jsou vzájemně posunuty o  $120^\circ$ , čímž je jejich vektorový součet roven nule. Obr. 1.12 a obr. 1.11 pak představují fázorové diagramy napětí a proudů pro odporové zemní spojení. Jak je patrné, uzlové napětí  $U_N$  se pohybuje po křivce podobné půlkružnici, což může



**Obrázek 1.9 – Fázorový digram v bezporuchovém stavu.**

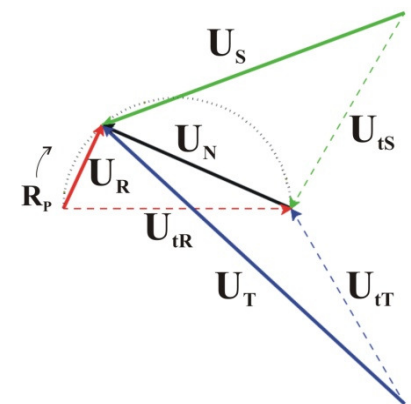


**Obrázek 1.11 – Fázorový diagram pro kovové zemní spojení.**

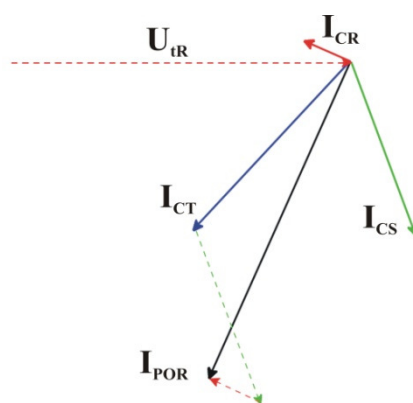
zapříčinit stav, kdy na fázi  $T$  vznikne přepětí větší než hodnota sdruženého napětí a zároveň na fázi  $S$  může v jistých hodnotách odporu  $R_P$  nastat výrazné podpětí.

Všechny doposud zmíněné úvahy o napěťových poměrech se týkají pouze ustáleného stavu, který ovšem není zdaleka tak kritický, jako při přechodných jevech vznikajících při vzniku a zániku ZS. Zvláštní kapitolou je

pak přerušované ZS, jehož výskyt je v praxi nejčastější a jehož důsledky mohou být velmi nepříznivé zejména z hlediska vysokých přepětí. Významnou roli má v tomto kapacitní charakter poruchového proudu, který vede k problémům se samozhášením. Pokud má dojít k uhašení oblouku, bude tomu pravděpodobně v proudové nule. Naneštěstí právě v tomto okamžiku je napětí postižené fáze ve svém maximu. Ačkoli vlivem indukčností v obvodu



**Obrázek 1.10 – Fázorový diagram napětí pro odporové zemní spojení.**



**Obrázek 1.12 – Fázorový diagram proudů pro odporové zemní spojení.**

nedojde k okamžitému skoku napětí na kapacitě

z nuly na maximum, jedná se stále o velmi rychlý přechodový děj, jehož frekvence je dána kapacitami a indukčnostmi v obvodu a pohybuje se od stovek do tisíců Hertzů. Plné napětí na kapacitě se tedy objeví ve velmi krátkém čase, ve kterém se prostředí nestačí deionizovat a dojde k opětovnému zápalu. Popsaný děj vede k přerušovanému zemnímu spojení, jehož podrobný popis



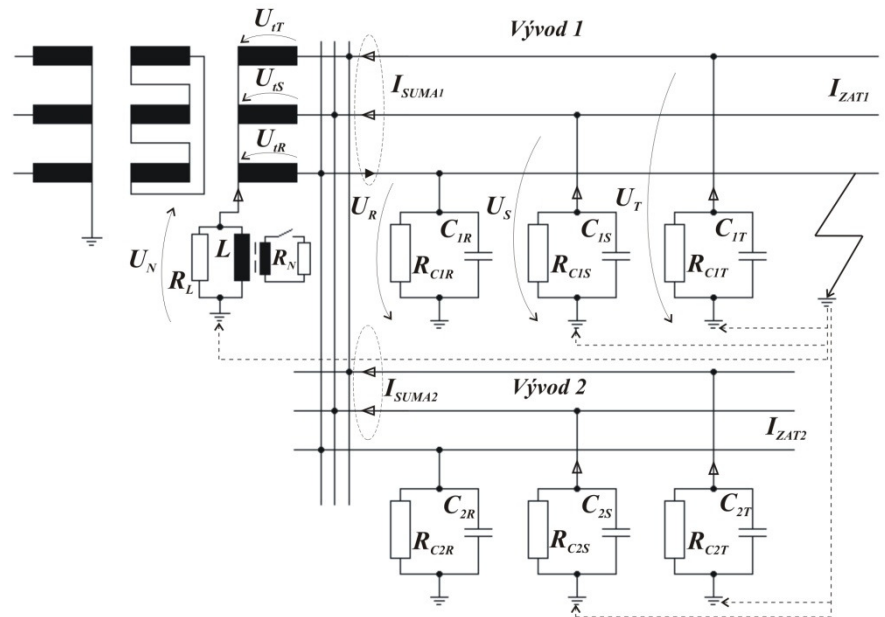
poskytují dvě teorie – jedna Petersenova (1917) a druhá Peterse-Slepianova (1923). Základní rozdíl mezi těmito teoriemi je předpoklad, kdy dojde k uhašení oblouku. Dle první k uhašení dochází v proudové nule přechodné složky proudu a v extrémním případě může docházet k přepětí v nepostižené fázi až 7,5 násobku  $U_f$ . Dle druhé pak oblouk hasne v proudové nule síťové frekvence a přepětí může být 3,5 násobku  $U_f$ . Ačkoli u skutečných sítí jsou takto vysoká přepětí snížena vlivem tlumení, jedná se stále o velmi nepříjemný fakt, který není vhodné opomíjet.

Výše zmíněné poznatky lze shrnout do výhod, nevýhod a možného použití izolovaných sítí. Jako hlavní výhoda, především z pohledu ekonomického, zdá se být fakt, že nejsou použita žádná zařízení na kompenzaci či omezení poruchového proudu a s tím související automatika ladění tlumivky a připínání odporníku. Na druhou stranu, za významnou nevýhodu lze považovat problémy se samozhášením a tím vznikající přepětí. Je pak tedy otázkou, zda původní úspora nákladů nebude anulována dodatečnými náklady na možná zničená zařízení právě vlivem přepětí. V historii byly provedeny experimenty, které se snažily určit meze, kdy ještě dojde k efektu samozhášení a kdy už je oblouk stabilní. Jako takovou mez, závislou na konkrétních podmínkách, lze pro 22 kV považovat dle [22] 8-10 A. Zároveň je tu podmínka dodržení dotykových a krokových napětí, která jsou přímo úměrná poruchovému proudu a odporu uzemnění. I tato podmínka vede ke snaze mít poruchový proud v jistých mezích doporučených normou ČSN 33 3070. Z těchto popsaných nevýhod pak pramení možné uplatnění izolovaného uzlu a to jen na malé celky a sítě, jako například vlastní napájení elektráren a průmyslových závodů.

### 1.3.2 Kompenzované sítě

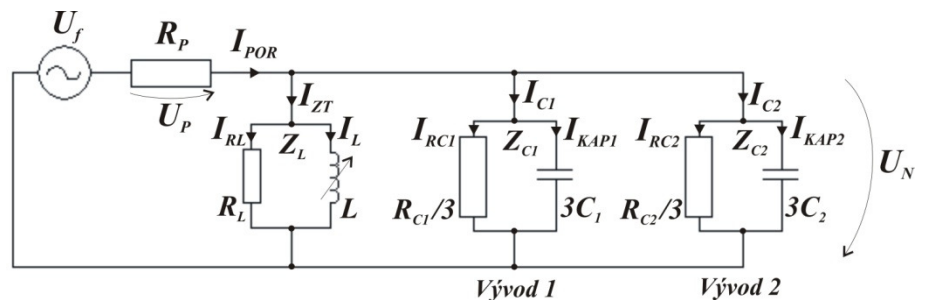
Kompenzované sítě patří dlouhodobě k nejrozšířenějšímu způsobu provozu jak u nás, tak ve světě. Vzešly jako logický důsledek nevýhod izolovaných sítí, které se s rostoucím rozsahem stávaly více a více nepoužitelné. Hledala se řešení a jedno velmi elegantní se našlo. Roku 1916 přišel Waldemar Petersen s nápadem zapojit mezi uzel transformátoru a zem tlumivku. Jak je známo, při zemní poruše se mezi uzlem a zemí objeví napětí, které právě v součinnosti s tlumivkou vybudí proud induktivního charakteru. Místem poruchy tak teče nejen poruchový kapacitní proud, ale i proud induktivní. Tyto dva proudy jsou vzájemně posunuty o  $180^\circ$  (jsou v proti fázi) a tedy se v případě vhodného naladění tlumivky ruší. Myšlenka prostá, za to velmi účinná.

Model kompenzované sítě se zemním spojením je uveden na obr. 1.13. Petersenova tlumivka je reprezentována nejen indukčností  $L$ , ale i odporem představujícím činné ztráty v tlumivce  $R_L$ . Zároveň je naznačeno i připínání odporníku  $R_N$ , který slouží k vyhledání poruchy<sup>4</sup>.



Obrázek 1.13 – Zemní spojení v kompenzované síti.

Na obr. 1.14 je pak zjednodušené náhradní schéma, pro které platí stejné podmínky jako pro izolovanou síť. Jedinou výjimkou je nemožnost zanedbání svodového odporu  $R_C$ , jehož proud společně s proudem odporu tlumivky  $R_L$  a proudy vyšších harmonických tvoří tzv. nevykompenzovatelnou část poruchového proudu. Další složka poruchového proudu je dána rozdílem kapacitního proudu sítě a induktivního proudu tlumivky, který vzniká nepřesným vyladěním.



Obrázek 1.14 – Zjednodušené náhradní schéma – kompenzovaná síť.

Pro uzlové napětí a poruchový proud lze psát následující vztahy, přičemž platí (1.30):

$$\hat{U}_N = \frac{1}{R_P} \cdot U_f \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_P} + \frac{3}{R_C} + \frac{1}{R_L} + j\left(3 \cdot \omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right)} \quad (1.36)$$

$$\hat{I}_{POR} = \left( \frac{3}{R_C} + \frac{1}{R_L} + j\left(3 \cdot \omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right) \right) \cdot \hat{U}_N \quad (1.37)$$

<sup>4</sup> Zemní spojení je v kompenzovaných sítích nejčastěji vyhledáváno pomocí detekce činné složky netočivého proudu (tzv. wattmetrická metoda). Jelikož činnou složku není možné vykompenzovat, lze pro lokalizaci poruchy využít právě ji. Postižený vývod má tuto složku nejen vyšší, ale především opačného směru než ostatní vývody. Poněvadž je však zbytkový proud stále poměrně malý (jednotky %  $I_{KAP}$ ), je pro správnou funkci metody na krátký okamžik (1s) uměle navýšen pomocí připojení odporníku (1  $\Omega$ ) do pomocného výkonového vinutí.

Pokud bude uvažováno čistě kovové spojení s téměř nulovým odporem  $R_P$ , lze vztah (1.37) zjednodušit na vztah (1.38).

$$\hat{I}_{POR} = \left( \frac{3}{R_C} + \frac{1}{R_L} + j \left( 3 \cdot \omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L} \right) \right) \cdot U_f = I_W + j(I_{KAP} - I_L) \quad (1.38)$$

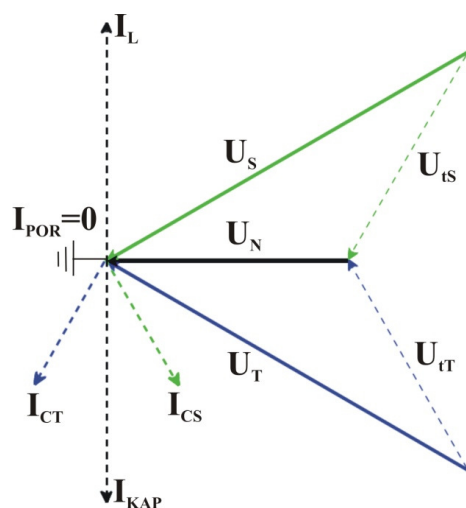
Kde:  $I_W$  [A] je činná složka poruchového proudu (svodový proud zemního spojení),  $I_{KAP}$  [A] je kapacitní proud sítě a  $I_L$  [A] je proud Petersenovy tlumivky.

Z výše uvedených vztahů lze mimo jiné odvodit i indukčnost a výkon tlumivky, při níž dojde k plné kompenzaci. Tento stav je dán rovností proudů  $I_{KAP}$  a  $I_L$ , ze které plyne vztah (1.39), což je zároveň podmínka pro paralelní rezonanci mezi tlumivkou a kapacitou sítě. Indukčnost a výkon v rezonanci jsou pak dány vztahy (1.40) a (1.41). Blíže bude o ladění tlumivky a problematice s tím spojené pojednáno v kapitole 1.5.

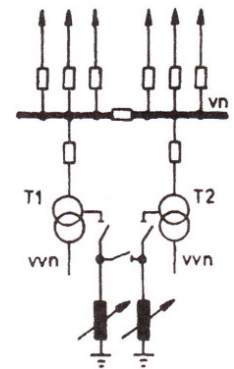
$$3 \cdot \omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L} = 0 \quad (1.39) \quad \Rightarrow \quad L_{REZ} = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} \quad (1.40) \quad Q_{REZ} = \frac{U_f^2}{\omega \cdot L_{REZ}} \quad (1.41)$$

Indukčnost kompenzačních tlumivek pro sítě 22 kV se dle [4] pohybuje v rozmezí 0,14 až 3,6 H a výkony v rozmezí stovek kVAr až po jednotky MVar. Při respektování budoucího rozšíření sítě se doporučuje volit výkon o 30-50% více, než odpovídá současnému stavu ( $Q_{REZ}$  nyní). Do budoucna tím bude zajištěna dostatečná rezerva a vyladěného stavu bude možno dosáhnout i při různém zapojení sítě v širokém rozsahu výkonu tlumivky (ČSN 33 3070 uvádí 30 až 90%).

Dle ČSN 33 3070 se počet tlumivek volí podle počtu transformátorů, samostatně provozovaných přípojníc a velikosti kapacitního proudu. Jejich umístění má být



Obrázek 1.16 – Fázorový diagram pro kovové zemní spojení bez  $R_L$  a  $R_C$



Obrázek 1.15 – Připojení tlumivek k napájecím transformátorům[1].

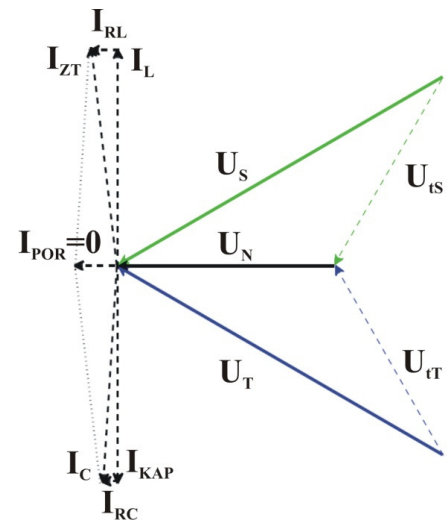
v bezprostřední blízkosti napájecích transformátorů a připojeny mohou být přes

jednopolové odpojovače, nebo přímo do uzlu. Jedno z možných zapojení je zobrazeno na obr. 1.15.

Napětové a proudové poměry jsou patrné z následujících fázorových diagramů. Na obr. 1.16 je zachyceno kovové zemní spojení bez uvažování

svodových odporů a při absolutním vyladění. Při tomto silně zidealizovaném stavu by

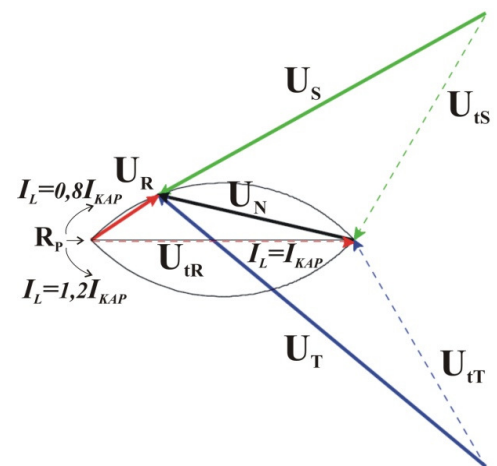
poruchový proud byl nulový. Jak je ovšem vidět z obr. 1.17, kde jsou již svodové odpory uvažovány, poruchový proud v žádném případě nulový nebude. Bude tvořen nejen svodovými zemními proudy ( $I_{RL}$  a  $I_{RC}$ ), ale i proudy vyšších harmonických (které nejsou kompenzovány) a také jalovým proudem daným nepřesným vyladěním. Tento vykompenzovaný poruchový proud je nazýván **zbytkový proud** a mívá řádově velikost jednotek procent z kapacitního proudu sítě. Dle ČSN 33 3070 má být do 10%  $I_{KAP}$  a zároveň musí být menší než 60 A.



Obrázek 1.17 – Fázorový diagram pro kovové zemní spojení s  $R_L$  a  $R_C$

Na obr. 1.18 je pak zobrazeno odporové zemní spojení v podkompenzovaném stavu ( $I_L < I_C$ ). Podkompenzovaný ( $I_L = 0,8I_C$ ), překompenzovaný ( $I_L = 1,2I_C$ ) a vykompenzovaný ( $I_L = I_C$ ) stav je respektován jako parametr příslušných křivek, po kterých se pomyslně pohybuje potenciál země při zvyšování odporu  $R_p$ . Napětí zdravých fází se tedy může pohybovat v rozličných mezích v závislosti na odporu  $R_p$  a na vyladěním tlumivky.

Na vyladěním tlumivky a hodnotě odporu poruchy silně závisí i uzlové napětí  $U_N$  a poruchový proud  $I_{POR}$ . Jejich závislosti na těchto proměnných je vynesena na obr. 1.19 a obr. 1.12, ze kterých je zřejmé, že při vyladěném stavu je  $U_N$  největší a naopak  $I_{POR}$  nejmenší. K vymodelování těchto grafů posloužil výpočetní program MATLAB.

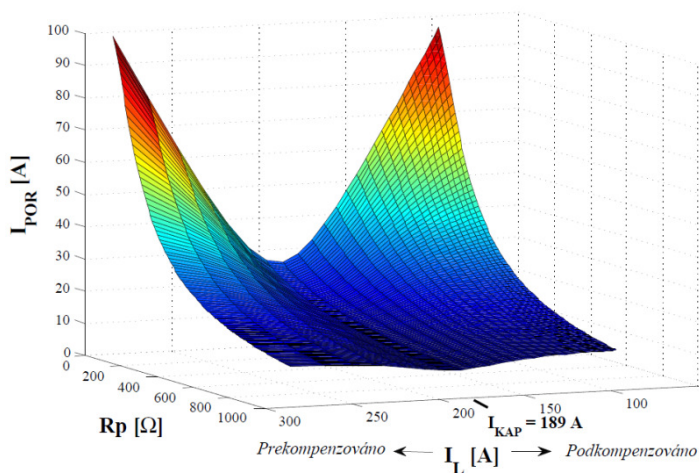


Obrázek 1.18 – Fázorový diagram napětí pro odporové zemní spojení.

Snížení poruchového proudu vede k nižším nárokům na uzemnění při stálém dodržení krokových a dotykových napětí. Toto lze ovšem považovat pouze za první výhodu kompenzovaných sítí. Druhá přímo pramení z více méně činného charakteru poruchového proudu. V tomto případě totiž nedochází k tak rychlému nárůstu obnoveného napětí postižené fáze, prostor má čas na deionizaci a podmínky pro obnovení elektrické pevnosti okolí jsou tak výrazně zlepšeny (nejlépe při úplném vyladěním). Pravděpodobnost znovu zapálení je mnohonásobně snížena. Jinými slovy je výrazně zlepšena funkce samozhášení, z čehož také plyne jeden z názvů pro Petersenovu tlumivku – **zhášecí tlumivka**. Je zřejmé, že tento samozhášecí efekt se uplatní

zejména u venkovních vedení a to jen při přechodných poruchách, které se ovšem vyskytují nejčastěji. Síť je pak možno provozovat bez sebemenších zásahů. Dojde-li ovšem k poruše stabilní, která samovolně nezmizí, je nutný zásah dispečera a výjezdové čtyry. V tuto chvíli je z principu<sup>5</sup> možné síť nadále provozovat i se zemním spojením, praxe ovšem velí provozovat síť pouze *po dobu nezbytně nutnou k vyhledání poruchy a poté postižený úsek odpojit*. Vzhledem ke zvýšeným napětím ve zdravých fázích je tak eliminována možnost další poruchy na izolačně slabém místě, které může být v úplně jiné části sítě.

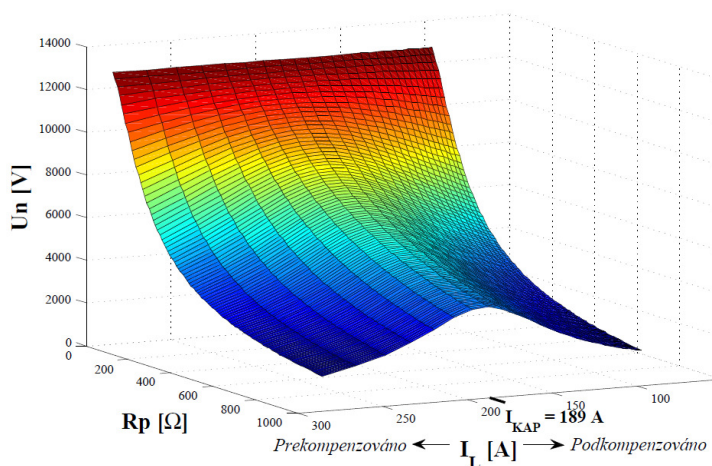
Snížením rizika samozápalů se taktéž zlepšila situace okolo přechodných přepětí, která jsou podstatně nižší než u izolované sítě. Zároveň však vyvstaly u kompenzovaných sítí jiné potíže. Jednou z nich může být výrazná citlivost na nesymetrii v síti, která byla doposud



Obrázek 1.20 –  $I_{POR}$  jako funkce odporu  $R_p$  a proudu  $I_L$ . Modelováno v programu MATLAB.

(hodnota  $U_N$  sice překročila 33%, ale ne vlivem ZS), a proto je v těchto chvílích doporučeno provádět ztlumení sítě pomocí přídavného odporníku, který se běžně používá pro vyhledávání poruch.

<sup>5</sup> Kompenzovanou i izolovanou síť VN lze provozovat i se ZS aniž by to odběratel na straně nízkého napětí zpozoroval. Je to dáno zapojením distribučního transformátoru 22/0,4 kV, které je výhradně Dyn1. Jelikož při ZS je trojúhelník sdružených napětí zachován, je i rozložení napětí na cívkách jednotlivých fází stejné jako v bezporuchovém stavu.



Obrázek 1.19 –  $U_N$  jako funkce odporu  $R_p$  a proudu  $I_L$ . Modelováno v programu MATLAB.

opomíjena a o které bude podrobněji pojednáno v kapitole 1.4. Dále se pak mohou vyskytovat problémy spojené se zemními zkraty ve VVN síti, ke které je napájecí transformátor připojen. Kompenzované sítě jsou citlivé na napájení nesymetrickým napětím s netočivou složkou a dle [3] může dojít k rezonančním přepětím. Při takovém stavu může být signalizováno tzv. *falešné zemní spojení*

Výše popsané vlastnosti předurčují použití kompenzace zemních kapacitních proudů převážně pro venkovní vedení, kde se může v plné míře uplatnit samozhášecí efekt a odeznění přechodné poruchy. Stejně tak smíšené sítě v jistém poměru venkovní/kabelové lze takto provozovat. Ale u velkých kabelových celků již pak kompenzace postrádá svůj hlavní význam (samozhášení), jelikož v kabelu lze těžko očekávat přechodnou poruchu (hoří-li zde oblouk, pravděpodobně dojde k destrukci dalších částí a k rozšíření poruchy na další fáze). Pro tyto případy se již nevyplatí provozovat drahou zhášecí tlumivku (s enormně velkým výkonem) a se všemi automatikami. Pro velké kabelové celky ( $I_{KAP} > 450$  A) se tak uzemnění provádí přes nízkohmový odpor.

