

FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ

# **DISERTAČNÍ PRÁCE**

PLZEŇ, 2013

Ing. Daniel Kouba



**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ  
ZÁPADOČESKÉ  
UNIVERZITY  
V PLZNI**

## DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor  
v oboru

**Elektroenergetika**

**Ing. Daniel Kouba**

**Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě  
VN velkého rozsahu**

**(Analysis of Safe Operation of Resonant Earthed  
MV Network With High Capacity Current)**

*Školitel:* Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

*Datum státní doktorské zkoušky:* 24.10. 2012

*Datum odevzdání práce:* 28.08. 2013

V Plzni, 2013

## Prohlášení

Předkládám tímto k obhajobě disertační práci zpracovanou v rámci doktorského studia Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval zcela samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Českých Budějovicích, dne: .....

.....

*Daniel Kouba*

## Poděkování

Děkuji mojí školitelce paní Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za podporu a akademické vedení mého studia a této práce. Rád bych také poděkoval mému konzultantovi panu Ing. Karlu Procházkovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly nalézt řešení mnoha zásadních problémů. V neposlední řadě děkuji mému zaměstnavateli a kolegům ze společnosti E.ON Česká republika, s.r.o. za poskytnutí dat a ochotu zabývat se řešenou problematikou.

## **Anotace**

Disertační práce se v úvodu zabývá velikostmi kapacitních proudů v sítích vysokého napětí a vysvětluje důvody jejich aktuálního nárůstu. Zbytkový proud zemního spojení během provozu sítě vysokého napětí s kompenzací zemních kapacitních proudů může být příčinou nebezpečného dotykového napětí, a proto práce dále uvádí způsoby jeho omezení. Hlavní zaměření je směřováno na metodu přizemnění postižené fáze, pro jejíž analýzu teoretická část vysvětluje výpočty simultánních poruch pomocí teorie dvojbranů. Výstupem je detailní zhodnocení účinnosti metody přizemnění postižené fáze včetně bilance výhod a nevýhod její praktické instalace. Na závěr disertační práce doporučuje způsoby provozu velkých kapacitních celků.

## **Klíčová slova**

Simultánní poruchy, kapacitní proud, zbytkový proud, shuntování, šentování, dotykové napětí, teorie dvojbranů, nesouměrná soustava, složkové soustavy, přizemnění postižené fáze.

## **Abstract**

In the introduction, this PhD thesis deals with the analysis of capacitive current size in the resonant earthed middle voltage network and describes the reasons for its current increasing. The resonant earthed neutral system is possible to operate during the fault; however there is still a danger for the people in the vicinity of the fault place. This is because some fault current is residual and may cause a rise in the potential of the substation earthing system. For this reason, this thesis analyses the methods of reducing residual current. The main focus is on the system of earthing of affected phase through shunt resistor which needs the theoretical part with the simultaneous faults description using the two-port network theory. The output is the detailed assessment of shunt resistor efficiency including the advantages and disadvantages of its practical installation. In the conclusion, the PhD thesis also recommends the methods to operate middle voltage network with high capacity current.

## **Key words**

Simultaneous faults, capacitive current, residual current, shunt reactor, shunt resistor, earthing of affected phase, touch potential, two-port network theory, unbalanced power system, sequence components.

## Seznam použitých zkratek a značek

Zkratka	Popis
I. KZ	první proudový Kirchhoffův zákon
II. KZ	druhý napěťový Kirchhoffův zákon
DS	distribuční soustava
MAT	pracovní označení zařízení německého výrobce mat - Dr. Becker GmbH
MSS	metoda souměrných složek
NN	nízké napětí
RTU	řídící jednotka zavedená do řídicího systému
SGR	pracovní označení zařízení tuzemského výrobce EGE, spol. s r.o.
TR	označení transformovny 110/22 kV
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
ZS	zemní spojení