### 1.3.3 Síť s uzlem uzemněným přes odpor

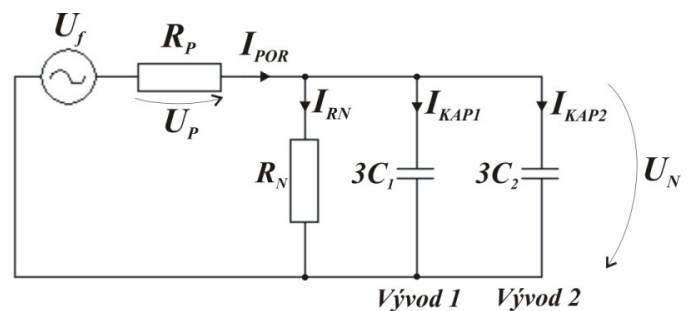
Sítě s uzlem uzemněným přes odpor patří na našem území historicky k těm mladším (70. léta). Jejich zavedení se objevuje jako reakce na rozsáhlé budování kabelových celků a z toho plynoucí nevýhodnost použití zhášecí tlumivky. Do uzlu transformátoru je tedy připojen malý výkonový odpor (desítky  $\Omega$ ), který slouží především k omezení poruchového proudu (zde již nazýván zkratovým proudem) a zároveň napomáhá k tlumení přechodných přepětí. Aby bylo tlumení účinné, je dle [3] třeba splnit podmínku (1.42).

Pro analýzu napěťových a proudových poměrů lze vycházet přímo z obecného náhradního schématu (obr. 1.6) nebo lze s jistou chybou použít zjednodušené schéma (obr. 1.21). Chyba bude dle [3] tím menší, čím větší bude výkon napájecího transformátoru a čím kratší budou kabelová vedení.

V případě uzemnění uzlu přes malý odpor lze bez vážnějších důsledků vypustit svodové odpory, které jsou mnohonásobně větší. Pro uzlové napětí a poruchový proud lze poté psát následující vztahy:

$$\hat{U}_N = \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_N} + j3 \cdot \omega \cdot C} \cdot U_f \quad (1.43)$$

$$I_{RN} = \frac{U_f}{R_N} \geq I_{KAP} \quad (1.42)$$



Obrázek 1.21 – Zjednodušené náhradní schéma – síť s uzemněním přes odpor.

$$\hat{I}_{POR} = \left( \frac{1}{R_N} + j3 \cdot \omega \cdot C \right) \cdot \hat{U}_N \quad (1.44)$$

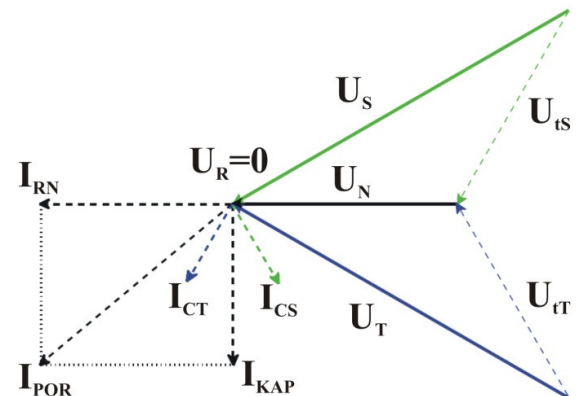
Při uvažování kovové poruchy se vztah (1.44) zjednoduší na (1.45). S tímto vztahem koresponduje fázorový diagram na obr. 1.22, ze kterého je zřejmé, že oproti předešlým způsobům provozu uzlu dochází k podstatnému navýšení poruchového proudu. Jelikož jmenovitý proud uzlovým odporníkem může být i 1000 A a kapacitní proud sítě až stovky A, je očividné, že poruchy v takto provozované síti musí být v krátké době (jednotky sekund) vypnuty. Takto vysoký proud má i svou výhodu a to snadnou lokalizaci postiženého vývodu.

$$\hat{I}_{POR} = \left( \frac{1}{R_N} + j3 \cdot \omega \cdot C \right) \cdot U_f = I_{RN} + I_{KAP} \quad (1.45)$$

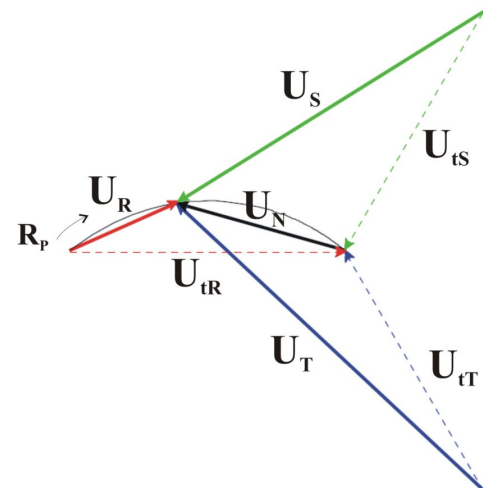
Na obr. 1.23 je pak zobrazen fázorový diagram pro odporovou poruchu. I zde je patrný sklon k přepětí zdravých fází, které ovšem nastává pouze v malém rozsahu poruchového odporu -  $U_N$  se blíží k nule již při několika desítkách  $\Omega$  (podle velikosti  $I_{KAP}$ ). Zároveň tento stav trvá jen po krátkou dobu, a proto tato přepětí nepředstavují potíže.

Ani přechodná přepětí u těchto sítí nepředstavují potíže v případě návržení hodnoty odporu podle výše popsané podmínky (1.42). Další kritérium pro návrh odporu je pak omezení poruchového proudu na přijatelné meze především z pohledu návrhu uzemnění a bezpečnosti zařízení, případně dodržení krokových a dotykových napětí. Zároveň je vhodné zohlednit velikost odporu i z důvodu použití jednoduchých nadproudových zemních ochran.

Výše popsané vlastnosti odporově uzemněných sítí vedou k jejich použití pro venkovní sítě s velkým rozsahem a především pro rozsáhlé kabelové celky.



Obrázek 1.22 – Fázorový diagram pro kovový zemní zkrat.

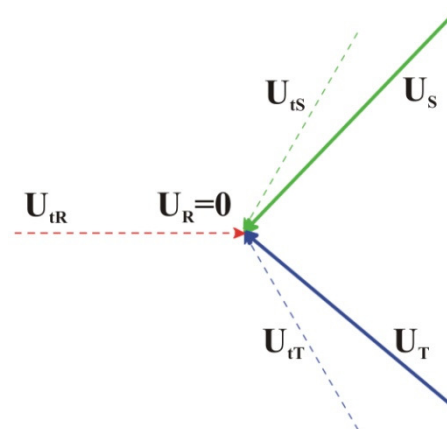


Obrázek 1.23 – Fázorový diagram napětí pro odporové zemní spojení.

### 1.3.4 Síť s přímo uzemněným uzlem

Sítě s přímo uzemněným uzlem neboli účinně<sup>6</sup> uzemněné nejsou považovány za alternativu pro provedení uzlu distribučních sítí VN. Je to dáno především velikostí zkratových proudů, které mohou být nebezpečné z hlediska krokových a dotykových napětí, rušení sdělovacích vedení či rozsáhlé destrukce v místě poruchy. Z tohoto důvodu bude o problematice účinného uzemnění pojednáno jen velmi stručně.

Pro analýzu jednofázového zkratu lze přímo použít náhradní schéma na obr. 1.6 a k němu odvozené vztahy. Přičemž pro uzlovou impedanci platí  $Z_N \rightarrow 0$  a příčnou impedanci  $Z_C$  je možno vzhledem k její velikosti vynechat. Poruchový proud pak bude mít činný či induktivní charakter (závisí na poměru  $R/X$  zkratové impedance) a jeho velikost bude v porovnání s ostatními způsoby provedení uzlu největší. Napětí zdravých fází zůstávají v ideálním případě bez změny oproti



Obrázek 1.24 – Fázorový diagram napětí pro kovový zkrat.

bezporuchovému stavu, avšak ve skutečnosti dojde k odchylce v natočení i amplitudě, což je dáno rozdílem mezi impedancemi  $Z_0$  a  $Z_1$ . V místě zdroje je sice uzlové napětí téměř nulové díky přímému uzemnění, ovšem v místě poruchy tomu tak není. Aplikací vztahů (1.24) až (1.26) lze získat výsledky pro napětí zdravých fází, které jsou rozličné vzhledem ke vzdálenosti místa zkratu od napájecího transformátoru i vzhledem k odporu poruchy. S blížící se vzdáleností od místa zkratu k napájecímu transformátoru se napětí zdravých fází „narovná“ až plynule přejde na hodnoty  $U_{IT}$  a  $U_{IS}$  (napětí na svorkách transformátoru).

Přímo uzemněné sítě mají dvě nesporné výhody. První je naprostá jednoduchost provedení a s tím související nízká cena (žádná mimořádná zařízení nejsou vyžadována). Druhou je pak jednoznačně nejmenší přepětí ve zdravých fázích během zemní poruchy a tím menší namáhání izolace. Velkou nevýhodou je na druhou stranu enormně veliký poruchový proud, kvůli kterému je nutné okamžité vypnutí. V distribučních sítích VN, kde je velká četnost přechodných poruch, nepřipadá časté vypínání v úvahu především z důvodu připojení mnoha zákazníků, kterým by mohla být způsobena ztráta. Tuto otázku může do jisté míry řešit automatika opětovného zapnutí, přesto se přímé uzemnění na našem území používá výhradně na hladinách ZVN, VVN a NN, kde je jejich nasazení výhodné až nutné.

<sup>6</sup> Soustava je označována jako účinně uzemněná, pokud efektivní hodnota napětí zdravých fází nepřekročí v době zemní poruchy hodnotu 80% sdruženého napětí; v opačném případě je soustava uzemněna neúčinně. Síť izolované, kompenzované a uzemněné přes malý odpor jsou neúčinně uzemněné. Síť s přímo uzemněným uzlem pak účinně uzemněné.



## 1.4 Napěťová nesymetrie na VN

V předchozích částech byla často zmiňována napěťová nesymetrie, která vzniká především jako důsledek nesymetrie kapacit proti zemi jednotlivých fází, v menší míře pak nesymetrií svodových odporů. Nesymetrie vzniklá nerovnoměrným zatížením fází je zanedbána.

Různé hodnoty kapacit jsou dány uspořádáním jednotlivých vodičů, jejichž elektrická pole se navzájem ovlivňují. V daném uspořádání pak může existovat pozice, která je ovlivněna více než zbylé dvě a tím i kapacita fáze na této pozici bude jiná. Toto se zřejmě nebude týkat kabelových vedení, která jsou zaprvé velmi symetrická a zadruhé vzájemně odstíněná (má-li každý vodič své stínění). Výpočtem kapacit venkovního vedení pro jednotlivá uspořádání se blíže zabývá kapitola 2.1.1, ze které budou pro nynější potřebu vytaženy některé výsledky a postřehy.

Nesymetrie svodových odporů bude dána snížením izolační schopnosti některé z fází vlivem poškození izolátoru či přílišným přiblížením k porostu. Tyto stavy pak mohou přerůst až v zemní poruchu.

Důsledkem rozvážení fázových napětí je napětí nulové (resp. uzlové), jehož velikost závisí na způsobu provozu uzlu. Pro porovnání chování jednotlivých možností poslouží následující rozbor.

Model sítě na obr. 1.1 je popsateľný soustavou rovnic, ze které lze vyjádřit obecný vztah pro uzlové napětí:

$$\hat{U}_N = U_f \cdot \frac{(\hat{Y}_R + a^2 \cdot \hat{Y}_S + a \cdot \hat{Y}_T)}{\hat{Y}_N + \hat{Y}_R + \hat{Y}_S + \hat{Y}_T} \quad (1.46)$$

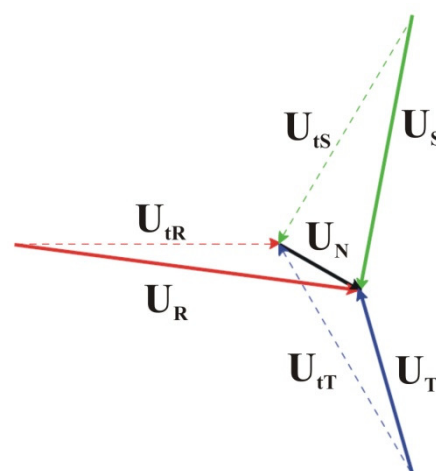
Kde:  $\hat{Y}_{R,S,T}$  [S] jsou příčné fázová admittance definované svodu a kapacitní susceptance následovně  $\hat{Y}_i = G_i + j\omega \cdot C_i$ ,  $\hat{Y}_N$  [S] je admittance zapojená do uzlu transformátoru.

Pro získání kvalitativních výsledků postačí zavést střední hodnotu admittance a každou fázovou admittanci pak vyjadřovat pomocí této střední hodnoty a příslušné odchylky (1.47).

$$\hat{Y}_i = \bar{Y} + \Delta\hat{Y}_i = G + j\omega \cdot C + \Delta G_i + \Delta j\omega \cdot C_i \quad (1.47)$$

Při respektování matematických zákonitostí jako rovnice (1.48) lze vztah pro uzlové napětí poupravit do

$$\begin{aligned} 1 + a^2 + a &= 0 \\ \Delta\hat{Y}_R + \Delta\hat{Y}_S + \Delta\hat{Y}_T &= 0 \end{aligned} \quad (1.48)$$



Obrázek 1.25 – Napěťová nesymetrie.

podoby (1.49), ze které již lze udělat závěry pro jednotlivé způsoby provozu uzlu.

$$\widehat{U}_N = U_f \cdot \frac{(\Delta\widehat{Y}_R + a^2 \cdot \Delta\widehat{Y}_S + a \cdot \Delta\widehat{Y}_T)}{\widehat{Y}_N + 3 \cdot \widehat{Y}} \quad (1.49)$$

Pro *izolovanou síť* je předpoklad  $\widehat{Y}_N \rightarrow 0$ , tudíž vztah pro uzlové napětí nabude tvaru:

$$\widehat{U}_N = U_f \cdot \frac{(\Delta\widehat{Y}_R + a^2 \cdot \Delta\widehat{Y}_S + a \cdot \Delta\widehat{Y}_T)}{3 \cdot \widehat{Y}} \quad (1.50)$$

Jelikož v čitateli jsou pouze vzájemně posunuté odchylky a ve jmenovateli střední hodnota, tedy poměrně větší číslo, bude výsledné uzlové napětí malé – v řádech **jednotek procent z napětí fázového**.

Pro *odporově uzemněný uzel* platí  $\widehat{Y}_N \rightarrow G_N$ , poté pro uzlové napětí:

$$\widehat{U}_N = U_f \cdot \frac{(\Delta\widehat{Y}_R + a^2 \cdot \Delta\widehat{Y}_S + a \cdot \Delta\widehat{Y}_T)}{G_N + 3 \cdot \widehat{Y}} \quad (1.51)$$

Oproti izolované síti přibyl ve jmenovateli člen  $G_N$ , který je řádově větší než  $3\widehat{Y}$  a tedy i než odchylky v čitateli. Výsledkem je ještě menší uzlové napětí než u izolované sítě – **méně než 1 % z fázového napětí**.

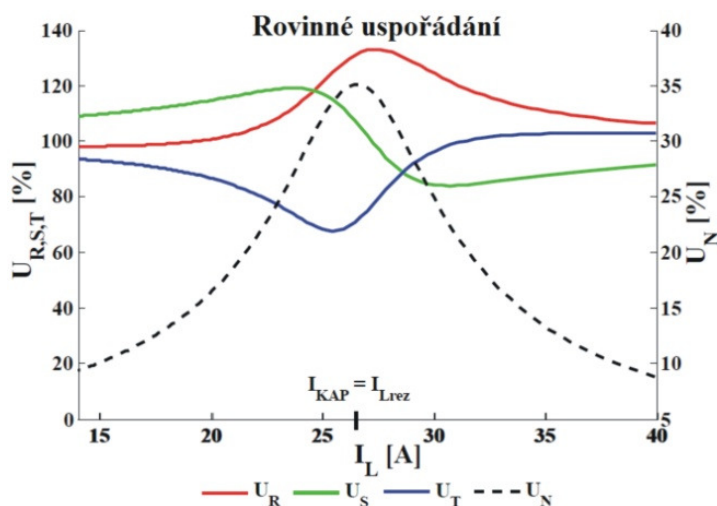
Pro *přímo uzemněný uzel* v ideálním případě platí  $\widehat{Y}_N \rightarrow \infty$ , tedy uzlové napětí se **blíží nule** a v podstatě není měřitelné.

Pro *kompensované síť* platí  $\widehat{Y}_N = G_L - j \frac{1}{\omega \cdot L}$  a uzlové napětí má po rozepsání tvar:

$$\widehat{U}_N = U_f \cdot \frac{(\Delta\widehat{Y}_R + a^2 \cdot \Delta\widehat{Y}_S + a \cdot \Delta\widehat{Y}_T)}{G_L - j \frac{1}{\omega \cdot L} + 3 \cdot G + j3 \cdot \omega \cdot C} \quad (1.52)$$

Zde je situace komplikovanější. Do jmenovatele přibyl svod tlumivky  $G_L$  a induktivní susceptance  $-j1/(\omega \cdot L)$ , která se ovšem při přesném vyladění ruší s kapacitní susceptancí  $j3 \cdot \omega \cdot C$ . Tím ve jmenovateli zůstává pouze zmíněný svod tlumivky a trojnásobek svodu sítě. Obě dvě hodnoty jsou poměrně malé a řádově se blíží k odchylkám v čitateli. To má za následek poměrně velké uzlové napětí, které může **v extrémních případech** dosáhnout až **několika desítek procent z napětí fázového**. V takovém případě není možné provozovat síť vyladěnou, jelikož již při samotném ladění vzroste napětí na tlumivce nad mez signalizující zemní spojení a ladění je ukončeno. Současně i fázová napětí výrazně vzrostou a tím více namáhají izolaci, čímž zvyšují pravděpodobnost poruchy. Běžnější jsou však napětí o velikosti jednotek procent, řádově do 10 %.

Hledají se proto metody, jak tento nežádoucí stav omezit na minimum. Jako první se nabízí rozladit tlumivku na povolenou mez. Tou bývá podmínka pro udržení zbytkového proudu při zemním spojení pod 10%  $I_{KAP}$ . Rozladění má tedy za následek nejen zvýšení poruchového proudu a z toho plynoucí větší kroková a dotyková napětí, ale i větší přepětí vznikající při přerušovaném ZS ve zdravých fázích a zároveň i větší přepětí obnoveného napětí postižené fáze. Tato možnost se v praxi používá, ačkoli obnáší zmíněná negativa. Jisté vylepšení přináší provozování sítě rozladěné, přičemž v okamžiku zjištění zemního spojení je provedeno rychlé doladění na předem definovanou pozici.

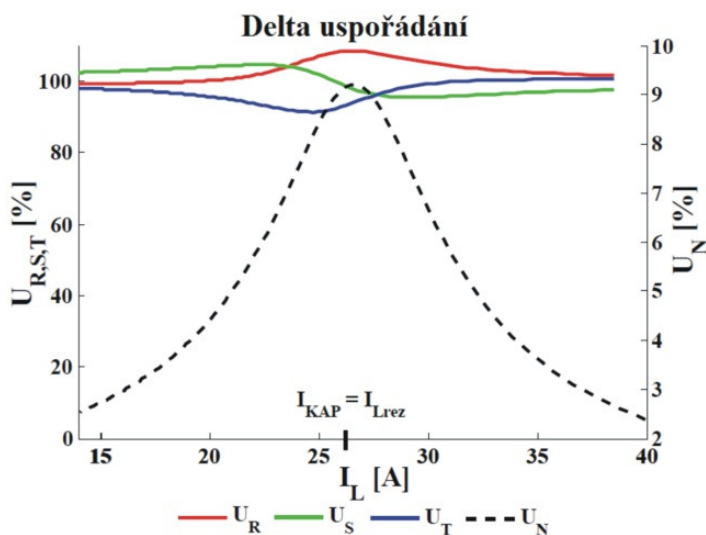


Obrázek 1.26 – Fázová nesymetrie pro rovinné uspořádání.

Druhá možnost vyplývá

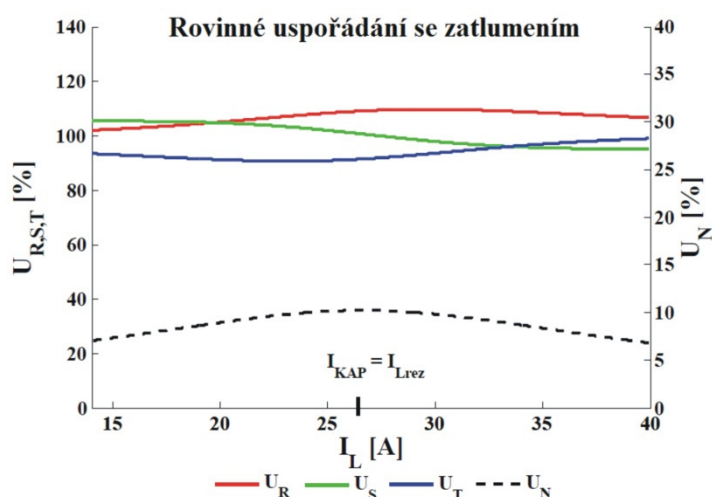
z možného uspořádání vodičů. V kapitole 2.1.1 bude ukázáno, že např. rovinné uspořádání přináší mnohem větší kapacitní nesymetrii než uspořádání Delta, které je do trojúhelníku a od pohledu více symetrické. Rozdíl je patrný z obr. 1.26 a obr. 1.27, kde jsou pro výpočet použity právě hodnoty ze zmíněné kapitoly. Pro uspořádání Delta je charakteristická mnohem menší nesymetrie a to je důvod, proč jsou trojúhelníková uspořádání (Delta a Pařát) výhradně používána pro výstavbu nových vedení.

Třetí, taktéž v praxi používaná a osvědčená metoda, je tzv. ztlumení sítě pomocí přídavného odporu, který je připojen k pomocnému vinutí zhášecí tlumivky. Je tak ztlumen rezonanční obvod tvořený tlumivkou a kapacitami sítě. Jedná se o jednoduchou a velmi účinnou metodu, jejíž efekt je zobrazen na obr. 1.28, kde je ta samá síť s rovinným uspořádáním, ale nyní ztlumená odporem.



Obrázek 1.27 – Fázová nesymetrie pro uspořádání Delta.

V současnosti se do povědomí dostává i další možnost, která neřeší až důsledky kapacitní nesymetrie, ale přímo příčinu. Jedná se o fázové kompenzační tlumivky připojené mezi každou fází a zem. Jejich naladěním lze přímo eliminovat nesymetrie kapacit a tím umožňují přesné vyladění zhášecí tlumivky se všemi vyplývajícími výhodami. Zároveň nemají vliv na funkci ochran při vysoko



Obrázek 1.28 – Fázová nesymetrie pro rovinné uspořádání se zatlumením.

ohmových poruchách, což např. metoda zatlumení mít může. Stinnou stránkou pak mohou být pořizovací náklady, které jsou oproti přídavnému odporu vyšší. Obdobně pak funguje připojení kapacity mezi nejvíce nesymetrickou fází a zem. Jejím naladěním je taktéž možno eliminovat původní nesymetrii.

Poslední možností přicházející v úvahu je tzv. *SVS – Static VAR Systems*. Obecně je tento systém používaný pro regulaci/kompenzaci jalového výkonu v sítích a tedy i napětí. Je v zásadě složený z kondenzátorů, cívek a výkonových spínačů, převážně tyristorů. Mimo jiné užitečné vlastnosti poskytuje i vyrovnání fázových napětí, avšak za nesrovnatelně vyšší cenu, než metody popsané výše.

Dále je vhodné zmínit, že izolační stav našich distribučních sítí (kompenzovaných) se v průběhu let zlepšuje, což má ale za následek vyšší citlivost na nesymetrii kapacit i na napětí přenášena do sítí induktivním či galvanickým vlivem ze sousedních nebo napájecích sítí.

Závěrem pak stručná zmínka o tzv. *činiteli útlumu sítě  $\alpha$*  a *činiteli nesymetrie  $\varepsilon$* . Oba jsou definovány v normě ČSN 33 3070 a slouží pro porovnávání jednotlivých sítí. Mají tvar:

$$\alpha = \frac{I_W}{I_{KAP}} \quad (1.53)$$

$$\varepsilon = \frac{U_{N-rez}}{U_{N-ZT}} \cdot \alpha \quad (1.54)$$

Kde:  $\alpha$  [-] je činitel útlumu sítě,  $I_W$  [A] je činný svodový proud,  $I_{KAP}$  [A] je kapacitní proud sítě,  $\varepsilon$  [-] je činitel nesymetrie,  $U_{N-rez}$  [V] je rezonanční napětí na tlumivce a  $U_{N-ZT}$  [V] je jmenovité napětí zhášecí tlumivky.

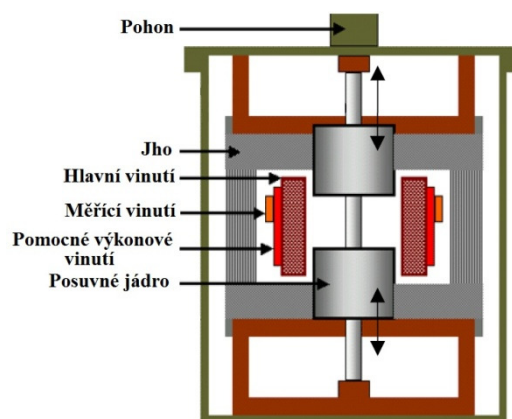
Dle [3] se činitel útlumu pohybuje v našich sítích v rozmezí 0,03 – 0,06, přičemž tato hodnota roste s klesajícím izolačním stavem. Činitel nesymetrie by se měl dle [1] pohybovat pod 0,01.

## 1.5 Problematika ladění zhášecí tlumivky

Z dosud uvedených poznatků o kompenzované síti je zřejmé, že klíčovou roli zde hraje zhášecí tlumivka a její vhodné naladění. V současnosti existuje celá řada metod určených pro ladění tlumivky využívající rozličné algoritmy a postupy. Zároveň se pak různí názory odborné veřejnosti na to, zda provozovat tlumivku vyladěnou, přeladěnou či podladěnou. Cílem této kapitoly je pojednat právě o výše zmíněné problematice.

Již od zavedení zhášecí tlumivky bylo zjevné, že pokud má být tlumivka opravdu použitelná, musí umět reagovat na změny v síti, tedy být přeladitelná. Z počátku byla změna prováděna skokově pomocí odboček, jejichž nastavení prováděla obsluha většinou podle provozních tabulek odpovídajících počtu kilometrů zapojených vedení. Změnou odbočky se měnil počet závitů a tak i indukčnost, reaktance a posléze i proud. Přesnost vyladění tohoto způsobu byla závislá na jemnosti kroku odboček a často se stávalo, že rezonance nebylo možno vůbec dosáhnout. Správnost vyladění se pak kontrolovala čas od času uměle vytvořeným zemním spojením.

Další provedení, které vyřešilo předchozí problém, je plynule laditelná zhášecí tlumivka. S jejím vývojem se na našem území začalo v 50. letech a od té doby je tento koncept stále používán. Změna indukčnosti není prováděna pomocí odboček, ale pomocí posuvného jádra. Jádro je rozpůleno a každá část se může pohybovat nahoru a dolů až do koncových poloh. Změnou polohy je tak měněna vzduchová mezera v cívce a tím její indukčnost (ta se mění lineárně).



Obrázek 1.29 – Plynule laditelná tlumivka [20].



Obrázek 1.30 – Zhášecí tlumivka s odporníkem od firmy EGE [20].

Ze schematického uspořádání naznačeného na obr. 1.29 jsou patrné nejdůležitější prvky. Za zmínku stojí pomocné výkonové vinutí (např. pro připojení odporníku pro vyhledání poruchy nebo zatlumení sítě) a vinutí měřící (s přesností  $\pm 10\%$  je pouze informativní). Na obr. 1.30 je pak pro názornost uvedena reálná zhášecí tlumivka i s odporníkem od firmy EGE.

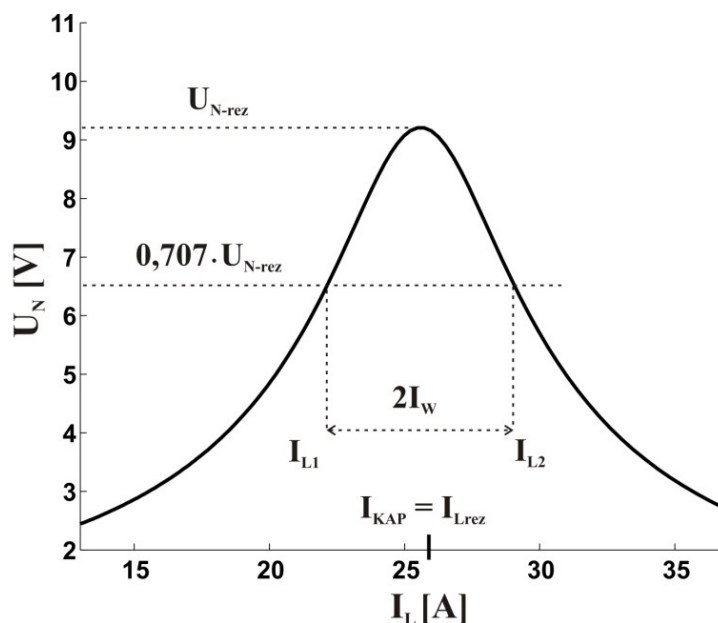
Koncept tlumivek je tedy dlouhodobě stejný, co se ovšem stále vyvíjí, jsou metody nalezení rezonančního vrcholu, respektive parametrů netočivé soustavy.

### 1.5.1 Metody ladění zhašecí tlumivky

Ačkoli se teoreticky nabízí více metod (popsané v [7]), prakticky stojí za úvahu pouze tři – klasická rezonanční metoda, metoda proudové injektáže o síťové frekvenci a metoda proudové injektáže o dvou frekvencích různých od síťové. První dvě patří historicky k těm starším, třetí je pak relativně nová metoda objevující se teprve v posledních letech.

**Rezonanční metoda** je v dnešní době stále nejpoužívanější možností a to především díky své jednoduchosti. Tato metoda využívá ke své funkci přirozenou fázovou nesymetrii, jejímž důsledkem je napětí netočivé složky, které se objevuje mezi uzlem a zemí. Zapojením zhašecí tlumivky do uzlu transformátoru vzniká ve spolupráci s kapacitami sítě proti zemi paralelní rezonanční obvod, který je samozřejmě laditelný. Důsledkem paralelní rezonance je mimo jiné i maximální uzlové napětí, které je s výhodou využíváno právě pro nalezení rezonance. Výsledkem ladícího procesu je pak rezonanční křivka, která o dané síti leccos napoví. Je například možno odečíst kapacitní proud sítě, napětí v rezonančním maximu, či činný svodový proud. Tyto veličiny lze pak použít pro výpočet činitele útlumu a nesymetrie, zmíněných v závěru kapitoly 1.4. Pro názornost je uvedena rezonanční křivka se všemi důležitými hodnotami na obr. 1.31.

Realizace této metody v minulosti spočívala v ručním ladění, kdy obsluha na základě údajů o uzlovém napětí rozhodovala o stavu rezonance. Tento způsob sebou přinášel jistá rizika v podobě nepřesného vyladění. Pokrokem v této oblasti bylo zavedení tzv. automatiky ladění zhašecích tlumivek, která se na základě vstupních informací a daných nastavení o vše postará sama. Tyto automatiky jsou schopny



Obrázek 1.31 – Rezonanční křivka.

pracovat jak v síti s ostrou rezonanční křivkou, tak v síti s plochou rezonanční křivkou. Kde už ale tato metoda ladění selhává, jsou sítě s tak s nízkou nesymetrií, že již není možné měřit uzlové napětí s přijatelnou přesností. Jedná se především o kabelové sítě, které jsou ze své přirozené podstaty symetrické. V takovém případě je nutné použít např. následující metodu.

**Metoda proudové injektáže o síťové frekvenci** rovněž patří k již delší dobu známým. Princip spočívá v injektování krátkého proudového impulsu (řádově velikosti jednotek ampér) do uzlu transformátoru přes pomocné výkonové vinutí tlumivky. Injektovaný proud je měřen společně s uzlovým napětím a za pomoci vhodného algoritmu a znalosti polohy jádra jsou vyhodnoceny parametry netočivé soustavy. Tato metoda je použitelná v sítích s nízkou nesymetrií, avšak mohou nastat případy, kdy dochází k výraznému rušení<sup>7</sup> netočivé složky napětí a je téměř nemožné měřené hodnoty využít k ladění tlumivky. Tento nedostatek je řešen v další metodě.

**Metoda proudové injektáže o dvou frekvencích různých od síťové** je vyvíjena zejména v posledních letech a postupně se začíná prosazovat v situacích, kde jiné metody selhávají. Princip je podobný jako v metodě předchozí, avšak s drobnou, ale významnou změnou. Není použita injektáž proudu o síťové frekvenci, nýbrž o dvou frekvencích různých od síťové. Důvod tohoto kroku je snaha eliminovat rušení netočivé složky napětí, které se projevuje pouze na frekvenci 50 Hz. Výpočetní algoritmus, vycházející z rovnice (1.55), je opět založen na měření napětí netočivé složky a injektovaného proudu. Za předpokladu nízké hodnoty členu, který představuje nesymetrii, lze psát rovnici (1.56). Pomocí této rovnice a faktu, že jsou provedeny dvě injektáže o dvou frekvencích, vzniká soustava dvou rovnic o třech neznámých. Činná složka admitance bude zřejmě v obou případech stejná, počet neznámých bude zredukován na dvě a soustava se stane snadno řešitelná. Pomocí tohoto algoritmu lze tak snadno odhadnout parametry netočivé soustavy a určit poměrně přesně oblast rezonance.

$$\widehat{Y}_{CI-f_n} = \frac{\widehat{I}_{CI-f_n}}{\widehat{U}_{N-f_n}} = \widehat{Y}_{NES} + G + j \left( \omega_n \cdot C_0 - \frac{1}{\omega_n \cdot L} \right) \quad (1.55)$$

$$\widehat{Y}_{CI-f_n} = \frac{\widehat{I}_{CI-f_n}}{\widehat{U}_{N-f_n}} \approx G + j \left( \omega_n \cdot C_0 - \frac{1}{\omega_n \cdot L} \right) \quad (1.56)$$

Kde:  $\widehat{Y}_{CI-f_n}$  [S] je admitance netočivé soustavy pro frekvenci  $f_n$ ,  $\widehat{I}_{CI-f_n}$  [A] je injektovaný proud o frekvenci  $f_n$ ,  $\widehat{U}_{N-f_n}$  [V] je uzlové napětí o frekvenci  $f_n$ ,  $\widehat{Y}_{NES}$  [S] je admitance představující nesymetrii pro frekvenci  $f_n$ ,  $G$  [S] je činná složka admitance (svod),  $\omega_n$  [ $1 \cdot s^{-1}$ ] je úhlová frekvence pro frekvenci  $f_n$ ,  $C_0$  [F] je kapacita proti zemi celé sítě a  $L$  [H] je indukčnost Petersenovy tlumivky.

<sup>7</sup> K rušení uzlového napětí může docházet za prvé delším souběhem vedení VN s vedením VVN či napájením elektrické trakce. V tomto případě se jedná o kapacitní vazbu. Za druhé pak v případě, kdy má napájecí transformátor 110 kV/VN společné uzemnění s napájením střídavé jednofázové trakce 110/27 kV. Zde se jedná o galvanickou vazbu.

Výhodou této metody je použitelnost v sítích s velmi nízkým uzlovým napětím i v sítích se silným rušením. Další pozitivum je zredukování počtu chybných ladění a zbytečných pohybů jádra. Dále pak krátká doba měření a vyhodnocení (dle [7] 240 ms). Nevýhodou bude finanční náročnost, jelikož jsou využívány speciální automatiky a proudový zdroj.

### 1.5.2 Jak správně naladit zhášecí tlumivku?

Jak již bylo zmíněno, názory na vyladění tlumivky se napříč odbornými kruhy různí. V zásadě existují tři stavy – podladěno, vyladěno a přeladěno. Každý z názorů reprezentující daný stav má svůj základ v teoretické i praktické rovině, přičemž nemalou roli můžou hrát konkrétní vlastnosti zkoumané sítě. Úkolem této části je stručně shrnout jednotlivé stavy a uvést možné argumenty.

Za základní možnost lze považovat **stav vyladěno**. Pro přesné vyladění hovoří zejména minimální zbytkový proud tekoucí místem poruchy. To má za následek snížení rizika destrukce materiálu (např. porucha na betonovém sloupu) a zvýšení bezpečnosti osob z hlediska krokových a dotykových napětí (např. porucha na uzemněném kovovém stožáru nebo v distribuční stanici VN/NN). Dalším jednoznačně pozitivním aspektem je minimální přepětí ve zdravých fázích při zániku zemního spojení a to z důvodu menšího namáhání izolace kabelů a minimalizace energie absorbované omezovači přepětí. Oba dva důvody mají vliv na životnost zmíněných zařízení. Také samozhášecí efekt je neúčinnější v tomto stavu. Naopak zápornou vlastností je výrazná citlivost na okolní rušení a nebezpečí velkého fázového rozladění, které je největší právě ve vyladěném stavu.

Dalšími způsoby jsou **podladění** a **přeladění**, která jsou vhodná pro sítě s vysokou nesymetrií, tedy sítě s vysokou hodnotou uzlového napětí ve vyladěném stavu. Mírné podladění (jednotky %) je podle [19] vhodné z hlediska vyšší odolnosti sítě proti rušení a přenosu netočivé složky ze souběžného vedení jiné transformovny. Naopak mírné přeladění má mít pozitivní vliv při jednopólových zkratech v nadřazené soustavě 110 kV.

Existují i další pravidla, jako provozovat tlumivku podladěnou (přeladěnou) v případě, kdy se kapacita soustavy blíží k maximálnímu (minimálnímu) proudovému rozsahu tlumivky. Nebo pro sítě s výraznou snahou vyvarovat se stavu rezonance je doporučeno provozovat tlumivku přeladěnou. Tím je zabezpečeno, že při odpojení části sítě nenastane vyladění, ale naopak se prohloubí rozladění, které je posléze korigováno.

Jak je zřejmé, důvodů a možností je mnoho, přičemž mnohokrát závisí na konkrétní situaci a také místním zvyku jak na tuto problematiku nahlížet.



## 1.6 Kritéria návrhu uzlu transformátoru

Otázka výběru způsobu provozu uzlu systému může být poměrně komplikovaná, jelikož musí být zvážena celá řada aspektů. Mnohé z nich již byly letmo zmíněny v předchozích kapitolách, proto zde budou shrnuty a doplněny o další.

V první řadě je nutné uvažovat **velikost poruchového proudu**, ze které plynou následující možné potíže:

- destrukce zařízení v místě poruchy
- vznik krokových a dotykových napětí v místě poruchy
- rušení okolních zařízení (převážně induktivní vazbou), EMC

Vliv popsanych potíží bude zřejmě tím menší, čím menší bude velikost poruchového proudu. V případě první a třetí položky lze situaci zlepšit včasným vypínáním. Druhá položka pak závisí i na kvalitě uzemnění v místě poruchy.

Dalším velmi důležitým hlediskem je **napěťové namáhání**, a to jak krátkodobé přepětí vlivem vzniku, zániku či přechodné poruchy, tak ustálené přepětí objevující se na zdravých fázích po celou dobu poruchy. Napětí, které se může na fázích objevit, se promítne především do následujících oblastí:

- volba izolační hladiny sítě
- nastavení svodičů přepětí

Dimenzování izolační hladiny je dáno maximální možnou hodnotou fázového ustáleného napětí, za které je považováno napětí sdružené. Lze uvažovat, že pro všechny způsoby provozu uzlu (mimo přímo uzemněného) je izolační hladina volena stejně, rozdíl ovšem vzniká v době působení zvýšeného napětí a tedy v rostoucí pravděpodobnosti další poruchy. Výrazně se tak napěťové namáhání projevovalo v oblastech tvořených kabely s papírovou izolací. Tyto kabely byly sice dimenzovány na sdruženou hodnotu, ovšem rychle degradovaly a celkově špatně snášely vyšší napětí. Nebylo pak výjimkou, že v těchto sítích docházelo k „bouchnutí“ kabelu týden co týden a delší provoz s jednofázovou poruchou tak nepřipadal v úvahu.

Volba trvalého provozního napětí omezovače přepětí<sup>8</sup>  $U_C$  také vychází z maximálního možného napětí, kterým je sdružené napětí  $U$ . Zároveň se významněji uplatňuje i předpokládaná doba působení. Pro odporově uzemněnou síť mohou být omezovače

---

<sup>8</sup> Omezovač přepětí je v současnosti nejpoužívanější svodič přepětí použitelný v sítích VN (i vyšších napětí). Jedná se o nelineární napěťově závislý odpor (varistor) tvořený materiálem ZnO, který svými vlastnostmi nevyžaduje předřazené jiskřiště (jako např. ventilová bleskojistka). Díky tomu je doba reakce pouze v řádech desítek ns, čímž je umožněna kvalitní ochrana sítě před přepětím při vzniku či zániku zemního spojení.

nastaveny na nižší hodnotu ( $U_C = 0,87 - 0,95U$ ) než pro izolovanou či kompenzovanou síť ( $U_C \geq 1,06U$  pro dlouhodobý provoz a  $U_C \geq 0,95U$  pro provoz s vypínáním do 30 minut), a to právě z důvodu rychlého vypínání. Ovšem je nutné zvážit, zda tato síť s takto nastavenými omezovači nemůže být v rámci náhradního provozu připojena k síti kompenzované. V tom případě by došlo ke zničení všech omezovačů. Dále je vhodné pamatovat na fakt, že dimenzování omezovačů je vztaženo k provedení uzlu (na což se po létech provozu zapomíná) a přechod od odporového uzemnění ke kompenzovanému může opět přinést problémy spojené s destrukcí omezovačů.

Obecně lze tvrdit, že v posledních letech již napětíové namáhání nepředstavuje takové problémy jako v předchozích desetiletích. Je to dáno především postupným zaváděním kabelů s polyetylenovou izolací a zároveň i kvalitních omezovačů přepětí. Začínají se tak postupně bortit poučky o nutnosti provozu kabelové sítě s uzlem uzemněným přes odpor, přičemž se již ve světě i u nás objevují případy, kdy dochází k přechodu z odporového uzemnění na provoz se zhášecí tlumivkou.

Mezi další nezanedbatelné lze řadit tzv. **provozní aspekty**. Tím je přednostně myšleno následující:

- detekce poruchy
- lokalizaci poruchy
- počet nutných spínání vypínačů
- vyhnutí dalších poruch

Detekce zemní poruchy je realizována pro všechny způsoby provozu uzlu obdobně a to měřením netočivé složky napětí, případně proudu. Nejčastější provedení pro měření napětí  $U_0$  je zapojení přístrojových transformátorů napětí do otevřeného trojúhelníku, na jehož výstupu se objevuje napětí  $3U_0$ . Vzhledem ke jmenovitému napětí jedné fáze v otevřeném trojúhelníku  $100/3$  V lze dokázat, že v neúčinně uzemněné síti je při kovovém zemním spojení výstupní napětí  $3U_0 = 100$  V. Jelikož mezní napětí pro rozpoznání ZS bývá nastaveno  $25\% U_f$ , je ZS jednoznačně určeno napětím 25 V na svorkách otevřeného trojúhelníku. Podobně je tomu u účinně uzemněných sítí, kde je však napětí při kovovém zemním zkratu  $3U_0 = 100/3$  V. Zároveň je mnohonásobně vyšší poruchový proud, proto pro detekci zkratu poslouží již proudové kritérium.

Lokalizace zemní poruchy je většinou založena na měření netočivé složky proudu. To může být provedeno pomocí součtového zapojení proudových transformátorů – tzv. Holgreenova skupina (vhodné pro venkovní vedení), nebo pomocí průvlekového transformátoru proudu (vhodné pro kabelové vyvedení). Obě dvě fungují jako filtr pro

netočivou složku a na výstupu lze měřit hodnotu  $3I_0$ . V současnosti lze pomocí vhodných metod určit postižený vývod, ale již ne konkrétní místo poruchy. V kompenzovaných a izolovaných sítích není problém provozovat síť po jistou dobu v poruše a tak má dispečer možnost se sítí pracovat a tzv. „vymanipulovat poruchu“. V odporově uzemněných sítích jsou poruchové proudy poměrně vysoké a porucha je okamžitě vypínána, přičemž by další zapínání mohlo představovat riziko rozšíření poruchy a další destrukci materiálu. V těchto sítích tedy není možné konkrétně lokalizovat místo poruchy a z pohledu dispečera se jedná o významný nedostatek.

Výše zmíněný nedostatek a zároveň i problematiku častého spínání vypínačů při vyhledávání poruchy lze eliminovat zavedením tzv. systému dálkové lokalizace poruch, který spočívá v osazení vhodně zvolených míst identifikátory zemního spojení, autoreclosery a dalšími dálkově ovládanými úsečníky. Pomocí těchto dálkově ovládaných prvků je přesně známa cesta poruchového proudu a tedy i místo poruchy. Tyto inteligentní systémy pak mohou samy vypnout postižený úsek bez rušení odběratelů, jak je tomu při dispečerském manipulování. Tento systém zdá se být poměrně progresivní a v posledních letech se objevují četné studie a pilotní projekty. Ovšem hromadné nasazení zatím z důvodů technicko-ekonomických nenastalo.

Předposledním faktorem, ke kterému se v dnešní době významně přihlíží, jsou **investiční a provozní náklady**. Sem patří nejen náklady na vybudování stání a náklady na samotná zařízení (tlumivka, odporník, automatiky, ochrany), ale například i náklady na zajištění dostatečného dimenzování zemnění, je-li třeba, nebo náklady spojené s nedodáním elektrické energie odběratelům.

Na první pohled lze očekávat, že minimálně z pohledu investičních a provozních nákladů na samotné zařízení zapojené do uzlu nejhůře vyjde síť kompenzovaná, poté odporově uzemněná a nejlevnější bude síť izolovaná. Ovšem za úvahu stojí, zda toto pořadí nebude změněno po započtení nákladů vzniklých samotným provozem sítě.

Poslední, k čemu je vhodné přihlídnout, je **plánovaný rozvoj sítě**. Jedná se nejen o výstavbu nových vedení, ale i rekonstrukci současných (náhrada venkovních vedení kabelovými). Tento aspekt nemusí nutně vést ke změně provedení uzlu, ale může ovlivnit dimenzování použitého zařízení (výkon tlumivky, či velikost odporníku).

Jak bylo představeno, aspektů je skutečně mnoho a často se spolu prolínají a jeden souvisí s druhým. K dosažení nejlepších technicko – ekonomických výsledků je proto nutné všechny pečlivě zvážit.

## 1.7 Kompenzace zbytkového proudu v místě poruchy

Ačkoli se zdá, že vykompenzováním kapacitního proudu bylo již v kompenzovaných sítích uděláno maximum, není tomu tak. Zbytkový proud procházející místem poruchy může být stále značně nebezpečný jak z hlediska mechanického (v posledních letech bylo častým jevem poničení betonového stožáru), tak i z hlediska dotykových a krokových napětí. Tyto důvody proto vedly ke snaze omezit zbytkový proud v místě poruchy na co nejnižší hodnotu.