Značka	Popis	Jednotka
$\Delta \bar{U}_i$	změna napětí v uzlu $i$ způsobená poruchou	[V]
$\varepsilon$	činitel kapacitní nesymetrie	[-]
$\bar{a}$	fázor natočení	[-]
$a, b, c$	označení fází třífázové soustavy	
$C$	kapacita sítě	[F]
$C_{nes}$	kapacitní nesymetrie	[F]
$\bar{E}_1$	zdroj souměrného napětí sousledné složkové soustavy	[V]
$\bar{E}_{abc}$	zdroje souměrného fázového napětí fází $a, b, c$	[V]
$\bar{E}_i^{(1)}$	fázor předporuchového napětí v uzlu $i$	[V]
$\bar{E}_k^{(1)}$	fázor předporuchového napětí v uzlu $k$	[V]
$\bar{F}$	transformační matice složkových soustav	[-]
$\bar{G}$	paralelně sériová hybridní matice dvojbranu	[S, -, $\Omega$ ]
$\bar{H}$	sériově paralelní hybridní matice dvojbranu	[ $\Omega$ , -, S]
$\bar{H}_{ik}^{(l)}$	prvky složkové hybridní matice, $l = 1, 2, 0$	[ $\Omega$ , -, S]
$i$	uzel s poruchou	
$\bar{I}_1$	fázor proudu sousledné složkové soustavy	[A]
$\bar{I}_{120}$	vektor fázorů proudů složkových soustav	[A]
$\bar{I}_2$	fázor proudu zpětné složkové soustavy	[A]
$\bar{I}_0$	fázor proudu nulové složkové soustavy	[A]
$\bar{I}_{abc}$	fázory proudů ve fázích $abc$	[A]
$\bar{I}_{abc}$	vektor fázorů proudů ve fázích $abc$	[A]

Značka	Popis	Jednotka
$I_c$	kapacitní proud sítě	[A]
$\bar{I}_E$	fázor zemního proudu	[A]
$\bar{I}_i^{(l)}$	složkový proud v uzlu $i$ , $l = 1, 2, 0$	[A]
$\bar{I}_k^{(l)}$	složkový proud v uzlu $k$ , $l = 1, 2, 0$	[A]
$\bar{I}_P$	poruchový proud	[A]
$I_{res}$	zbytkový proud zemního spojení	[A]
$\bar{I}_x^{(l)}$	vstupní proud složkového dvojbranu v uzlu $i$ , $l = 1, 2, 0$	[A]
$\bar{I}_y^{(l)}$	výstupní proud složkového dvojbranu v uzlu $k$ , $l = 1, 2, 0$	[A]
$\bar{I}_Z$	fázor proudu zátěže	[A]
$k$	uzel s poruchou	
$l$	délka vedení, popř. vzdálenost poruchy od TR	[km]
$L_{tl}$	indukčnost zhášecí tlumivky	[H]
$\bar{n}_i^{(l)}$	převod oddělovacích transf. složk. soustav pro uzel $i$ , $l = 1, 2, 0$	[-]
$\bar{n}_k^{(l)}$	převod oddělovacích transf. složk. soustav pro uzel $k$ , $l = 1, 2, 0$	[-]
$R_C$	činný odpor reprezentující svod sítě	[ $\Omega$ ]
$R_p$	činný odpor poruchy	[ $\Omega$ ]
$R_s$	činný odpor sekundárního odporníku	[ $\Omega$ ]
$R_{sh}$	činný odpor shuntu	[ $\Omega$ ]
$R_T$	činný odpor zemniče	[ $\Omega$ ]
$R_{tl}$	činný odpor zhášecí tlumivky	[ $\Omega$ ]
$R_{vvn\_vn}$	činný odpor uzemnění napájecí transformovny	[ $\Omega$ ]
$R_Z$	činný odpor uzemnění	[ $\Omega$ ]
$R_{ZE}$	činný odpor zemní cesty	[ $\Omega$ ]
$\bar{U}_1$	fázor napětí sousledné složkové soustavy	[V]
$\bar{U}_{120}$	vektor fázorů napětí složkových soustav	[V]
$\bar{U}_2$	fázor napětí zpětné složkové soustavy	[V]
$\bar{U}_0$	fázor napětí nulové složkové soustavy	[V]
$\bar{U}_{abc}$	fázory napětí ve fázích $abc$	[V]
$\bar{U}_{abc}$	vektor fázorů napětí ve fázích $abc$	[V]
$\bar{U}_{abc\ p}$	fázory poruchových napětí ve fázích $abc$	[V]
$\bar{U}_i^{(l)}$	složkové napětí v uzlu $i$ , $l = 1, 2, 0$	[V]
$\bar{U}_k^{(l)}$	složkové napětí v uzlu $k$ , $l = 1, 2, 0$	[V]
$\bar{U}_N$	napětí uzlu transformátoru proti zemi	[V]
$U_{Tp}$	dovolené dotykové napětí	[V]
$\bar{U}_x^{(l)}$	vstupní napětí složkového dvojbranu v uzlu $i$ , $l = 1, 2, 0$	[V]
$\bar{U}_y^{(l)}$	výstupní napětí složkového dvojbranu v uzlu $k$ , $l = 1, 2, 0$	[V]
$X_{sh}$	reaktance reaktoru shuntu	[ $\Omega$ ]