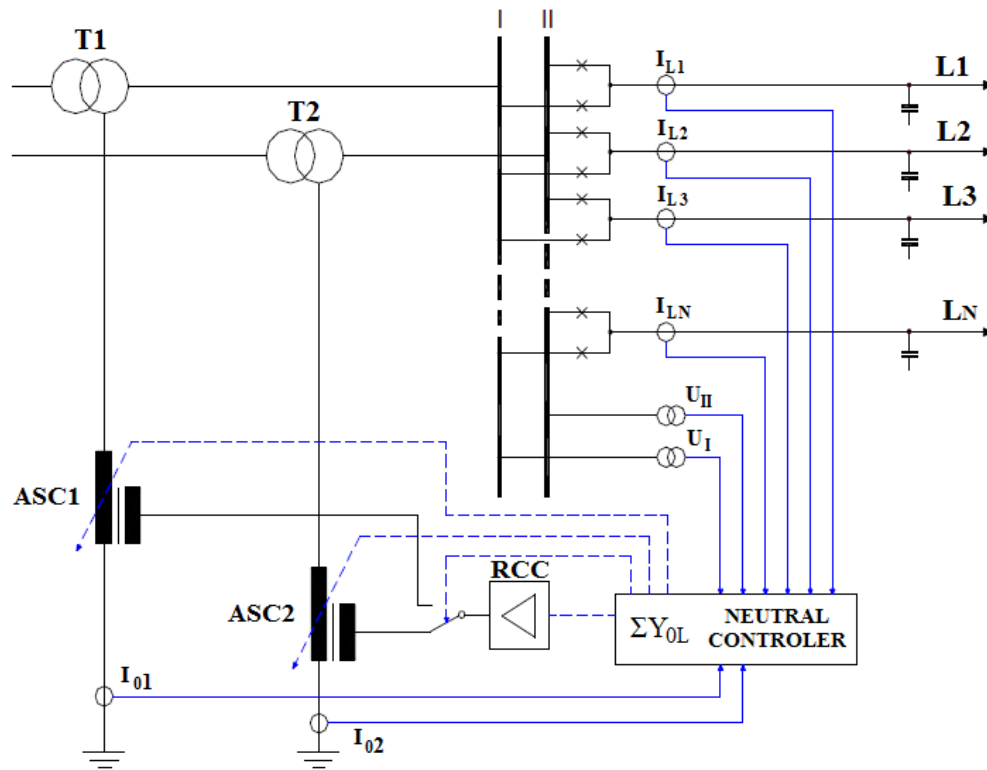
V zásadě existují dvě možnosti kompenzace zbytkového proudu v místě poruchy, přičemž každá využívá jiný princip. **Swedish Neutral** (Švédská nula) je založena na proudové injektáži, zatímco **přízemnění postižené fáze** (shunting, šentování) spočívá v přesměrování zbytkového proudu z místa poruchy do předem určené bezpečné lokality. Ke každé z metod bude uveden stručný souhrn.

### 1.7.1 Swedish Neutral

Pod pojmem Swedish Neutral se v našich odborných kruzích většinou rozumí již samotná metoda, což je mírně zavádějící, jelikož Swedish Neutral je švédská firma. Pravý název metody by spíše měl být „Residual Current Compensation“ – RCC (kompenzace zbytkového proudu). Obecně je pak zařízení zodpovědné za bezpečný provoz rezonančně uzemněných sítí nazýváno „Ground Fault Neutraliser“ – GFN.

GFN sdružuje několik samostatných úloh, jako kompenzace kapacitního proudu, či vyhledání poruchy. Jako nadstavba se objevuje kompenzace zbytkového proudu, jejíž princip spočívá v jeho měření a následné injektáži proudu protifázového (posun o  $180^\circ$ ). Injektáž je provedena přes pomocné vinutí tlumivky přímo do uzlu transformátoru. Podle výrobce dochází k zafungování RCC již během prvních tří period (60 ms) a po této době měl být zbytkový proud v místě poruchy plně vyrušen.

Principiální uspořádání GFN je na obr. 1.32, kde je naznačena TR se dvěma transformátory a dvojitým systémem přípojníc. Je patrné, že pro celou TR postačí jeden systém GFN. Centrální řídicí jednotka (Neutral Controler) shromažďuje data z měření netočivých proudů jednotlivých vývodů, netočivých napětí obou přípojníc či jejich fázových napětí. Na základě vyhodnocení těchto údajů je ovládán blok označený RCC, což je v reálu invertor (střídač složený z výkonových prvků – např. IGBT), který do pomocného vinutí zhášecí tlumivky (označené ASC – Arc Suppression Coil) injektuje proud požadované velikosti.



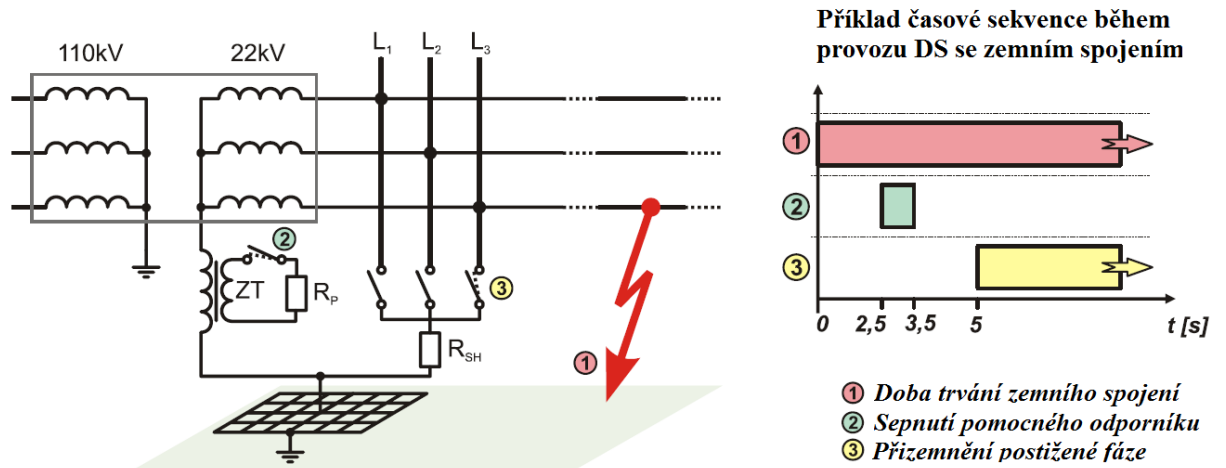
Obrázek 1.32 – „Ground fault neutralizer” pro systém dvou přípojníc [13].

Jako výhoda systému je považována jeho dynamika, kdy během několika sekund reaguje na změnu kapacity systému. Nevýhodou pak může být skutečnost, že kompenzační proud teče k místu poruchy skrz citlivé odběratele. Často se také zmiňuje zpětný vliv na síť, který ovšem nebyl seriózně prokázán. Za jednoznačnou nevýhodu lze však považovat pořizovací náklady a celkovou komplikovanost systému, který samozřejmě vyžaduje údržbu a s tím spojené provozní náklady.

Ačkoli se v českých odborných kruzích metoda firmy Swedish Neutral netěší přílišné oblibě (osazeny pouze dvě TR společnosti ČEZ, a.s. – Olomouc a Hodolany), v zahraničních distribučních sítích bylo doposavad nasazeno více než 50 systémů GFN (nejvíce v Německu).

### 1.7.2 Přizemnění postižené fáze

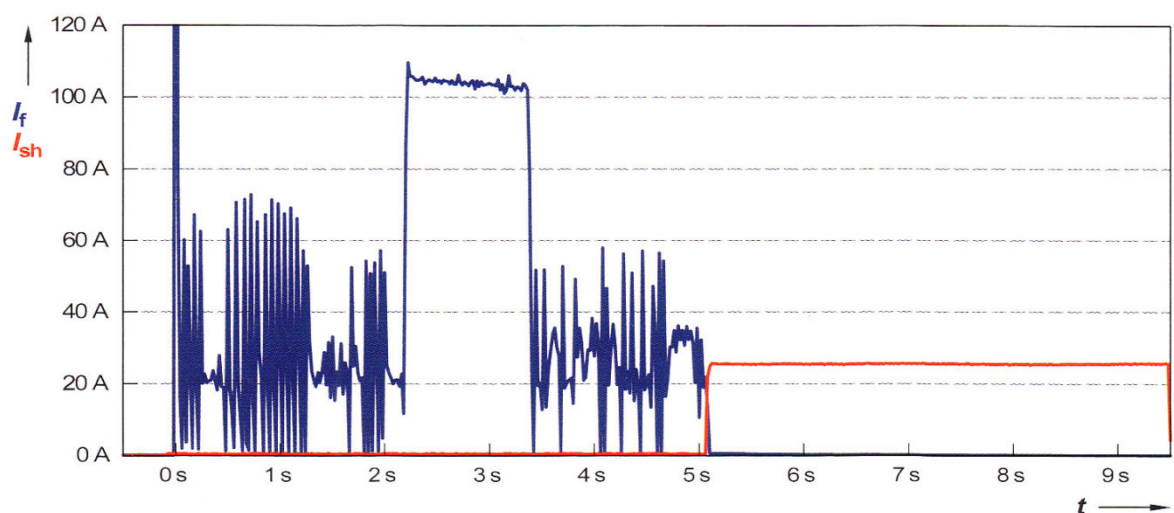
Přizemnění postižené fáze je na rozdíl od Swedish Neutral poměrně jednoduchá a spolehlivá metoda založená na přesměrování poruchového proudu do samotné rozvodny. Při vzniku trvalého zemního spojení dojde po krátké době k přizemnění postižené fáze přes malý odpor, čímž vznikne paralelní cesta k poruchovému proudu. Proud se v poměru daném impedancemi jednotlivých smyček přerozdělí mezi místo přizemnění fáze a místo poruchy. Situace je symbolicky naznačena na obr. 1.33, kde je zároveň patrné i krátkodobé připnutí odporu v rámci vyhledání poruchy.



Obrázek 1.33 – Znázornění metody přizemnění postižené fáze v rozvodně [12].

Efektivnost metody zřejmě poroste s přechodovým odporem zemního spojení, naopak pro kovové zemní spojení nebude mít metoda téměř žádný pozitivní vliv, ba naopak se odborná veřejnost zabývá možností vlivu negativního. Detailním teoretickým rozborům a následným experimentům se věnují např. [8], [9], [10] a [11], kde jsou řešeny mimo jiné negativní vlivy, jako rozdělení proudů mezi shuntovací a poruchový obvod či možnost nebezpečného dotykového napětí zavlečeného na neživé části v sítích nízkého napětí vlivem zvýšení poruchového proudu.

Doposud provedené experimenty a výzkumy však zásadní negativní vliv neprokázaly, zato jednoznačně pozitivní ano. Příkladem může být průběh proudu místem poruchy a místem přizemnění postižené fáze v rozvodně z obr. 1.34, kde je jasně vidět přesměrování poruchového proudu z místa poruchy.



Obrázek 1.34 – Záznam poruchového ( $I_f$ ) a šentovacího ( $I_{sh}$ ) proudu při obloukovém zemním spojení [14].

## 2 Kapacitní proudy v oblasti Tábor

V této kapitole bude představena teorie výpočtu kapacitních proudů pro venkovní i kabelová vedení a na jejím základě provedeno konkrétní vyhodnocení pro oblast Tábor. Bude respektován jak současný stav, tak i stav budoucí zahrnující možná rozšíření včetně výstavby nové TR 110/22 kV Náchod.

### 2.1 Teorie výpočtu kapacitních proudů

Pro teoretické určení kapacitního proudu existují dvě možnosti. První z nich je užití vztahu pro kapacitní proud definovaný pomocí (1.32), nebo využití normou daného **kapacitního proudu vztahového na kilometr délky**. Oba dva postupy by měly vést k totožným výsledkům a měly by se shodovat s kapacitním proudem naměřeným pomocí automatiky ladění tlumivky. Zda jsou tyto předpoklady splněny, bude potvrzeno či vyvráceno v následující části.

Pro výpočet kapacitního proudu jednotlivých fází a proudu celkového lze psát:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{KAP-R} &= j\omega \cdot C_{R0} \cdot (\hat{U}_{IR} - \hat{U}_N) \\ \hat{I}_{KAP-S} &= j\omega \cdot C_{S0} \cdot (\hat{U}_{IS} - \hat{U}_N) \quad (2.1) \\ \hat{I}_{KAP-T} &= j\omega \cdot C_{T0} \cdot (\hat{U}_{IT} - \hat{U}_N) \end{aligned}$$

$$\hat{I}_{KAP} = \hat{I}_{KAP-R} + \hat{I}_{KAP-S} + \hat{I}_{KAP-T} \quad (2.2)$$

Z uvedených vztahů je zřejmé, že pro další výpočet je nutné určit kapacity k zemi jednotlivých fází. Velikostí i metodikou výpočtu těchto kapacit se venkovní a kabelové vedení liší, proto budou posuzována zvlášť.

#### 2.1.1 Venkovní vedení

Výpočtem kapacity venkovního vedení se zabývají mnohá skripta a výzkumné práce. Výhradně je používána **metoda zrcadlení** pocházející od W. Thomsona (lorda Kelvina), která je podrobně popsána např. v [6]. Celý postup a teorii výpočtu kapacity vedení lze dohledat např. v literatuře [2], ze které jsou vytaženy nejnútnejší vztahy.

Pro vlastní ( $m = k$ ) a vzájemné ( $m \neq k$ ) potenciálové součinitele platí:

$$\delta_{kk} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log\left(\frac{2 \cdot h_k}{r_k}\right) \quad (2.3) \quad \delta_{km} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log\left(\frac{\sqrt{4 \cdot h_k \cdot h_m + d_{km}^2}}{d_{km}}\right) \quad (2.4)$$

Kde:  $\delta_{kk}$  [ $\text{km} \cdot \text{F}^{-1}$ ] je vlastní potenciálový součinitel vodiče  $k$ ,  $\delta_{km}$  [ $\text{km} \cdot \text{F}^{-1}$ ] je vzájemný potenciálový součinitel vodičů  $k$  a  $m$ ,  $h_k$  [m] je výška nad zemí vodiče  $k$ ,  $h_m$  [m] je výška nad zemí vodiče  $m$ ,  $r_k$  [m] je matematický poloměr a  $d_{km}$  [m] je vzdálenost mezi vodiči  $k$  a  $m$ .

Aplikováním vztahů (2.3) a (2.4) na všechny tři fáze lze vytvořit matici potenciálových součinitelů, jejíž inverzí vznikne matice kapacitních součinitelů – viz (2.5).

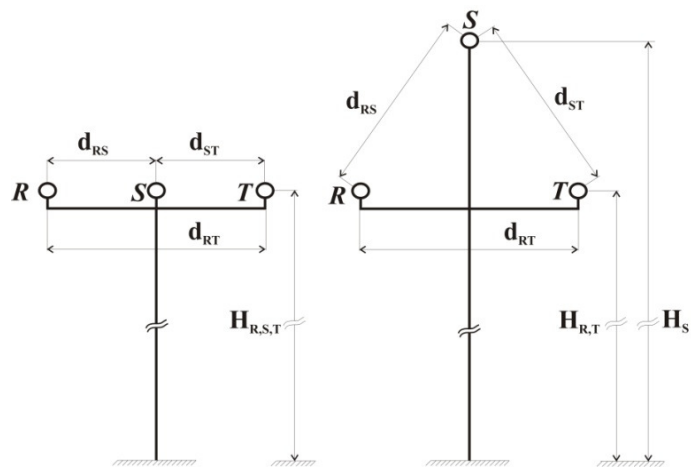
Pomocí kapacitních součinitelů lze nalézt vztahy pro kapacity proti zemi jednotlivých fází - obecně dle (2.6), konkrétně pak (2.7).

$$C_{k0} = c_{kk} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^3 c_{km} \quad (2.6)$$

$$[c_{km}] = [\delta_{km}]^{-1} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} C_{R0} &= c_{RR} + c_{RS} + c_{RT} \\ C_{S0} &= c_{RS} + c_{SS} + c_{ST} \\ C_{T0} &= c_{RT} + c_{ST} + c_{TT} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Pro jednoduchá venkovní vedení se používají konzoly s rovinným nebo trojúhelníkovým uspořádáním (systémy „Delta“ a „Pařát“), pro dvojitá nejčastěji typ „Soudek“ a pro vícenásobná jsou používány atypická provedení jako např. „dvojitý soudek“. Pro výpočet kapacity proti zemi a posléze kapacitního proudu na kilometr délky vedení je na základě nejčastějšího použití zvoleno jednoduché vedení s rovinným a trojúhelníkovým uspořádáním – konkrétně Delta. Náčrt je zobrazen na obr. 2.1.



Obrázek 2.1 – Jednoduché vedení – rovinné a Delta uspořádání.

Při výpočtu by měl být respektován průhyb vodiče, který bývá běžně zohledněn zavedením přímkového vodiče procházející těžištěm řetězovky, pro jehož výšku platí dle [2] vztah:

$$h = H - 0,7 \cdot p \quad (2.8)$$

Kde:  $h$  [m] je výška přímkového vodiče,  $H$  [m] je závěsná výška skutečného vodiče a  $p$  [m] je průhyb skutečného vodiče (pro výpočty zvolen 0,5 m).

Vypočtené kapacity proti zemi pro vedení AlFe 6 120 ve výšce 10 m jsou uvedeny v tabulce 2.1. Z kapacit  $C_{R0}$ ,  $C_{S0}$  a  $C_{T0}$  je patrná jistá nesymetrie, která způsobuje rozdíly ve velikosti kapacitního proudu pro zemní spojení ve fázích  $R$  a  $T$  oproti zemnímu spojení ve fázi  $S$ . Pomocí vztahů (2.1) a (2.2) jsou tyto proudy dopočteny pro rovinné uspořádání (2.9) i uspořádání Delta (2.10). S těmito výpočty zároveň souvisí obr. 2.2, kde jsou zachyceny kapacitní proudy pro různá AlFe lana – AlFe 6 35, AlFe 6 50, AlFe 6 70, AlFe 6 95 a AlFe 6 120. Podle očekávání kapacitní proud roste s rostoucím průřezem lana.



Tabulka 2.1 – Kapacity proti zemi jednotlivých fází pro vedení AlFe 6 120.

	$d_{RS}$ [m]	$d_{RT}$ [m]	$d_{TS}$ [m]	$h_R$ [m]	$h_S$ [m]	$h_T$ [m]	$C_{R0}$ [nF·km <sup>-1</sup> ]	$C_{S0}$ [nF·km <sup>-1</sup> ]	$C_{T0}$ [nF·km <sup>-1</sup> ]
<b>Rovinné</b>	1,5	3	1,5	10	10	10	4,64	4,03	4,64
<b>Delta</b>	1,6	1,6	1,6	10	11,39	10	4,33	4,17	4,33

**Rovinné uspořádání**

$$\hat{I}_{KAP \vee R} = 51,9 \angle -92,3^\circ \quad (\text{mA/km})$$

$$\hat{I}_{KAP \vee S} = 5,55 \angle 150^\circ \quad (\text{mA/km}) \quad (2.9)$$

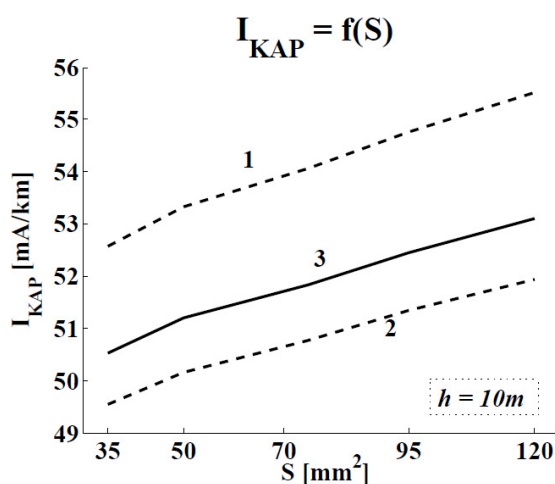
$$\hat{I}_{KAP \vee T} = 51,9 \angle 32,3^\circ \quad (\text{mA/km})$$

**Delta**

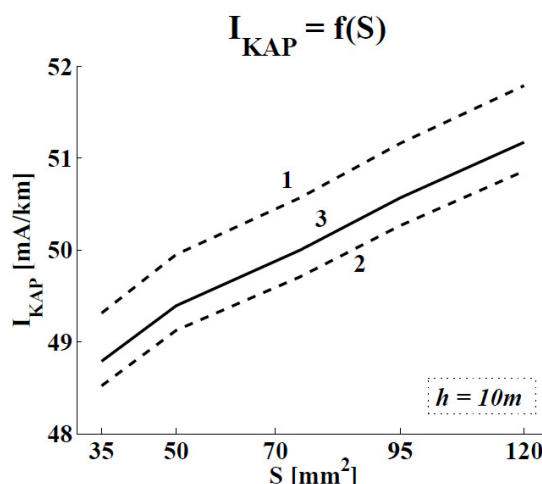
$$\hat{I}_{KAP \vee R} = 50,9 \angle -90,61^\circ \quad (\text{mA/km})$$

$$\hat{I}_{KAP \vee S} = 51,8 \angle 150^\circ \quad (\text{mA/km}) \quad (2.10)$$

$$\hat{I}_{KAP \vee T} = 50,9 \angle 30,61^\circ \quad (\text{mA/km})$$



a) Rovinné



b) Delta

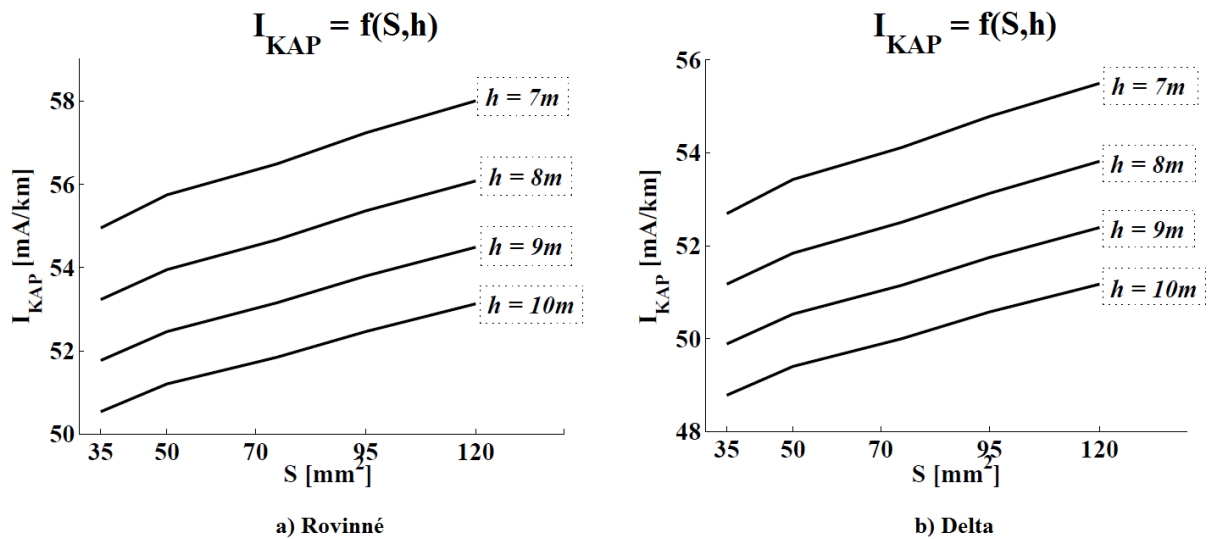
Obrázek 2.2 – Závislost kapacitního proudu na průřezu lana. 1 – ZS ve fázi S, 2 – ZS ve fázích R nebo T, 3 – ZS pro symetrickou síť.

Dalším parametrem, na kterém silně závisí kapacity proti zemi resp. kapacitní proud, je výška vedení nad zemí. Do úvahy tak kromě průhybu vodiče, který je již respektován, vstupuje členitost terénu, kvůli které není možné uvažovat pouze jednu výšku pro celou síť. Vliv členitosti je tak zohledněn výpočtem pro několik výšek, které připadají v úvahu. Výsledky jsou zaneseny na obr. 2.3, kde je opět zobrazena závislost kapacitního proudu na daném průřezu, ovšem nyní s výškou jako parametrem.

Ačkoli mezi zemním spojením v jednotlivých fázích jsou odchylky, nejsou nikterak významné. Z tohoto důvodu je pro porovnání použit kapacitní proud odpovídající průměrné kapacitě (viz. (2.11)), která v podstatě představuje kapacitu jedné fáze pro symetrickou síť. Tento proud již byl použit na obr. 2.2 a pro jeho velikost platí (2.12).

$$C_{SYM} = \frac{C_{RO} + C_{SO} + C_{TO}}{3} \quad (2.11)$$

$$\Rightarrow I_{KAP-SYM} = 3 \cdot \omega \cdot C_{SYM} \cdot U_f \quad (2.12)$$

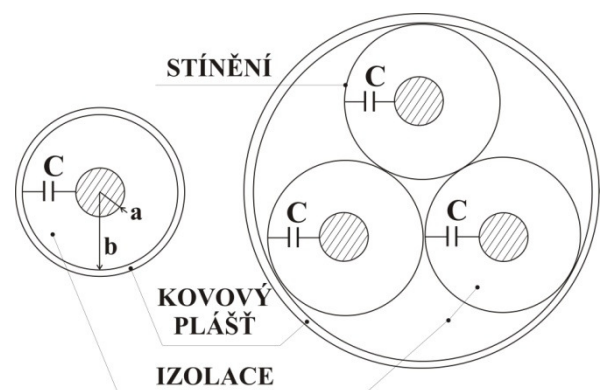


Obrázek 2.3 – Závislost kapacitního proudu na průřezu lana a výšce vodiče nad zemí.

Ve skutečné síti se kapacitní proud pohybuje v rozmezí daným na obr. 2.3, přičemž záleží na typu vodiče a na výšce vodiče nad zemí. Konkrétně to může být od 51 do 58 mA/km pro rovinné uspořádání a od 49 do 55 mA/km pro uspořádání Delta. Doposud ovšem nebyl uvažován vliv stožárů, který dosavadní výsledky může navýšit až o několik procent. Touto skutečností se zde uvedené hodnoty kapacitního proudu blíží k normou udávanému proudu pro venkovní vedení 22 kV – **63 mA/km**. Vzhledem k výše popsaným důvodům bude tato hodnota používána pro praktický výpočet kapacitních proudů v oblasti Tábor.

### 2.1.2 Kabelová vedení

Pro výpočet kapacity, resp. kapacitního proudu kabelových vedení se opět nabízí více variant. První z nich je odvození vztahu pro kapacitu za použití zákonů teorie elektromagnetického pole a její dopočetní na základě znalosti rozměrů a konkrétních materiálů. Při tom je nutné respektovat provedení a uspořádání kabelu. Rozlišuje se především, zda má každý vodič své stínění



Obrázek 2.4 – Kabel 1 – žilový s vodivým pláštěm a 3 – žilový se stíněním [2].

(kabel jednožilový s kovovým pláštěm a trojžilový se stíněním pro každý vodič), nebo je stínění provedeno společně pro všechny vodiče. První varianta výrazně převládá, a proto bude stručně pojednáno jen o ní.

Na obr. 2.4 je zobrazen náčrt jednožilového a trojžilového kabelu s vyznačenými rozměry. Zároveň jsou naznačeny i kapacity, pro které lze pomocí teorie pole odvodit následující vztah.

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (2.13)$$

Kde:  $C$  [F] je kapacita kabelu,  $\pi$  [-] je Ludolfovo číslo,  $\varepsilon_0$  [F·m<sup>-1</sup>] je permitivita vakua (8.8547...·10<sup>-12</sup>),  $\varepsilon_r$  [-] je relativní permitivita,  $l$  [m] je délka kabelu,  $a$  a  $b$  [m] jsou rozměry odpovídající nákresu.

Tento velmi obecný vztah lze upravit do praktické podoby, kdy jsou konstanty číselně vyjádřeny, přirozený logaritmus převeden na dekadický a kapacita je vztažena na kilometr délky. Nově vzniklý vztah má poté podobu danou (2.14), přičemž je téměř ve shodě např. se vztahem uvedeným v literatuře [2]. Při znalosti relativní permitivity použitého izolantu a konkrétních rozměrů je tedy možno kapacitu spočítat.

$$C = \frac{0,0242 \cdot \varepsilon_r}{\log\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [\mu\text{F}/\text{km}] \quad (2.14)$$

Druhou možností, jak určit kapacitu kabelu, je přímé užití údajů uvedených v katalogu. Kapacita patří mezi běžně uváděné parametry a věrohodnost tohoto údaje bude zřejmě vyšší, než u výpočtu prováděného s nejistými rozměry (ty jsou často ovlivněny různými tolerancemi, nebo nejsou k dispozici vůbec). Nehledě na fakt, že výše uvedené vztahy nepočítají např. s polovodivými vrstvami, které ovlivňují elektrostatické pole a tím i výslednou kapacitu.

Poslední cestou, jak určit kapacitní proud pro jednotlivé druhy kabelu, je použití normy ČSN 33 3070, kde je možno na uvedeném grafu odečíst velikost kapacitního proudu pro různé napěťové hladiny, průřezy a druhy izolace. Ačkoli se jedná o normu z roku 1979, odečtené hodnoty se v zásadě příliš neliší od současných katalogových. Jak je vidět z tabulky 2.2, výjimkou jsou pouze kabely s izolací z papíru napuštěným olejem.

V níže uvedené tabulce jsou vypsány všechny typy kabelů použitých v oblasti Tábor. Jak je patrné z jejich označení, jedná se o kabely rozličného provedení a doby uvedení do provozu. Kabely s izolací z napuštěného papíru nesoucí označení ANKxxxxx případně

AMKxxxxx<sup>9</sup> jsou v současné době již historickým přežitkem a na mnoha místech pouze dožívají. Důvodem k jejich ústupu bylo zavedení kabelů s polyetylenovou izolací, která vykazuje mnohem lepší izolační, tepelné i mechanické vlastnosti. Nejrozšířenější jsou pak kabely s izolací z tzv. zesíťného polyetylenu (XLPE – cross-linked polyethylene) mající označení AXE...<sup>10</sup>. Tyto kabely obsahují navíc dvě polovodivé vrstvy (jedna umístěna mezi jádro a izolaci a druhá mezi izolaci a stínění), které snižují gradient napětí podél kabelu a tím celkové namáhání izolace. Jejich obdobou jsou kabely s označením NA2XS(F)2Y<sup>11</sup>, které splňují standardy VDE a podléhají i jinému značení.

Tabulka 2.2 – Kapacitv a kapacitní proudv pro použité kabelv.

22 kV		Katalog NKT Cables		Norma
POLYETYLEN	S [mm <sup>2</sup> ]	C [μF/km]	I <sub>KAP</sub> [A/km]	I <sub>KAP</sub> [A/km]
AXEKCY AXEKCEY AXEKVCEY	70	0,2	2,39	2,4
	120	0,24	2,87	2,9
	150	0,26	3,11	3,15
	240	0,3	3,59	3,7
NA2XS(F)2Y	150	0,251	3,00	3,15
	240	0,301	3,60	3,7
HATPS 120	120	0,28	3,35	2,9
<b>PAPÍR + OLEJ</b>				
ANKOPV, ANKOY, ANKOYPV, ANKTOPV ANKTOYPV ANKTOYPVs	120	0,28	3,35	3,65
	150	0,30	3,63	3,95
	185	0,33	3,92	4,3
	240	0,36	4,32	4,7
AMKTOYPV AMKTOYPVs	120	0,24	2,84	3,65
	240	0,3	3,61	4,7

Vzhledem k rozdílu kapacitních proudů uvedených v tabulce bude praktický výpočet pro oblast Tábor prováděn ve dvou rovinách – pro hodnoty založené na katalogovém údaji i pro hodnoty odečtené z normy. Bude tak možno porovnat, jak velký je ve výsledku rozdíl mezi uvažovanými postupy, a který se více blíží skutečné naměřené hodnotě.

<sup>9</sup> Kabely odpovídají normě ČSN 34 7624. Příklad značení ANKTOPV: **A** – Al jádro, **N** – izolace z napuštěného papíru (normální impregnace), **K** – kabel, **TO** – samostatné stínění z Pb. **P** – společný pancíř z ocelových pásků, **V** – vlákninový obal.

<sup>10</sup> Kabely odpovídají normě PNE 34 7625. Příklad značení AXEKVCEY: **A** – Al jádro, **XE** – izolace ze zesíťného PE, **K** – kabel, **VC** – stínění kovové s ochranou proti podélnému šíření vody pod pláštěm, **EY** – kombinovaný plášť PE + PVC.

<sup>11</sup> Kabely odpovídají technické specifikaci VDE: Příklad značení NA2XS(F)2Y: **N** – VDE standard, **A** – Al jádro, **2X** – izolace ze zesíťného PE, **S** – stínění Cu, **(F)** – ochrana proti vniku vody, **2Y** – plášť z PE.

## 2.2 Současný stav

V současné době je oblast Tábor napájena z TR 110/22 kV Tábor s transformačním výkonem 2x40 MVA. Je napájena jak městská část tvořena převážně kabelovými rozvody (cca 70 km), tak přilehlé oblasti, pro která jsou výhradně použita venkovní vedení (cca 522 km). Celkový rozsah vedení je pak téměř 592 km. Jedná se tedy o síť smíšenou<sup>12</sup>.

Rozvodna 22 kV je provedena jako zapouzdřená s plynem SF<sub>6</sub> (sestavena z jednotlivých skříňových rozvaděčů) a je tvořena dvěma přípojnici, přičemž každá je napájena jedním transformátorem. Transformátor T101 v běžném stavu zásobuje přípojnici A s 12 vývody, transformátor T102 pak přípojnici B s 11 vývody. Stávající síť je provozována jako kompenzovaná, tzn. do uzlu každého transformátoru je připojena zhášecí tlumivka o výkonu 5 MVar s proudovým rozsahem 37,6 – 376 A a vlastní automatikou.

Pro určení kapacitních proudů byla společností E.ON Česká republika, s.r.o. poskytnuta nezbytná data o všech stávajících vedení ve zkoumané oblasti (typy vodičů a kabelů s jejich značením, jednotlivé délky a příslušné vývody). Celkový objem dat činil cca 2000 řádků, ze kterých bylo nutné filtrovat patřičné informace. Samotný výpočet je proveden na základě teorie představené v kapitole 2.1 a konkrétní výsledky jsou prezentovány v následujících tabulkách.

**Tabulka 2.3 – Kapacitní proudy v oblasti Tábor.**

TR 110/22 kV TÁBOR – SOUČASNÝ STAV								
	Vývod	Délka [km]		I <sub>KAP</sub> [A]				
		VENK	KABEL	VENK	KABEL Katalog	KABEL Norma	CELKEM Katalog	CELKEM Norma
T101 – Přípojnice A	Stádlec	38,44	4,079	2,42	13,93	15,00	16,35	17,42
	Sedlec	62,15	1,28	3,92	4,30	4,66	8,22	8,58
	Milevsko	39,48	0,10	2,49	0,37	0,38	2,86	2,87
	Votice	78,99	2,71	4,98	8,42	8,89	13,40	13,87
	Vožice	38,45	2,58	2,42	7,89	8,37	10,31	10,79
	Čekanice	3,76	0,26	0,24	0,81	0,83	1,05	1,06
	Blanice	61,12	1,37	3,85	4,76	5,15	8,61	9,00
	Lejčkov	27,26	0,27	1,72	0,84	0,86	2,56	2,57
	Choustník	62,80	0,62	3,96	2,05	2,17	6,00	6,13
	Želeč	60,35	6,01	3,80	20,26	23,16	24,06	26,96
	Malšice	23,75	2,87	1,50	11,56	12,81	13,06	14,31
	Teplárna 2	0	0,1	0	0,36	0,37	0,36	0,37
	<b>Celkem A</b>	<b>496,54</b>	<b>22,25</b>	<b>31,28</b>	<b>75,55</b>	<b>82,65</b>	<b>106,83</b>	<b>113,93</b>

<sup>12</sup> Dle ČSN 33 3070 se rozumí venkovními sítěmi sítě, kde je více jak 98 % délky venkovního vedení a kabelovými sítěmi sítě, kde je více jak 90 % délky kabelového vedení. Poměry mezi tím jsou pak síť smíšené.

	Vývod	Délka [km]		I <sub>KAP</sub> [A]				
		VENK	KABEL	VENK	KABEL Katalog	KABEL Norma	CELKEM Katalog	CELKEM Norma
T102 – Přípojnice B	Nádraží	0	7,38	0	27,51	29,14	27,51	29,14
	MOS	0	4,36	0	15,10	16,38	15,10	16,38
	Tábor	0	6,19	0	22,88	25,54	22,88	25,54
	Jiskra	0	0,98	0	3,95	4,22	3,95	4,22
	VOS	5,72	3,19	0,36	11,66	12,60	12,02	12,96
	Klokoty	7,86	9,50	0,50	34,95	38,10	35,44	38,59
	Měšice	1,07	4,21	0,07	15,84	16,75	15,91	16,82
	Lužnice	0	4,97	0	19,74	20,94	19,74	20,94
	VOJ	10,48	3,47	0,66	13,72	15,09	14,38	15,75
	MOJ	0	3,00	0	12,45	13,40	12,45	13,40
	Teplárna 1	0	0,10	0	0,36	0,37	0,36	0,37
	<b>Celkem B</b>	<b>25,13</b>	<b>47,35</b>	<b>1,59</b>	<b>178,16</b>	<b>192,53</b>	<b>179,74</b>	<b>194,11</b>
<b>Oblast celkem</b>	<b>521,67</b>	<b>69,60</b>	<b>32,87</b>	<b>253,71</b>	<b>275,18</b>	<b>286,57</b>	<b>308,04</b>	

V tabulce 2.3 jsou uvedeny kapacitní proudy pro všechny vývody členěné dle typu vedení (venkovní / kabelové), způsobu určení kapacitního proudu kabelů (výpočet založen na kapacitě uvedené v katalogových listech / na kapacitním proudu na kilometr délky odečteném z normy ČSN 33 3070) a zároveň dle přípojnice, na kterou jsou dané vývody zapojeny. Díky tomu je snadno porovnatelný nejen příspěvek od venkovních a kabelových vedení, ale i obě metody výpočtu. Současně lze pak pozorovat sklon k zapojování většiny kabelových rozvodů města na přípojnici B, vývodů napájejících přilehlé oblasti na přípojnici A.

Zajímavý dále může být poměr typu izolace použitých kabelů. Ač už je pro nová kabelová vedení řadu let využíváno polyetylenové izolace, zastoupení kabelů s papírovou izolací je stále výrazné. Konkrétně je v oblasti Tábor položeno téměř **28 km (40%)** kabelu s PE izolací a **41,5 km (60%)** kabelu s papírovou izolací.

Pro porovnání vypočtených hodnot kapacitního proudu obou přípojníc i celé oblasti poslouží pravidelně prováděné odečty z automatiky ladění zhášecí tlumivky – viz tabulka 2.4. K dispozici jsou záznamy od roku 2003, ze kterých je po vyloučení let 2006 a 2007 (sít' nebyla v základním řazení a navýšení bylo způsobeno napájením kabelových vedení

**Tabulka 2.4 – Kapacitní proud odečtený z automatik ladění zhášecí tlumivky.**

Datum odečtu	I <sub>KAP</sub> [A]		
	A	B	Oblast celkem
9.12.2003	102	193	295
25.1.2004	110	206	316
7.11.2005	121	192	313
17.1.2006	108	262	370
17.1.2007	108	262	370
8.1.2008	112	219	331
22.1.2009	115	197	312
1.5.2010	122	198	320

TR Planá nad Lužnicí) patrný mírný, ale pravidelný nárůst. Na obr. 2.5 je mimo konkrétních odečtených hodnot zachycena i regresní křivka s příslušnou rovnicí, dle níž lze odhadnout další vývoj.

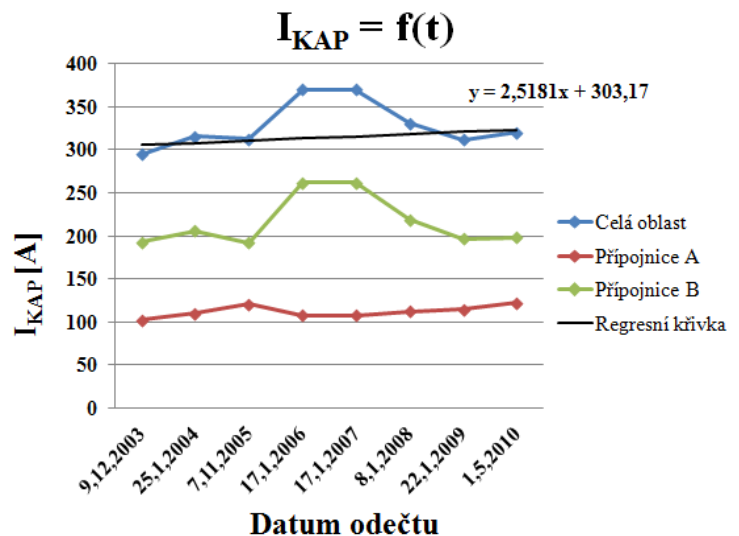
Na základě hodnot získaných z posledních odečtů lze tvrdit, že **kapacitní proud celé oblasti Tábor se v současné době pohybuje kolem hodnoty 320 A**. Výsledky získané z výpočtů založených na teorii představené v kapitole 2.1 je možné vzhledem k hodnotě 320 A považovat za uspokojivé.

**Metodou využívající katalogové údaje kapacit** používaných kabelů

bylo dosaženo výsledku **286,57 A**, což představuje **odchylku 33,43 A (10,45 %)**. **Metoda založena na kapacitním proudu uvedeném v normě ČSN 33 3070** pak poskytla výsledek **308,04 A** s odchylkou **11,95 A (3,74 %)**. Vzniklé odchylky mohou být způsobeny zejména chybným určením jednotlivých kapacit kabelů, či chybou vzniklou při filtraci dat. Rovněž nesprávná parametrizace automatiky zhášecí tlumivky nemůže být zcela vyloučena.

Ke zkompletování popisu stávajícího stavu je vhodné uvést části současného systému, které mohou představovat potíže a bude nutné je v dohledné době řešit. Za takové slabé místo lze považovat způsob napájení severní části okresu Tábor a severní okraj města. Zde je zásobování provedeno pomocí 7 venkovních vedení 22 kV z roku 1953, převážně typu 70 (95) mm<sup>2</sup> AlFe 6. Konkrétně se jedná o kmenové linky *Vožice, Votice, Sedlec, Stádlec, Milevsko, Klokoty* a *Čekanice*. Tato vedení jsou z R 22 kV Tábor vyvedena pomocí 10-tinásobného portálového vedení (společně s linkami *Blanice, Lejčkov* a *Choustník*), které dále přejde ve čtyřnásobné vedení (linky *Klokoty, Sedlec, Stádlec* a *Milevsko*) a trojnásobné vedení (linky *Votice, Vožice* a *Čekanice*). Těchto 7 linek je vedeno souběžně až do oblasti Náchod, kde se rozdělují.

Životnost venkovních vedení je v podmínkách našich distribučních sítí uvažována 45 let, z čehož je zřejmé, že již nyní (2012) výše zmíněná vedení přesluhují. Ačkoli v současnosti nejsou pozorovány zásadní nedostatky (rezavění stožárů, destrukce betonových základů, mechanické poškození vodičů), lze po zkušenostech z podobně starých vedení



Obrázek 2.5 – Kapacitní proud odečtený v průběhu času.

očekávat v blízké době poruchy způsobené mechanickým stavem vodičů. Jelikož při opravě musí být z důvodu bezpečnosti vypnuty všechny linky na vícenásobných vedeních, je každá porucha ve výše popsaném úseku velmi nežádoucí.

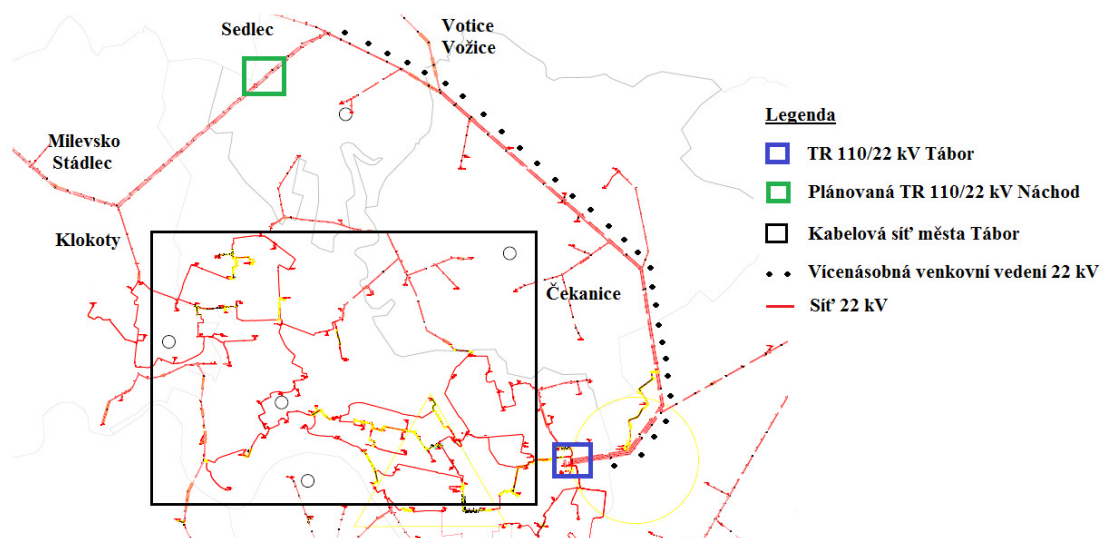
Závěrem lze současný stav systému stručně zhodnotit z hlediska vypadnutí jednoho transformátoru 40 MVA, tedy z hlediska kritéria N-1. Oblast Tábor je obklopena z jihozápadu TR 110/22 kV Bechyně (2x25 MVA), z jihu TR Planá (2x25 MVA) a z východu TR Pacov (2x25 MVA). Z důkladné analýzy společnosti E.ON Česká republika, s.r.o. plyne, že již kolem roku 2020 nebudou pro náhradní napájení dostačující nejen transformační kapacity okolních TR, ale i mnohá propojovací vedení.

### 2.3 Výhled 20 let

Výhled do blízké budoucnosti je ovlivněn zejména následujícími aspekty:

- Potřebou řešit mechanický stav stávajících vícenásobných vedení 22 kV.
- Potřebou řešit záložní napájení oblasti TR 110/22 kV Tábor z okolních TR při výpadku jednoho transformátoru 40 MVA.
- Potřebou řešit velikost kapacitního proudu oblasti, který se již nyní pohybuje nad doporučenou hodnotou 300 A pro smíšené síť.

Výše zmíněné potřeby lze v zásadě řešit dvěma způsoby. Za první, pokračováním rozvoje stávajícího systému vedení 22 kV a transformace 110/22kV. Za druhé, výstavbou nové TR 110/22 kV v oblasti Tábor. Společnost E.ON Česká republika, s.r.o. se po zvážení obou variant přiklonila k té druhé, tedy k výstavbě nové TR pojmenované podle oblasti umístění Náchod. Předpokládaná výstavba transformovny s transformačním výkonem 2x25MVA je rok 2016. Předpokládané zapojení linek je prezentováno v příloze B.



Obrázek 2.6 – Dispoziční uspořádání TR 110/22 kV Tábor a plánované TR 110/22 kV.



Cílem této kapitoly není analyzovat výstavbu nové TR komplexně, nýbrž zhodnotit její vliv na nové rozložení kapacitního proudu. Proto budou v následujícím uvedeny pouze informace nezbytné k posouzení této problematiky.

Umístěním nové TR (viz. obr. 2.6) do oblasti Náchod (sever), tedy na opačnou stranu než je stávající TR Tábor (jih), jsou elegantně vyřešeny všechny výše popsané potřeby. Je zajištěno jak napájení severních částí okresu Tábor a severní části města bez využití vícenásobných vedení (ty budou demontovány), tak i náhradní napájení v případě výpadku jednoho transformátoru v TR Tábor. Zároveň je na první pohled patrné, že převedením 7 vývodů (*Vožice, Votice, Sedlec, Stádlec, Milevsko, Klokoty a Čekanice*) do nové TR Náchod dojde k odlehčení současné TR Tábor z hlediska velikosti kapacitního proudu. Konkrétní vyhodnocení budoucího stavu je provedeno v následujícím.

Vybudování nové TR 110/22 kV Náchod je jeden z hlavních zdrojů změn, které lze v následujících letech očekávat. Ty především vycházejí ze zrušení vícenásobných vedení, zaústění nových linek do stávajícího systému (viz. Příloha C) a z očekávaného nárůstu kapacitního proudu. Pro přehledné shrnutí lze provést následující odhad:

- U linek *Milevsko, Stádlec a Klokoty* dojde ke zrušení venkovního vedení o délce cca 6 km a k výstavbě kabelových vývodů z TR Náchod o délce cca 100 metrů.
- U linek *Votice a Vožice* dojde ke zrušení venkovního vedení o délce cca 6 km, k výstavbě kabelových vývodů z TR Náchod o délce cca 400 metrů a k výstavbě venkovních vedení o délce cca 600 metrů. Dále pro linku *Vožice* přibude cca 400 metrů venkovního vedení.
- U linky *Sedlec* bude zrušeno cca 5,7 km venkovního vedení a vystavěno cca 300 metrů kabelového vývodu z TR Náchod.
- Nově vzniklé linky *Náchod* a *Jordán* budou sloužit pro propojení TR Náchod s TR Tábor, přičemž vystavěny budou v uvolněném koridoru po vícenásobných vedeních. Linka *Náchod* převezme v běžném provozu transformátorové stanice (TS), které nyní zásobuje linka *Čekanice* z TR Tábor a linka *Jordán* převezme TS nyní napájené z linky *Stádlec* (ta bude v novém zapojení přejmenována na *Stolak*). Pro obě nové linky dojde k výstavbě cca 5,7 km venkovního vedení a výstavbě cca 400 metrů kabelových vývodů. Pro linku *Čekanice* (resp. *Náchod*) lze uvažovat zrušení 2,8 km současného venkovního vedení.
- Vzhledem k regresní křivce popsané na obr. 2.5 je možno očekávat nárůst kapacitního proudu celé oblasti cca 2,5 A/rok. Tato oblast bude ovšem rozdělena mezi dvě napájecí TR a z dostupných údajů není možné určit, jakým dílem budou

dané oblasti k nárůstu přispívat. Z čistě výpočtového hlediska lze provést odhad založený na „váze“ převáděných vývodů, jejichž kapacitní proud tvoří zhruba 30% z celkového kapacitního proudu oblasti. Při akceptování této metody by nárůst oblasti napájené TR Náchod mohl být 30% z 2,5 A/rok, tedy 0,75 A/rok. Pro TR Tábor by pak odpovídal nárůst 1,75 A/rok.

Při uvážení všech výše popsaných aspektů a faktu, že pro kabelové vývody budou použity kabely 3 x 22-NA2XS(F)2Y 1x240mm<sup>2</sup> a pro venkovní vedení 110/22 AlFe nebo 42/7 AlFe, lze provést výhledovou analýzu rozložení kapacitních proudů v oblasti Tábor. Výsledky jsou prezentovány v následujících tabulkách a následně zhodnoceny.

Tabulka 2.5 – Predikce kapacitních proudů pro TR Tábor.

TR 110/22 kV TÁBOR – VÝHLED ZA 20 LET								
	Vývod	Délka [km]		I <sub>KAP</sub> [A]				
		VENK	KABEL	VENK	KABEL Katalog	KABEL Norma	CELKEM Katalog	CELKEM Norma
T101 – Přípojnice A	Blanice	61,12	1,37	3,85	4,76	5,15	8,61	9,00
	Lejčkov	27,26	0,27	1,72	0,84	0,86	2,56	2,57
	Choustník	62,80	0,62	3,96	2,05	2,17	6,00	6,13
	Želeč	60,35	6,01	3,80	20,26	23,16	24,06	26,96
	Malšice	23,75	2,87	1,50	11,56	12,81	13,06	14,31
	Teplárna 2	0	0,1	0	0,36	0,37	0,36	0,37
	Stolak*	-	-	-	-	-	-	-
	Čekanice**	-	-	-	-	-	-	-
	<b>Celkem A</b>	<b>235,28</b>	<b>11,23</b>	<b>14,82</b>	<b>39,83</b>	<b>44,52</b>	<b>54,65</b>	<b>59,34</b>
T102 – Přípojnice B	Nádraží	0	7,38	0	27,51	29,14	27,51	29,14
	MOS	0	4,36	0	15,10	16,38	15,10	16,38
	Tábor	0	6,19	0	22,88	25,54	22,88	25,54
	Jiskra	0	0,98	0	3,95	4,22	3,95	4,22
	VOS	5,72	3,19	0,36	11,66	12,60	12,02	12,96
	Měšice	1,07	4,21	0,07	15,84	16,75	15,91	16,82
	Lužnice	0	4,97	0	19,74	20,94	19,74	20,94
	VOJ	10,48	3,47	0,66	13,72	15,09	14,38	15,75
	MOJ	0	3,00	0	12,45	13,40	12,45	13,40
	Teplárna 1	0	0,10	0	0,36	0,37	0,36	0,37
	<b>Celkem B</b>	<b>17,27</b>	<b>37,85</b>	<b>1,09</b>	<b>143,21</b>	<b>154,43</b>	<b>144,3</b>	<b>155,52</b>
<b>Oblast celkem</b>	<b>252,55</b>	<b>49,07</b>	<b>15,91</b>	<b>183,03</b>	<b>198,95</b>	<b>198,94</b>	<b>214,86</b>	
<b>Při uvážení nárůstu cca 1,75 A/rok</b>						<b>234</b>	<b>250</b>	

Po převedení výše zmiňovaných linek z TR 110/22 kV Tábor do nově zbudované TR 110/22 kV Náchod dojde k odlehčení stávající TR z hlediska kapacitního proudu o cca 88 A (metoda využívající katalog), resp. 93 A (metoda využívající normu). Při uvážení konstantního nárůstu 1,75 A/rok lze za 20 let očekávat kapacitní proud oblasti přibližně 234 (250) A, opět dle použité metody. Z těchto závěrů plyne, že tlumivky instalované v TR Tábor budou i za 20 let dostačující a nebude nutná jejich výměna (za předpokladu výstavby TR Náchod).

Situace pro TR 110/22 kV Náchod je následující. Pokud by došlo k výstavbě nyní (rok 2012), pohyboval by se kapacitní proud kolem 92 (98) A. Realizace projektu je plánována na rok 2016, tomu by odpovídal kapacitní proud cca 95 (101) A. Výhledově lze pak očekávat nárůst za 20 let k hodnotě 108 (113) A. Je však zřejmé, že predikovat vývoj na 20 let dopředu na základě současného trendu (určeném čistě matematicky) může být poměrně zavádějící. V případě TR Náchod je však opodstatněné očekávat do budoucna jistý nárůst kapacitního proudu a to zejména v oblasti sjezdů z dálnice D3, o které se již nyní zajímají investoři. Bude nutné zajistit napájení a vystavět nová vedení, která pochopitelně spadnou pod novou TR Náchod. S každým kilometrem kabelového vedení pak enormně narůstá kapacitní proud, s čímž je nutné uvažovat.

Dalším aspektem, který pravděpodobně v širším časovém horizontu navýší kapacitní proud, je možné budoucí zaústění nových linek do centra města (z důvodu větší bezpečnosti dodávky elektrické energie a rovnoměrnějšího rozložení napájení).

**Tabulka 2.6 – Predikce kapacitních proudů pro TR Náchod.**

TR 110/22 kV NÁCHOD – VÝHLED ZA 20 LET							
Vývod	Délka [km]		I <sub>KAP</sub> [A]				
	VENK	KABEL	VENK	KABEL Katalog	KABEL Norma	CELKEM Katalog	CELKEM Norma
Stádleč*	32,44	4,18	2,04	14,29	15,37	16,33	17,41
Sedlec	56,45	1,58	3,56	5,39	5,77	8,94	9,33
Milevsko	33,48	0,2	2,11	0,73	0,75	2,84	2,86
Votice	73,59	3,11	4,64	9,87	10,37	14,51	15,01
Vožice	33,45	2,98	2,11	9,34	9,85	11,45	11,96
Klokoty	1,86	9,60	0,12	35,31	38,47	35,43	38,58
Jordán*	-	-	-	-	-	-	-
Náchod**	6,66	0,66	0,42	2,26	2,31	2,68	2,73
<b>Oblast celkem</b>	<b>237,93</b>	<b>22,31</b>	<b>15,00</b>	<b>77,19</b>	<b>82,89</b>	<b>92,18</b>	<b>97,88</b>
<b>Při uvážení nárůstu cca 0,75 A/rok</b>						<b>108</b>	<b>113</b>

\* Z dostupných dat není možné jednoznačně určit, která DTS budou napájena z linky Jordán a která z linky Stolak. Zároveň není jasné, která vedení spadají pod vývody Stádlec a Jordán. Z těchto důvodů jsou pro potřeby výpočtu kapacitního proudu všechna vedení přiřazena lince Stádlec.

\*\* Stejná situace nastává pro linky Čekanice a Náchod. Pro výpočet jsou všechna vedení přiřazena lince Náchod, přičemž reálné zapojení bude pravděpodobně jiné.

V současné době činilo zatížení převáděných linek v nejhorším případě 18 MW. K datu realizace se očekává nárůst na 21 MW, což už je hodnota vyžadující druhý transformátor. Z tohoto důvodu bude v nové TR připraveno stání pro oba transformátory, přičemž nutnost osazení obou bude zhodnocena až těsně před samotnou realizací na základě skutečných hodnot zatížení.

### 3 Návrh způsobu provozu uzlu TR 110/22 kV Náchod

V této kapitole bude proveden návrh způsobu provozu uzlu plánované TR 110/22 kV Náchod. Návrh bude vycházet z informací představených v předchozích kapitolách. Zejména budou respektována kritéria uvedená v kapitole 1.6, předpokládané hodnoty kapacitního proudu oblasti z kapitoly 2.3. Zároveň bude zohledněna velikost zbytkového proudu.

Celá práce byla doposud koncipována tak, aby připravila půdu pro samotný návrh a co největší mírou usnadnila rozhodování. Díky všem předešlým informacím lze jednoznačně vyloučit provoz s izolovaným uzlem a v podstatě i uzemnění uzlu přes odporník (jeho možné použití bude ještě diskutováno). Jako nejvhodnější variantu pro provedení uzlu TR 110/22 kV Náchod **volím zhášecí tlumivku** a to zejména z následujících důvodů:

- Očekávaná velikost kapacitního proudu oblasti napájené z TR Náchod se může v časovém horizontu 20 let pohybovat od 90 do 110 A v běžném zapojení. Při náhradním napájení TR Tábor lze ke stávající hodnotě přičíst kapacitní proud vývodů, které by přešly pod TR Náchod. Necht' je uvažována hodnota 60 A, tedy v podstatě celá přípojnice A při současném stavu. Z výkonového hlediska je tato úvaha možná (nově vybudované dvojité vedení mezi oběma transformovkami přenesou dohromady až 20 MW) za předpokladu dostatečné rezervy v transformaci. Jako maximální možný kapacitní proud lze tak počítat cca 170 A, což je hodnota, která neklade použití tlumivky žádné překážky.
- Vývody v TR Náchod jsou tvořeny téměř 240 km venkovních a 22 km kabelových vedení. Jak už samotná délka venkovních vedení, tak i dobré zkušenosti z posledních let s provozem kabelových vedení v kompenzovaných sítích opodstatňují provoz se zhášecí tlumivkou.
- V současnosti jsou převáděné vývody provozovány jako kompenzované, čemuž odpovídají nižší nároky na uzemnění a z toho plynoucí kroková a dotyková napětí. Zavedení odporníku by představovalo nutnost kontroly stávajícího uzemnění a pravděpodobně rozsáhlé nápravy. Provozovat venkovní síť s odporem je z tohoto důvodu nepřijatelné.
- Z dispečerského hlediska je jednoznačně upřednostněno použití zhášecí tlumivky a to z důvodu možnosti vymanipulování poruchy a určení jejího místa.

Výše popsané důvody vedou jednoznačně k použití zhášecí tlumivky, v případě potvrzení nutnosti druhého transformátoru k použití tlumivek dvou. Jediná diskutovatelná situace, která by mohla nastat, je budoucí zaústění nových linek do města a napájení kabelové

sítě. Nelze s určitostí říct, jak by tento stav konkrétně vypadal a jak by se napájení kabelové sítě rozdělilo mezi TR Tábor a Náchod. Jako nejhorší případ se nabízí celá kabelová síť města, která je nyní téměř výhradně připojena k přípojnici B v TR Tábor. Kapacitní proud této části by v horizontu 20 let mohl dosáhnout 170 A, což by vedlo k maximálnímu možnému očekávanému proudu oblasti 340 A (běžný provoz + náhradní napájení = 170 A, kabelová síť = 170 A). Tento případ je však v podstatě nepravděpodobný už jen z důvodu, že současná TR Tábor by tím téměř byla nevyužita. Zároveň do úvah nebyla zařazena možnost výpomoci TR Planá, kde byla nově nasazena tlumivka na místo odporu.

Jak je patrné, možností provozu budoucí sítě je mnoho a se současnými predikcemi se mnohdy jedná pouze o spekulace. Výše popsané lze shrnout do konečného návrhu:

- a) V případě osazení pouze jednoho transformátoru 25 MVA je vyloučeno napájení kabelové sítě i významné pomoci při náhradním napájení TR Tábor a to z důvodu nízké rezervy transformačního výkonu. V tomto případě lze uvažovat kapacitní proud pouze od nyní jistých vývodů, tedy 110 A + rezerva = 150 A. Tomu odpovídá jalový výkon tlumivky 1,9 MVar. Vypočet je možno provést pomocí vztahů z kapitoly 1.3.2, nebo zjednodušeně:

$$Q_{REZ\_a} = U_f \cdot I_{KAP\_a} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 150 = 1,9 \text{ MVar} \quad (3.1)$$

- b) Jelikož se však od TR Náchod očekává do budoucna výpomoc při náhradním napájení TR Tábor, je osazení druhého transformátoru do TR Náchod jen otázkou času. Z toho důvodu je nutné do návrhu výkonu tlumivky zahrnout i kapacitní proud náhradně napájených vývodů z TR Tábor. Celkový kapacitní proud by v tomto případě dosahoval 170 A + rezerva = 230 A, což dává výkon 2,9 MVar

$$Q_{REZ\_b} = U_f \cdot I_{KAP\_b} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 230 = 2,9 \text{ MVar} \quad (3.2)$$

- c) Poslední aspekt mající vliv je provozování kabelové sítě. Při nejhorším možném případě napájení celé stávající kabelové sítě však zřejmě nebude nutné uvažovat výpomoc při náhradním napájení. TR Tábor by totiž v tomto případě disponovala dostatečnou transformační kapacitou v podobě zdravého transformátoru 40 MVA a zároveň TR Náchod by měla opačný problém. Kapacitní proud by v tomto případě byl vyčíslen na 110 A (běžný provoz) + 170 A (kabelová síť) + rezerva = 350 A. Tomu odpovídá výkon 4,5 MVar.

$$Q_{REZ\_c} = U_f \cdot I_{KAP\_c} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 350 = 4,5 \text{ MVar} \quad (3.3)$$

Z výše provedených výpočtů respektujících možný budoucí provoz lze konstatovat, že TR 110/22 kV Náchod by měla být vybavena **zhášecími tlumivkami o výkonu 5 MVar** (pro každý transformátor jedna přímo připojená do uzlu). Touto volbou bude respektován stav N-1, tedy že při výpadku jednoho transformátoru v TR Náchod bude druhý schopen z hlediska kapacitních proudů převzít napájení celé oblasti. V případě dalšího nárůstu by se dalo hledat řešení v připojení tlumivek přes klíčovací odpojovače, čímž by byly umožněny různé kombinace včetně paralelního provozu obou tlumivek s jedním transformátorem. Konkrétní navrhovaný typ je popsán v následující tabulce.

**Tabulka 3.1 – Navrhovaná zhášecí tlumivka od společnosti EGE.**

<b>Označení</b>	ASR.5 (pro trvalý provoz)
<b>Jmenovitý výkon</b>	5000 kVAr
<b>Jmenovité napětí</b>	13,3 kV
<b>Regulační rozsah proudu</b>	38-380 A
<b>Jmenovité napětí měřicího vinutí</b>	$U_n = 100 \text{ V } \pm 10\%$
<b>Jmenovité napětí pomocného výkonového vinutí</b>	$U_n = 500 \text{ V } \pm 10\%$
<b>Výška</b>	3650 mm
<b>Šířka</b>	2680 mm
<b>Hloubka</b>	1820 mm
<b>Hmotnost</b>	8500 kg

K potvrzení vhodnosti provozu uzlu se zhášecí tlumivkou je vhodné zvážit i velikost zbytkového proudu, který samozřejmě přímo souvisí s rozsahem sítě a tím i kapacitním proudem. Jak již bylo uvedeno v předchozím, zbytkový proud je tvořen svodovými zemními proudy, proudy vyšších harmonických a jalovým proudem daným nepřesným vyladěním. Dle [1] nesmí přesáhnout 10%  $I_{KAP}$  a musí být menší než 60 A (převzato z německých norem). Pokud není známa přesná hodnota, uvažuje se právě mezní stav 10%  $I_{KAP}$ . V případě TR Náchod lze tak uvažovat 15, 20 a 35 A ve shodě s možnými rozsahy napájení popsány výše. Tyto hodnoty jsou zjevně menší než mezních 60 A, čímž je potvrzena použitelnost zhášecích tlumivek pro budoucí TR Náchod.

Vzhledem k tomu, že budoucí situace by měla být zvládnutelná v širokém časovém horizontu pomocí tlumivek (vlastních, či okolních transformoven), není nutné do budoucna uvažovat o použití odporníku, který se pro dnešní dobu a především budoucnost zdá být v provozování smíšených sítí krokem zpět. Této myšlence dále napomáhají prováděné experimenty a z nich získané kladné zkušenosti s metodou přizemňování postižené fáze. Možnou budoucí aplikací této metody by byl zbytkový proud v místě poruchy minimalizován a problematika zbytkového proudu v podstatě vyřešena.

## 4 Uzemnění v sítích vysokého napětí

V této kapitole bude pojednáno o uzemnění v sítích VN a následně navržena metodika určení velikosti zbytkového kapacitního proudu pro kontrolu uzemnění stávajících vedení a návrhu nových sítí.

### 4.1 Teorie uzemňování v sítích VN

Uzemněním sítí VN se zabývají normy PNE 33 0000-1 [16], PNE 33 0000-4 [17], ČSN 33 3201 [18] a další. Nejnutnější informace pro seznámení s touto problematikou jsou vytaženy právě z nich.

Účelem uzemnění neživých (ale vodivých) částí sítě je ochrana před úrazem elektrickým proudem a to jak v normálním, tak především v poruchovém stavu. Dle [16] musí návrh uzemnění splňovat následující podmínky:

- Zajistit mechanickou pevnost a odolnost proti korozi
- Odolat z hlediska oteplení nejvyššímu poruchovému proudu
- Zamezit poškození majetku a zařízení
- Zajistit bezpečnost osob s ohledem na napětí na uzemnění, které se objeví při nejvyšším poruchovém proudu

Příčemž parametry rozhodující při dimenzování uzemnění jsou velikost poruchového proudu, trvání poruchy a vlastnosti půdy.

Všechny výše uvedené podmínky jsou v podstatě řešitelné vhodným výběrem materiálu, jeho dimenzováním a celkově konstrukčním provedením uzemnění. Vzhledem k poslednímu bodu zadání diplomové práce bude pozornost upřena k poslední podmínce, tedy k bezpečnosti s ohledem na dotyková a kroková napětí.

#### 4.1.1 Dotykové a krokové napětí

Dotyková a kroková napětí jsou nedílnou součástí problematiky uzemňování. Vyskytují se na uzemnění a v jeho blízkosti vlivem průchodu proudu přes zemní odpor a jsou přímo úměrné právě těmto veličinám. Základem pro pochopení těchto jevů je teorie vstupu elektrického proudu do země a jeho následné šíření. Pro vysvětlení poslouží nejjednodušší případ uzemnění a to polokulová elektroda na povrchu země.

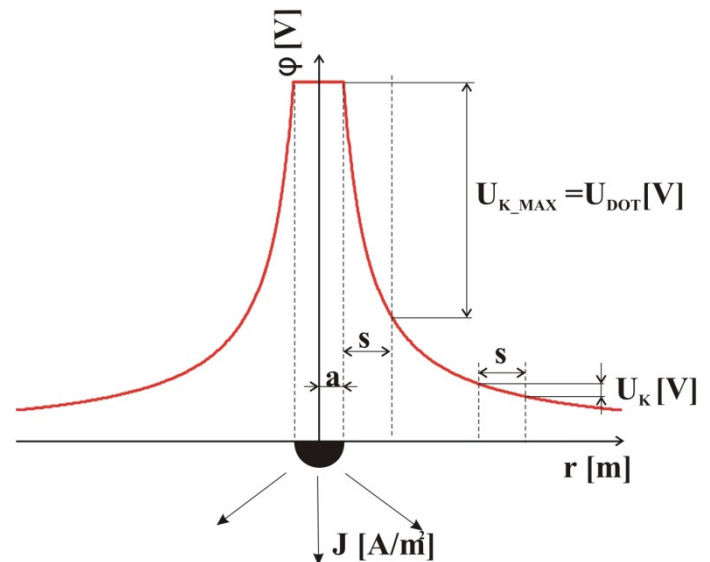
Do elektrody o poloměru  $a$  [m] vstupuje proud  $I$  [A], který se za předpokladu konstantní rezistivity půdy  $\rho$  [ $\Omega$ m] šíří všemi směry. Na základě zákonů elektromagnetického pole lze odvodit elektrický potenciál jako funkci polohy, proudu a rezistivity:



$$\varphi = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (4.1)$$

Kde:  $\varphi$  [V] je elektrický potenciál,  $I$  [A] je elektrický proud,  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] je rezistivita půdy,  $\pi$  [-] je Ludolfovo číslo a  $r$  [m] je vzdálenost od středu elektrody.

Aplikací vztahu (4.1) lze získat grafické vyjádření (obr. 4.1), které velmi názorně osvětluje vznik dotykového a krokového napětí. S různou vzdáleností od uzemnění se mění potenciál, což vede k jeho rozdílu a tím vzniku napětí. Na obr. 4.1 je zaneseno krokové napětí  $U_K$  při délce kroku  $s$  (uvažuje se 1 m), které zřejmě poroste s blížící se vzdáleností k uzemnění, přičemž maximální hodnoty dosáhne v bez-



Obrázek 4.1 – K vysvětlení dotykového a krokového napětí.

prostřední blízkosti elektrody. Stejně hodnoty dosáhne i napětí dotykové, pro které se počítá s překlenutím vzdálenosti při doteku uzemnění taktéž 1 m a pro které platí:

$$U_{K\_MAX} = U_{DOT} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r+s} \right) \quad (4.2)$$

Kde:  $U_{K\_MAX}$  [V] je maximální krokové napětí,  $U_{DOT}$  [V] je dotykové napětí,  $I$  [A] je elektrický proud,  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] je rezistivita půdy,  $\pi$  [-] je Ludolfovo číslo,  $r$  [m] je vzdálenost od středu elektrody a  $s$  [m] je délka kroku a délka překlenuté vzdálenosti.

Poznatek, že krokové napětí může ve svém maximu dosáhnout hodnoty dotykového napětí, je mnohdy zohledněn i v normách tím, že se krokovými napětími není nutno zabývat v případech vyhovujících napětí dotykových.

### Dovolená dotyková napětí dle PNE 33 0000-1

Dovoleným (tedy z hlediska fyziologických účinků bezpečným) napětím se podrobně zabývá norma [16]. Zde budou vypsány nezbytné informace potřebné k porozumění a orientaci v této oblasti. Norma rozeznává nejen dva druhy zařízení – elektrické stanice a venkovní vedení VN, ale i lokality z hlediska frekventovanosti a např. možnosti obutí. Dovolená napětí jsou uvedena v následujících tabulkách.

Tabulka 4.1 – Dovolena dotyková napětí  $U_{TP}$  ( $U_{vTP}$ ) a kroková napětí u zařízení nad AC 1 000 V [PNE].

<b>Druh zařízení: 1. Elektrické stanice</b>		
Doba trvání <sup>1</sup> [s]	$t \geq 5$	$t < 5$
a) Rozvodná zařízení dodavatele elektřiny, se kterými mohou přijít do styku laici a pracovníci seznámení včetně distribučních transformoven vn/nn se společným uzemněním vn a nn <sup>2</sup> .		
<b>Dovolené dotykové napětí <math>U_{TP}</math> [V]</b>	75	viz obrázek 4 a 5 PNE a Příloha B ČSN EN 50522
<b>Krokové napětí*</b> [V]	-	
b) Zařízení elektrických stanic vn, vvn a zvn v prostorách vnitřních i venkovních mimo distribuční transformovny vn/nn.		
<b>Dovolené dotykové napětí <math>U_{vTP}</math> [V]</b>	150**	viz Příloha B ČSN EN 50522 obr. B.2
<b>Krokové napětí*</b> [V]	-	
<b>Druh zařízení: 2. Venkovní vedení VN</b>		
Doba trvání <sup>1</sup> [s]	$t \geq 1$	$t < 1$
a) Venkovní vedení v místech jako jsou hřiště, plavecké bazény, kempy, rekreační plochy a podobná místa, kde se mohou shromažďovat lidé s bosýma nohama.		
<b>Dovolené dotykové napětí <math>U_{TP}</math> [V]</b>	75	viz obrázek 4 PNE a ČSN EN 50341-1, čl. 6.2.4.3, obr. 6.2 (křivka UD1), tab. G.8
<b>Krokové napětí*</b> [V]	-	
b) Venkovní vedení ve městech, obcích, v místech zastavěných nedaleko měst a obcí <sup>3</sup> – místa, kde lze rozumně předpokládat, že lidé jsou obuti.		
<b>Dovolené dotykové napětí <math>U_{vTP}</math> [V]</b>	150	viz obrázek 4 a ČSN EN 50341-1, čl. 6.2.4.3, obr. 6.2 (křivka UD2)
<b>Krokové napětí*</b> [V]	-	
c) Venkovní vedení v místech odlehlých <sup>3,4</sup>		
<b>Dovolené dotykové napětí [V]</b>	viz čl. 5.4.2.5.4 PNE a ČSN EN 50341-1, čl. 6.2.4.2	viz čl. 5.4.2.5.4 a ČSN EN 50341-1, čl. 6.2.4.2
<b>Krokové napětí*</b> [V]	-	
<b>Druh zařízení: 3. Venkovní vedení VVN a ZVN<sup>5</sup></b>		
Dle ČSN EN 50341-1 + Změna A1 a ČSN EN 50341-3, změna Z2 a PNE 33 3300-0.		

Poznámky k tabulce č.4:

\* Pro kroková napětí není nutné stanovit dovolené hodnoty.

\*\* Hodnota  $U_{VTP}$  respektuje vliv přídatné rezistence obuvi podle přílohy B ČSN EN 50522 a přílohy č. 10.

1) Dobou trvání se rozumí celková doba výskytu napětí, sestávající z doby nastavení základní ochrany a vlastní doby vypínače. Nejkratší dobu trvání lze uvažovat  $t = 0,1$  s.

2) PNE 33 0000-1ed.5 nepředpokládá rozdělená uzemnění distribuční transformovny vn/nn na samostatné uzemnění vn a nn, kromě čl. 5.4.1.4.4.1 PNE.

3) Mimo vedení podle čl. 3.4.1.1

4) Odlehými místy (okolí podpěrných bodů kde se lidé vyskytují zřídka - viz též ČSN EN 50341-3, změna Z2, čl. 6.2.4.2/CZ.1 a ČSN EN 50423-3, národní příloha NA, čl. 6.2.4.2/CZ.1) se rozumí:

a) místa v nezastavěných prostorách (např. pole) ve vzdálenosti větší než 10 m od okraje dálnice a komunikací třídy I až III;

b) místa dále než 50 m od soustředěné občanské a bytové zástavby;

c) místa dále než 25 m od jednotlivých osamělých budov a továrních objektů mimo soustředěnou zástavbu;

d) místa dále než 50 m od okraje volných rekreačních a sportovních ploch mimo soustředěnou zástavbu (např. areálu zdraví, jednoduchých hřišť, parkových ploch ap.);

e) polní a lesní cesty.

5) V případech venkovních vedení vvn a zvn kdy hodnoty dotykových napětí jsou vyšší než hodnoty dovolených dotykových napětí a byla provedena navržená opatření ke snížení dotykových napětí aby

požadavky byly splněny (viz ČSN EN 50341-1 čl. 6.2.4.2 a ČSN EN 50341-3, změna Z2 čl. 6.2.4.2/CZ.3

a PNE 33 3300-0) je účelné provést kontrolu hodnot krokových napětí.

**Tabulka 4.2 – Minimální požadavky pro vzájemné propojení uzemňovacích soustav NN a VN vycházející z mezí nárůstu potenciálu země pro případ zemní poruchy na zařízení VN [PNE].**

Typ sítě NN a)	Požadavky na meze nárůstu potenciálu země $E_{PR}$		
	Nárůst potenciálu země ve vztahu k dotykovému napětí	Napěťové namáhání c)	
		Doba trvání poruchy $t_F \leq 5$ s	Doba trvání poruchy $t_F > 5$ s
TN	$E_{PR} \leq F \cdot U_T$ b)	$E_{PR} \leq 1\,200$ V	$E_{PR} \leq 250$ V
TT	Nemá význam	$E_{PR} \leq 1\,200$ V	$E_{PR} \leq 250$ V

a) U telekomunikačních zařízení se mají použít doporučení ITU.

b) Součinitel F

- Je-li vodič PEN spojen pouze ve stanici se společným uzemněním systémů VN a NN, má součinitel hodnotu: **F = 1**
- Je-li vodič PEN spojen ve stanici se společným uzemněním systémů VN a NN, dále je vodič PEN (PE) v síti NN typu TN-C (TN-S) pravidelně uzemňován, pak lze použít hodnotu součinitele: **F = 2**
- (S ohledem na rezistivitu půdy se mohou použít vyšší hodnoty součinitele F za předpokladu, že vodič PEN je ve stanici spojen se společným uzemněním systémů VN a NN, dále je vodič PEN (PE) v síti NN typu TN-C (TN-S) pravidelně uzemňován, pak s ohledem na vysokou rezistivitu půdy může být jeho hodnota: **F = 2 až 5**)

c) Mez se může zvýšit, jsou-li instalována příslušná zařízení NN

Legenda:

$E_{PR}$  Nárůst potenciálu země v případě zemní poruchy v soustavě VN při spol. uzemnění systémů VN a NN

$E_{PR} = Z_B \cdot I_E$  (obecný vztah)  $Z_B$  je impedance (odpor) společné uzemňovací soustavy

$I_E$  je zemní proud v soustavě VN (viz Tabulka 4.3)

$U_T$  Dotykové napětí s ohledem na dobu trvání zemní poruchy v soustavě VN odvozené z obrázku 4 PNE

F Součinitel pro vztah mezi nárůstem potenciálu země  $E_{PR}$  a dotykovým napětím  $U_T$  (viz b)

V tabulkách výše se pracuje nejen s dovoleným dotykovým napětím  $U_{TP}$  (z anglického „Permissible touch voltage“), ale i s tzv. předpokládaným dovoleným napětím  $U_{VTP}$ . Dovolené napětí uvažuje v podstatě nejhorší případ, tedy bosé nohy a žádné další přídavné rezistance. Jeho hodnota je 75 V a je neměnná. Naopak předpokládané dovolené napětí respektuje odpor bot a odpor přechodu mezi podrážkou a zemí. Díky tomu se na uzemnění může objevit vyšší napětí (např. 150 V i víc) a stále se je toto napětí považováno za bezpečné. Podrobněji je o této problematice pojednáno v [16], zejména příloha 10.

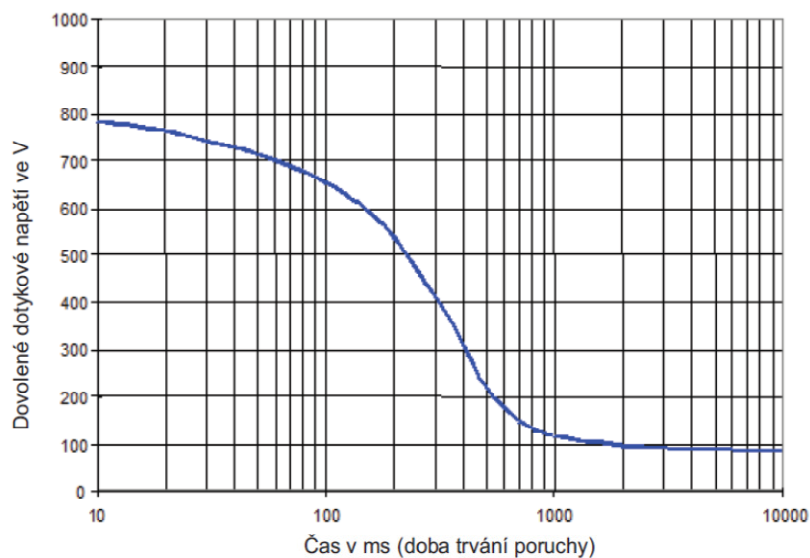
Hodnoty uvedené v tabulce 4.1 se dle [16] považují za splněné, pokud je splněna jedna z podmínek C.

- C1: Uvažovaná instalace se stane součástí celkové uzemňovací soustavy
- C2: Nárůst potenciálu země, určený měřením nebo výpočtem nepřekročí dvojnásobek hodnot dovoleného dotykového napětí podle obrázku č. 1 v [16].

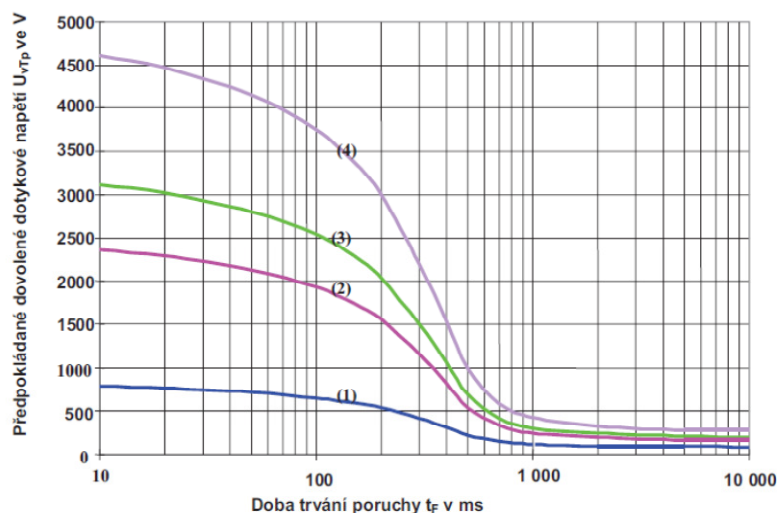
nebo

- Jsou provedena příslušná specifikovaná opatření M v souladu s velikostí vzrůstu zemního potenciálu a trvání poruchy. Opatření M jsou popsána v příloze E ČSN EN 50522

Dále existují případy, kdy lze od kontroly dotykových napětí upustit. Jedná se především o venkovní vedení VN, VVN a ZVN s rychlým automatickým vypnutím od zdroje (do 1s hlavní, do 5s záložní ochranou), které splňují požadavky jako odizolování terénu kolem podpěrného bodu, zřízení ekvipotenciálních kruhů, použití neprůrazných izolátorů či konzol z izolujícího materiálu. Bližší specifikace jsou uvedeny v [16].



**Obrázek 4.2 – Dovolená dotyková napětí pro omezené trvání proudu pro holou ruku a bosou nohu [16].**



Obrázek 4.3 – Dovolená dotyková napětí pro různá prostředí a doplňkové odpory [16].

#### 4.1.2 Zemní proud

Zemním proudem je označován proud tekoucí při zemní poruše skrz uzemňovací soustavu zpět ke zdroji. Jeho velikost zásadně ovlivňuje návrh uzemnění jak z hlediska tepelného zatížení, tak dotykových a krokových napětí. Hodnoty uvažovaných zemních proudů jsou na základě normy [16] vypsány v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3 – Hodnoty proudů pro návrh uzemňovacích soustav [16].

Typ sítě nad 1 kV	Určující pro tepelné zatížení <sup>a) e)</sup>		Určující pro vzrůst potenciálu
	Zemnič	Uzemňovací přívod	
Elektrické sítě			
Sítě s izolovaným uzlem (včetně stanice)	$I''_{kEE}$	$I''_{kEE}$	$I_E = r \cdot I_C$ <sup>b)</sup>
Sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů včetně krátkodobého přizemnění pro detekci	$I''_{kEE}$	$I''_{kEE}$	$I_E = r \cdot I_{res}$ <sup>b)</sup>
Stanice s nízkoohmovým uzemněním uzlu	$I''_{k1}$	$I''_{k1}$	$I_E = r \cdot I''_{k1}$
Elektrické stanice v sítích s kompenzací zemních kapacitních proudů včetně krátkodobého přizemnění pro detekci <sup>g)</sup>			
Stanice bez zhášecích tlumivek <sup>f)</sup>	$I''_{kEE}$	$I''_{kEE}$	$I_E = r \cdot I_{res}$ <sup>b)</sup>
Stanice se zhášecími tlumivkami	$I''_{kEE}$	$I''_{kEE}$	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{res}^2}$ <sup>b) h)</sup>
Elektrické stanice v sítích s nízkoohmovým uzemněním uzlu (zejména vvn a zvn)			
Stanice bez uzemnění uzlu	$I_{k1}$	$I_{k1}$	$I_E = r \cdot I''_{k1}$
Stanice s uzemněním uzlu	$I_{k1}$	$I_{k1}$	$I_E = r \cdot (I''_{k1} - I_N)$ <sup>d)</sup>

### Legenda k Tabulka 4.3

- a) Pokud je možných několik proudových drah, lze při návrhu elektrod uzemňovací soustavy uvažovat výsledné rozdělení proudů.
  - b) Nejsou-li automaticky vypnuty zemní poruchy, je nutné v závislosti na provozních zkušenostech uvažovat dvojité zemní zkraty.
  - c) Maximální proud zhášecí tlumivky je zapotřebí uvažovat při dimenzování jejího uzemňovacího přívodu.
  - d) Zemní proud  $I_E$  má být kontrolován, je-li vnější porucha rozhodující.
  - e) Minimální průřezy vodičů pro zemniče a uzemňovací přívody jsou uvedeny v tabulce č. 8. [16].
  - f) V případě nesprávně vykompenzovaných sítí se nemá všeobecně používat vztah, že  $I_{res}$  je 10 % z  $I_C$ . Induktivní/kapacitní složka zbytkového proudu se má též dodatečně uvažovat.
  - g) Krátkodobé přizemnění soustavy s uzlem do hvězdy se spustí automaticky do 5 s po detekci ZS.
  - h) V případě poruchy ve stanici se má uvažovat kapacitní zemní proud  $I_C$ . Mají se také uvažovat další budoucí kompenzační tlumivky vně stanice.
- $I_C$  Vypočtený nebo měřený zemní kapacitní proud
- $I_{res}$  Zbytkový proud zemního spojení (viz obrázek 3 ČSN EN 50522). Pokud není známa přesná hodnota, může se u správně vykompenzovaných sítí uvažovat, že  $I_{res}$  je 10 % z  $I_C$  (viz též f).
- $I_L$  Jmenovitý proud zhášecí tlumivky, případně součet jmenovitých proudů paralelních zhášecích tlumivek v příslušné transformovně.
- $I_{kEE}''$  Proud dvojitého zemního spojení vypočtený podle HD 533 (pro  $I_{kEE}''$  může být jako maximální hodnota užito 85 % počáteční velikosti symetrického zkratového proudu).
- $I_{k1}''$  Počáteční zkratový proud jednopólového zkratu, vypočtený podle ČSN EN 60909-0
- $I_E$  Zemní proud (viz obrázek 2 ČSN EN 50522)
- $I_N$  Proud uzemněním uzlu transformátoru (viz obrázek 2 ČSN EN 50522)
- $r$  Redukční činitel (viz přílohu I ČSN EN 50522)

#### 4.1.3 Odpor uzemnění a jeho dimenzování na dotykové napětí

Odpor uzemnění závisí na odporu půdy a provedení zemničů. Zemniče jsou dle [14] členěny na **náhodné** (např. podzemní část ocelových konstrukcí nebo výztužná ocel v základech) a **strojené** (základové, tyčové a hloubkové, zemnicí sítě, zemniče pro vyrovnání potenciálu). Obecně pro odpor uzemnění platí následující vztah, který je přímo aplikovatelný na venkovní vedení (u kabelové sítě delší než 1 km s kabely s oboustranně uzemněným pláštěm a zkratovým proudem do 1500 A se vznik nebezpečných napětí nepředpokládá, výjimkou je kabel typu AXEKCY s Cu stíněním 6 mm<sup>2</sup>).

$$R_E \leq k \cdot \frac{U_{TP}}{I_E} \quad (4.3)$$

Kde:  $R_E$  [ $\Omega$ ] je zemní odpor,  $U_{TP}$  [V] dovolené dotykové napětí dle tabulky 4.1,  $I_E$  [A] je zemní proud dle tabulky 4.3 a  $k$  [-] je součinitel tvaru zemniče.

Jelikož tvar zemniče rovněž rozhoduje, zda se velikost napětí na uzemnění projevuje jako nebezpečné dotykové napětí, je zaveden součinitel tvaru zemniče, který má dle [16] následující hodnoty:

- tyčový nebo hloubkový zemnič  $k = 1,5$
- páskový zemnič paprskový  $k = 2$
- páskový zemnič obvodový  $k = 3$
- dva ekvipotenciální kruhy<sup>13</sup>  $k = 5$

Pokud není v izolovaných nebo kompenzovaných sítích splněna podmínka (4.3), tedy nejsou dodržena dovolená dotyková napětí, má být dle [16] přijato jedno z opatření zajišťujících nepravděpodobnost dlouhotrvajícího zemního spojení, nebo omezení jeho trvání na krátkou dobu. Konkrétně se jedná o následující opatření:

- použití tyčových izolátorů nebo izolátorů s pevným jádrem
- použití izolátorů, u kterých je možné stav izolace vizuálně kontrolovat (například čapkové skleněné izolátory)
- použití zařízení pro detekci zemního spojení a odpojení vedení v případě ZS

Pro trafostanice VN/NN se situace posuzuje obdobně. Předně se zvažuje, zda jsou uzemňovací systémy obou napěťových hladin součástí celkové uzemňovací soustavy či ne. Jsou-li, považuje se situace za vyhovující. Nejsou-li, je třeba se uzemněním blíže zabývat zejména z pohledu závažného potenciálu, který se do soustavy NN může dostat při zemní poruše ze soustavy VN. Dle [16] se uvažují dva případy:

- Propojení VN a NN uzemňovacích soustav (doporučeno, je-li proveditelné). Musí být splněny minimální požadavky z tabulky 4.2.
- Rozdělení VN a NN uzemňovacích soustav. Zemniče musí být odděleny tak, aby bylo vyloučeno nebezpečí pro osoby i zařízení v instalacích NN.

Společná uzemnění pro zařízení VN a NN v distribuční stanici je dle [16] třeba kontrolovat podle vztahu:

$$R_B \leq \frac{U_{TP}}{I_E} \quad (4.4)$$

Kde:  $R_B$  [ $\Omega$ ] je celkový odpor uzemnění vodičů PEN (případně PE) všech odcházejících vedení z transformovny včetně odporu uzemněného středu (uzlu) zdroje,  $U_{TP}$  [V] dovolené dotykové napětí dle tabulky 4.1 a  $I_E$  [A] je zemní proud na straně VN dle tabulky 4.3.

<sup>13</sup> Dle [PNE] článek 3.4.1.1: Nejméně dva, alespoň na dvou místech, vzájemně propojené obvodové zemniče, uložené ve vzdálenosti 1 m a 3 m od neživých vodivých částí, přičemž vnitřní je uložen v hloubce 0,4 m a vnější v hloubce 0,7 m.

## 4.2 Možné limity rozšiřování kompenzovaných sítí

Vzhledem k výše uvedeným podmínkám pro dimenzování uzemnění lze stanovit možné limity pro budoucí rozšiřování kompenzovaných sítí právě s ohledem na bezpečná dotyková a kroková napětí. Jelikož jsou v posuzování venkovních vedení a trafostanic VN/NN rozdíly, je vhodné i výpočty provádět odděleně a výsledky poté společně analyzovat.

### 4.2.1 Vzhledem k venkovním vedením

Pro výpočty uzemnění venkovních vedení lze přímo aplikovat podmínku (4.3) s příslušnými součiniteli tvaru zemniče. Za dovolené napětí je s ohledem na stanovení nejpřísnějších podmínek volena hodnota 75 V a zemní proud je pro kompenzované sítě vybrán na základě tabulky 4.3. Jelikož není známa přesná hodnota zbytkového proudu, je uvažován 10% kapacitního proudu sítě. Rovněž redukční činitel je s ohledem na nejnepříznivější stav uvažován 1. Samotný výpočet lze provést ve dvou rovinách – *stanovení maximálního odporu uzemnění pro různé rozsahy sítě s ohledem na dodržení dovoleného dotykového napětí* a *stanovení maximálního rozsahu sítě pro stávající odpory uzemnění s respektováním dovoleného dotykového napětí*.

#### a) Stanovení maximálního zemního odporu pro různé rozsahy sítě a činitele tvaru zemniče s ohledem na dovolené dotykové napětí

Po dosazení do vztahu (4.3) lze pro jednotlivé tvary zemniče a rozsahy sítě psát následující vztah a sestavit tabulku.

$$R_E \leq k \cdot \frac{U_{TP}}{I_E} = k \cdot \frac{75}{0,1 \cdot I_{KAP}} \quad (4.5)$$

Tabulka 4.4 – Dimenzování zemního odporu vzhledem k rozsahu sítě pro  $U_{TP} = 75$  V.

Provedení zemniče	k [-]		$I_{KAP}$ [A]					
			100	300	450	600	800	1000
Tyčový nebo hloubkový zemnič	1,5	$R_E$ [ $\Omega$ ]	11,3	3,8	2,5	1,9	1,4	1,1
Páskový zemnič paprskový	2		15,0	5,0	3,3	2,5	1,9	1,5
Páskový zemnič obvodový	3		22,5	7,5	5,0	3,8	2,8	2,3
Dva ekvipotenciální kruhy	5		37,5	12,5	8,3	6,3	4,7	3,8

Z uvedené tabulky plyne očekávaný závěr – s rostoucím rozsahem sítě vzrůstají nároky na dimenzování uzemnění, přičemž zemniče s nižším koeficientem se s postupným růstem  $I_{KAP}$  stávají nepoužitelné z důvodu obtížné realizovatelnosti tak nízkých zemních odporů. V oblastech, kde je dovolené dotykové napětí 150 V, budou maximální zemní odpory dvojnásobné oproti uvedeným hodnotám.



### b) Stanovení maximálního rozsahu sítě pro stávající zemní odpory s respektováním dovoleného dotykového napětí.

Na základě hodnot naměřených v západních Čechách a prezentovaných v literatuře [15] lze konstatovat, že se stávající zemní odpory pohybují v rozsahu cca 1 – 15 Ω. Vzhledem k těmto hodnotám lze na základě podmínky (4.3) vyjádřit následující vztah a sestavit tabulku, kde je opět zohledněn i součinitel tvaru zemniče.

$$R_E \leq k \cdot \frac{U_{TP}}{I_E} \Rightarrow I_{KAP} \leq k \cdot \frac{75}{0,1 \cdot R_E} \quad (4.6)$$

Tabulka 4.5 – Maximální rozsah sítě vzhledem k současnému zemnímu odporu.

Provedení zemniče	k [-]		R <sub>E</sub> [Ω]			
			1	5	10	15
Tyčový nebo hloubkový zemnič	1,5	I <sub>KAP</sub> [A]	1125	225	112,5	75
Páskový zemnič paprskový	2		1500	300	150	100
Páskový zemnič obvodový	3		2250	450	225	150
Dva ekvipotenciální kruhy	5		3750	750	375	250

Pro odpor uzemnění 5 Ω (považováno za reálnou hodnotu v současných sítích) lze pozorovat možné rozsahy sítí od 225 do 750 A podle použitého zemniče. Jelikož není známo, jaký zemnič je konkrétně kde použit, je možno uvažovat s páskovým zemničem paprskovým. Tomu by odpovídal mezní kapacitní proud sítě 300 A. Lze se domnívat, že tento stav reflektuje dimenzování uzemnění na maximální kapacitní proud pro smíšené sítě, který je dle [1] právě 300 A.

#### 4.2.2 Vzhledem k trafostanicím VN/NN

V případě společného uzemnění elektrických zařízení v trafostanici VN/NN lze uvažovat dva stupně výpočtu. První vychází přímo z podmínky (4.4) a týká se dimenzování uzemnění přímo na dovolené dotykové napětí. Druhý pak vychází z tabulky 4.2 a zabývá se přípustným zvýšením potenciálu země. K této podmínce se přistupuje v případě, že z důvodu ztížených půdních podmínek nebyla splněna podmínka (4.4).

Jako dovolené napětí je uvažováno 75 V a zemní proud vychází opět z tabulky 4.3, přičemž jako zbytkový proud je uvažováno 10% kapacitního proudu sítě. Normou je rovněž dán minimální požadovaný odpor společného uzemnění  $R_B = 2 \Omega$ .

**a) Stanovení maximálního rozsahu sítě vzhledem k dovolenému dotykovému napětí**

Po vyjádření ze vztahu (4.4) a následném dosazení lze získat maximální možné rozsahy sítí.

$$R_B \leq \frac{U_{TP}}{I_E} \Rightarrow I_{KAP} \leq \frac{75}{0,1 \cdot R_E} \quad (4.7)$$

**Tabulka 4.6 – Maximální rozsah sítě pro různé odpory společného uzemnění**

<b>R<sub>B</sub> [Ω]</b>	0,5	1	1,5	2
<b>I<sub>KAP</sub> [A]</b>	1500	750	500	375

Z uvedených hodnot je patrné, že pro odpor uzemnění 2 Ω (minimální požadavek normy) je maximální rozsah sítě 375 A. Pokud by došlo ke snížení na 1 Ω, rozsah sítě by vzrostl až na 750 A. Takto nízký odpor uzemnění je však v praxi velmi těžké dodržet.

**b) Stanovení maximálního rozsahu sítě vzhledem k nárůstu potenciálu země**

Tabulka 4.2 obsahuje potřebné vztahy, které po úpravě a dosazení poskytují výsledky pro různé součinitele F.

$$E_{PR} \leq F \cdot U_T \Rightarrow I_E \cdot Z_B \leq F \cdot U_T \Rightarrow I_{KAP} \leq \frac{F \cdot 75}{0,1 \cdot 2} \quad (4.8)$$

**Tabulka 4.7 – Maximální rozsah sítě pro různé součinitele F.**

<b>F [-]</b>	1*	2**	3	4	5
<b>I<sub>KAP</sub> [A]</b>	375	750	1125	1500	1875

\* Vodič PEN spojen pouze ve stanici se společným uzemněním systémů vn a nn.

\*\* Vodič PEN spojen ve stanici se společným uzemněním systémů vn a nn, dále je vodič PEN (PE) v síti nn typu TN-C (TN-S) pravidelně uzemňován.

Koeficienty 1 a 2 jsou běžně používané, vyšší koeficienty přichází v úvahu až pro ztížené půdní podmínky. Pokud by situace nebyla vyřešena ani při použití koeficientu 5, přistupuje se k omezení zemního proudu nebo rozdělení společného uzemnění.

**4.2.3 Zhodnocení limitů**

Výše byl představen možný způsob stanovení limitů pro rozšiřování stávajících sítí. Je zřejmé, že plošné posuzování může být v mnoha ohledech zavádějící, jelikož kvalita a provedení uzemnění se může pro konkrétní oblast lišit. Vzhledem k tomuto faktu je nutné následující hodnoty hodnotit s rezervou. Pro venkovní vedení se zemním odporem podpěrných bodů  $R_E = 5 \Omega$  a pásovým paprskovým zemničem je maximální možný rozsah sítě 300 A. Při použití ekvipotenciálních kruhů až 750 A. Pro trafostanice VN/NN se společným uzemněním se zemním odporem  $R_B = 2 \Omega$  byla stanovena hodnota 375 A v případě uzemnění vodiče PEN pouze v trafostanici a 750 A v případě průběžného uzemňování vodiče PEN i mimo trafostanici. Samozřejmě lze očekávat postupnou degradaci materiálu uzemnění FeZn, čímž by uvedené hodnoty musely být patřičně sníženy.

### 4.3 Metodika určení velikosti zbytkového kapacitního proudu pro kontrolu uzemnění

V této části bude pojednáno o metodice určení velikosti zbytkového kapacitního proudu pro kontrolu uzemnění stávajících a nových vedení. Řešení této problematiky je motivováno zejména provozem sítí o velkém kapacitním proudu a možnou nutností jejich spojení při náhradním napájení. Ačkoli je v současné době normou [16] stanoveno, že uzemnění sítí se nemusí dimenzovat na rozsah sítě přechodně zvětšený, objevuje se snaha distribučních společností být i na tento přechodný stav připraveny a zajistit bezpečnost osob i elektrických zařízení.

Dalším faktorem ovlivňujícím velikost zbytkového proudu je stále větší znečištění sítí vysokého napětí vyššími harmonickými. Tento fenomén patrně představuje větší riziko v průmyslových oblastech či oblastech s koncentrovanou zástavbou než v klidných horských lokalitách bez velkého množství zdrojů harmonických.

Z poznatků uvedených výše i v předchozích kapitolách je patrné, že zbytkový proud bude záležet zejména na velikosti kapacitního proudu, proudu vyšších harmonických a činném svodovém proudu. Z reálných hodnot poskytnutých společností E.ON Česká republika, s.r.o. lze

odhadnout průměrný podíl činného proudu cca 3% a podíl daný nepřesným naladěním tlumivky až 9 % kapacitního proudu. Pro takto naladěné sítě nebude zřejmě dostatečný předpoklad, že zbytkový proud je 10%  $I_{KAP}$ . Se zachováním jisté rezervy pro proudy vyšších harmonických je vhodnější uvažovat s 15 – 20 %  $I_{KAP}$  (při uvážení maximálního možného rozsahu smíšené sítě daného normou 300 A by zbytkovému proudu 20%  $I_{KAP}$  odpovídalo 60 A, což je přesně mezní podmínka pro zbytkový proud daný normou) podle napájené lokality. Opačným opatřením, mající i jiné pozitivní stránky než přesnější vyjádření zbytkového proudu, je **provoz sítí ve vyladěném stavu**. V tom případě se lze spokojit s 10%  $I_{KAP}$ .

Tabulka 4.8 – Naladění vybraných TR v roce 2009.

TR	$I_{KAP}$ [A]	$I_{NAST}$ [A]	$I_{NEVYKOMP}$ [%]	$I_w$ [%]
Tábor 1	117	108	7,69	2,14
Tábor 2	202	182	9,90	2,23
Bechyně 1	104	90	13,46	2,02
Bechyně 2	82	74	9,76	2,13
Vimperk 1	58	53	8,62	3,45
Vimperk 2	53	47	11,32	2,83
Pelhřimov 1	104	95	8,65	1,68
Pelhřimov 2	77	76	1,30	3,51
Počátky	99	101	2,02	3,03
Hradec 1	122	108	11,48	2,66
Hradec2	128	104	18,75	3,13
Písek 1	272	254	6,62	2,39
Písek 2	115	105	8,70	1,96
Veselý 1	67	64	4,48	2,99
Veselý 2	60	74	23,33	2,92
Škoda	94	87	7,45	3,19
Humpolec 1	58	55	5,17	3,45
Humpolce 2	33	31	6,06	6,06
<b>Průměr</b>			<b>9,15</b>	<b>2,88</b>

Otázkou ovšem stále zůstává, jaký kapacitní proud by měl být uvažován pro stanovení zbytkového proudu. V zásadě se nabízí dvě možná řešení. První vychází z maximálního možného kapacitního proudu, který by se pro danou oblast posoudil za reálný. Druhá pak ve stanovení kapacitního proudu, který je limitní pro kompenzované sítě obecně.

**a) Metodika založena na maximálním kapacitním proudu pro danou oblast**

Tato metodika přímo vychází z faktu, že výkon tlumivek je běžně dimenzován na kapacitní oblast celé transformovny a ne jen „svého“ transformátoru. V případě výpadku jednoho transformátoru je tak možné při dostatečné rezervě v transformaci napájet celou oblast přes zdravý transformátor a jeho tlumivku. V tuto chvíli je sice kapacitní proud plně kompenzován, ale uzemnění je dimenzováno pouze na běžně provozovaný rozsah sítě. Pokud není zemní odpor výrazně předdimenzován pro běžný provoz, zřejmě bude pro náhradní napájení nedostačující a nebudou dodržena dovolená dotyková napětí. **V takovém případě doporučuji pro dimenzování nových sítí a kontrolu stávajících vedení použít kapacitní proud celé transformovny.**

Obdobná situace nastává pro transformovny, které nemají dostatečnou rezervu v transformaci a nejsou schopny pokrýt stav N-1 samy. V tomto případě se napájení oblasti po odstaveném transformátoru rozloží mezi zbylý transformátor a okolní transformovny dle konkrétních možností. **V tomto případě doporučuji určit maximální možný rozsah sítě a z toho plynoucí kapacitní proud. Aby bylo možné rozsah sítě určit, je nutné stanovit „plán nouzového napájení“ a mít přehled o kapacitním proudu jednotlivých vývodů.**

Oba dva postupy lze dále rozšířit o separované posuzování stávajících a nově budovaných vedení. Z pohledu nově budovaných je vhodné dimenzovat uzemnění s respektem k očekávanému budoucímu nárůstu kapacitního proudu. Tím bude zajištěna rezerva pro budoucnost a za předpokladu splnění predikce nebude nutné pro stanovený horizont provádět nápravná opatření. Naopak pro kontrolu stávajícího uzemnění se zdá být dimenzování na budoucí kapacitní proud unáhlené. Uzemnění stávající sítě musí splňovat současný stav, nikoli stav budoucí. Provádět nápravná opatření na stav, který možná ani v budoucnu nenastane, není vhodná ekonomická strategie. Vzhledem k pravidelně prováděným revizím a kontrolám je proto vhodné ponechat uzemnění bez náprav a změn do doby, dokud jsou splněny podmínky na dotyková napětí, nikoli dříve.

**b) Metodika založena na limitním kapacitním proudu kompenzovaných sítí**

Tato metodika předpokládá stanovení kapacitního proudu, který lze podle zvoleného kritéria obecně očekávat pro kompenzované sítě jako maximální. Příklady takového mezního kapacitního proudu byly představeny v kapitole 4.2, ze které lze například uvést hodnotu 750 A, která odpovídá kvalitnímu uzemnění venkovních vedení (zemní odpor 5  $\Omega$ ) a nízkému zemnímu odporu distribučních trafostanic (2  $\Omega$ ). Jiný pohled na možné maximum poskytuje podmínka z normy [1], která stanovuje jako maximální zbytkový proud 60 A. Tomu by při předpokladu, že zbytkový proud je 10 % kapacitního proudu, odpovídal mezní kapacitní proud 600 A, při 20 % se jedná o hodnotu 300 A.

V rámci této metodiky **doporučuji určit maximální kapacitní proud pro kompenzované sítě a ten použít pro dimenzování všech uzemnění**. Tento způsob by ovšem přinesl nadměrné dimenzování uzemnění v sítích, kde není reálně možné očekávat velký nárůst kapacitního proudu, v mezním případě až na maximum. S tím jsou pochopitelně spojeny v podstatě zbytečné náklady, které by byly do těchto sítí investovány. Naopak není zaručeno, že vypočtený maximální kapacitní proud pokryje i spojení dvou velkých kapacitních oblastí při náhradním napájení. Je zřejmé, že tato metodika se svými negativními vlastnostmi neobstojí ve srovnání s metodikou předchozí a spadá spíše do roviny hypotetické.

## Závěr

Záměrem této studie byla podrobná analýza provozu uzlu sítě 22 kV a to zejména vzhledem k jednofázovým zemním poruchám. Získané poznatky byly přímo aplikovány na návrh provedení uzlu plánované TR 110/22 kV Náchod společnosti E.ON Česká republika, s.r.o. a posléze na stanovení metodiky pro určení velikosti zbytkového kapacitního proudu pro kontrolu uzemnění stávajících a nových vedení.

Popis byl koncipován tak, aby poskytl základní představu o jednotlivých možnostech provozu uzlu sítě 22 kV. V první kapitole byly postupně představeny jednotlivé způsoby provedení uzlu transformátoru a stanovena kritéria jeho návrhu. Dále byly stručně zmíněny možné způsoby kompenzace zbytkového proudu místem poruchy či podrobně uvedena problematika ladění zhášecí tlumivky a napět'ové nesymetrie sítě.

Jedním z hlavních cílů bylo určení kapacitních proudů oblasti Tábor pro stávající i budoucí stav. Pro výpočet byly zvoleny dvě metody uvedené v kapitole 2.1. První využívala katalogové údaje kapacit používaných kabelů (výsledek 286,57 A), druhá byla založena na kapacitním proudu na kilometr délky uvedeném v normě ČSN 33 3070 (výsledek 308,04 A). Vzhledem k hodnotě 320 A odečtené z automatiky tlumivky se jedná o uspokojivé výsledky, které jsou blíže komentovány v kapitole 2.2. Budoucí stav, jenž je silně ovlivněn plánovanou výstavbou TR Náchod, lze shrnout následovně. Při uvážení konstantního nárůstu 1,75 A/rok lze za 20 let očekávat kapacitní proud spadající pod TR Tábor přibližně 250 A, z čehož plyne, že tlumivky instalované v TR Tábor (2x5000 kVAr) budou i za 20 let dostačující a nebude nutná jejich výměna (za předpokladu výstavby TR Náchod). V případě TR Náchod byla predikována hodnota kapacitního proudu v horizontu 20 let přibližně 110 A.

Další podstatný cíl byl návrh provedení uzlu plánované TR 110/22 kV Náchod. Tato část plynule navazovala na informace uvedené v předchozím a po zvážení několika možných scénářů prezentovaných v kapitole 3 byla jako nejlepší zvolena varianta zhášecí tlumivky o výkonu 5000 kVAr (v případě dvou transformátorů 25 MVA by se jednalo o dvě tlumivky uvedeného výkonu).

Poslední významnou částí bylo navržení vhodné metodiky pro určení velikosti zbytkového kapacitního proudu pro kontrolu uzemnění stávajících a nových vedení. Za pomoci norem [16], [17] a doposud uvedených informací o distribuční síti a jejím provozu byla zpracována nutná teorie, na jejímž základě vznikla zmíněná metodika popsaná podrobně v kapitole 4.3.

## Použitá literatura

### Knížní publikace:

- [1] **ČSN 33 3070:** *Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*, Český normalizační institut, Praha 1979.
- [2] **Fejt, Z.; Čermák, J.:** *Elektroenergetika*, Ediční středisko ČVUT, Praha 1983
- [3] **Procházka, K.:** *Vybrané problémy provozu distribučních sítí VN*, České Budějovice 1992
- [4] **Tesařová, M.; Štroblová, M.:** *Průmyslová elektroenergetika*, Vydavatelství - Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2000
- [5] **Mayer, D.:** *Elektrodynamika v energetice*, Nakladatelství BEN, Praha 2005
- [6] **Mayer, D.:** *Teorie elektromagnetického pole*, Vydavatelství - Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2004
- [7] **DRUML G.; SEIFERT O.:** *New Method for the state evaluation of the zero.sequence systém*. In.: 15th Power System Computation Conference, Liege, 2005
- [8] **Cimolinec, I.; Sýkora, T.; Švec, J.; Müller, Z.:** *Použitelnost metody přizemnění postižené fáze (shuntingu) při zemních spojeních v kompenzovaných sítích VN*, Sborník konference ČK CIRED, Tábor 2009
- [9] **Cimolinec, I.; Sýkora, T.; Švec, J.; Müller, Z.:** *Eliminace negativního vlivu metody přizemnění postižené fáze při zemních spojeních v systémech VN*, Sborník konference ČK CIRED, Tábor 2010
- [10] **Topolánek, D.; Orságová, J.; Toman, P.; Dvořák, J.:** *Vliv přizemňování postižené fáze na bezpečnost sítí VN*, Sborník konference ČK CIRED, Tábor 2010
- [11] **Topolánek, D.; Orságová, J.; Toman, P.; Dvořák, J.:** *Zhodnocení funkce automatiky přizemnění postižené fáze během nízkohmového zemního spojení vzhledem k nebezpečnému dotykovému napětí*, Sborník konference ČK CIRED, Tábor 2011
- [12] **Topolánek, D.:** *Lokalizace místa zemního spojení v kompenzované distribuční síti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 148 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [13] **Winter, K.:** *The RCC grand fault neutralizer – a novel scheme for fast earth-fault protection*. In.: 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 2005

- [14] **Toman, P.; Drápela, J.; Mišák, S.; Orságová, J.; Paar, M.; Topolánek, D.:** *Provoz distribučních soustav*, Vydavatelství – České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011
- [15] **Vajnar, V.:** *Uzemňování v sítích VN – poznatky z praxe distributora elektrické energie*, Sborník konference ČK CIRED, Tábor 2009
- [16] **PNE 33 0000-1, páté vydání:** *Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě*, Účinnost od 1.12.2011
- [17] **PNE 33 0000-4, druhé vydání:** *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*, Účinnost od 1.2.2003
- [18] **ČSN 33 3201:** *Elektrické instalace nad AC 1 kV*, Účinnost od 1.1.2002
- [19] **Kvasnica, P.:** *Vybrané problémy elektrizačnej sústavy – Uzemňovanie uzla rozvodných sietí*, Ediční středisko SVŠT, Bratislava 1981

### **Elektronické zdroje:**

- [20] **Portál [www.ege.cz](http://www.ege.cz)**, [online], 2012, [cit. únor 2012],  
URL: <http://www.ege.cz>
- [21] **Portál [www.swedishneutral.se](http://www.swedishneutral.se)**, [online], 2012 [cit. duben 2012]  
URL: [www.swedishneutral.se](http://www.swedishneutral.se)
- [22] **Portál [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz)**, [online], 2012 [cit. prosinec 2011]  
URL: [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz)
- Pankrác, V.:** *Základní druhy konstrukčního uspořádání tlumivek*, 2009

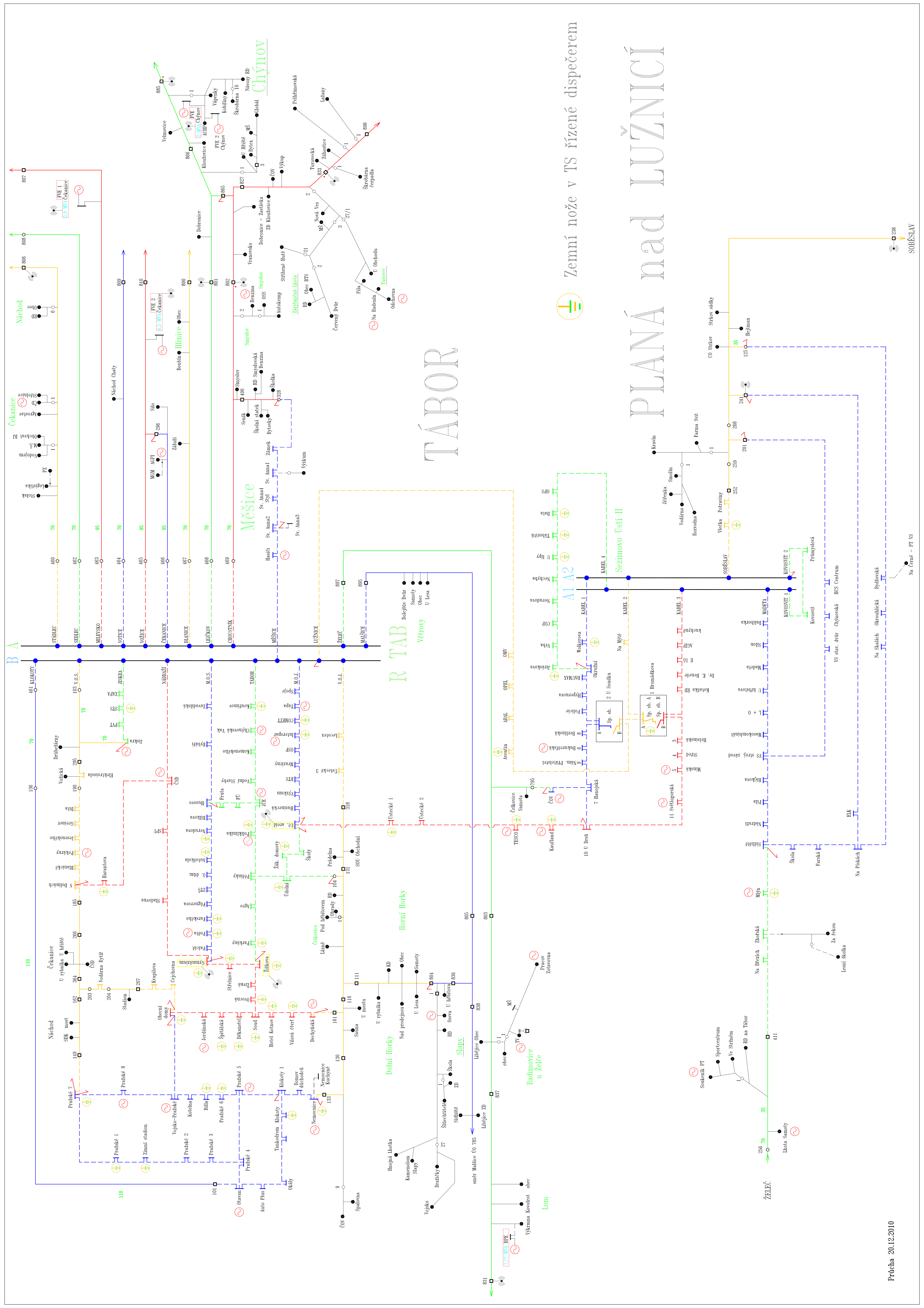


## **Přílohy**

**Příloha A – Zapojení vývodů TR Tábor a TR Planá nad Lužnicí**

**Příloha B – Zapojení TR Náchod do sítě 22 kV**

**Příloha C – Zaústění vývodů TR Náchod do stávající sítě 22 kV**



Zemní nože v TS řízené dispečerem

# PLANÁ nad LUŽNICÍ

# ZAPOJENÍ TR NÁCHOD DO SÍTĚ 22 KV