Značka	Popis	Jednotka
$\bar{Y}$	charakteristická admitanční matice dvojbranu	[S]
$\bar{Y}_{ik}^{(l)}$	prvky složkové admitanční matice, $l = 1, 2, 0$	[S]
$\bar{Z}$	charakteristická impedanční matice dvojbranu	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_1$	impedance sousledné složkové soustavy	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_2$	impedance zpětné složkové soustavy	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_0$	impedance nulové složkové soustavy	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_C$	impedance kapacity sítě	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_E$	celková impedance uzemnění	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_f$	impedance kovové poruchy	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_{ik}$	prvky impedanční matice	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_{ik}^{(l)}$	prvky složkové impedanční matice, $l = 1, 2, 0$	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_N$	impedance uzlu transformátoru proti zemi	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_s$	impedanční matice sítě	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_s^{(l)}$	náhradní impedance nadřazené sítě, $l = 1, 2, 0$	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_p$	impedance poruchy	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_T^{(l)}$	náhradní impedance transformátoru, $l = 1, 2$	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_v^{(l)}$	náhradní impedance vedení, $l = 1, 2, 0$	[ $\Omega$ ]



# Obsah

ÚVOD .....	12
1. CÍL PRÁCE .....	13
1.1. Ukazatele spolehlivosti distribuce .....	14
1.2. Rozvoj sítí a kapacitní proud .....	15
1.3. Dostupné metody k omezení zbytkového poruchového proudu .....	17
1.4. Mimořádný provozní stav sítě VN .....	19
2. ZBYTKOVÝ PROUD A DOTYKOVÁ NAPĚTÍ .....	21
2.1. Výpočet maximálního zbytkového proudu .....	21
2.2. Odvození zbytkových proudů ze vztahu jednoho zemniče .....	23
3. STATISTIKA PORUCH V DISTRIBUČNÍ SÍTI VN .....	27
3.1. Analyzovaná data .....	27
3.2. Vyhodnocení dat .....	27
4. NESYMETRICKÉ PORUCHY .....	31
4.1. Metoda souměrných složkových soustav .....	31
4.1.1. <i>Zhodnocení MSS</i> .....	32
4.1.2. <i>Náhradní schémata elementárních nesymetrických zemních poruch</i> .....	32
4.2. Simultánní poruchy .....	34
4.2.1. <i>Teorie dvojbranů</i> .....	34
4.2.2. <i>Prvky charakteristické matice Z pro výpočet simultánních poruch</i> .....	35
4.2.3. <i>Náhradní obvod dvojbranu</i> .....	39
4.2.4. <i>Spojování dvojbranů – náhradní schémata poruch</i> .....	40
4.2.5. <i>Simultánní poruchy s impedanční charakteristickou maticí</i> .....	42
4.2.6. <i>Simultánní poruchy s admitanční charakteristickou maticí</i> .....	46
4.2.7. <i>Simultánní poruchy s hybridní charakteristickou maticí</i> .....	49
4.2.8. <i>Omezení metody</i> .....	52
4.3. Aplikace teorie simultánních poruch .....	53
4.3.1. <i>Výpočet dvou jednofázových zemních poruch sestavením T-článků</i> .....	53
4.3.2. <i>Verifikace modelu s normou ČSN EN 60909-3</i> .....	57
5. ANALÝZA METODY SHUNTOVÁNÍ .....	60
5.1. Popis automatiky shuntu a její instalace .....	60
5.1.1. <i>Parametry zařízení MAT</i> .....	61
5.1.2. <i>Fyzická instalace shuntování</i> .....	62
5.1.3. <i>Popis funkce a nastavení</i> .....	62
5.1.4. <i>Implementace do dispečerského řídicího systému</i> .....	63

5.1.5.	<i>Investiční náklady shuntování</i> .....	64
5.1.6.	<i>Vliv shuntování na činnost dispečera</i> .....	65
5.2.	Náhradní schéma shuntování .....	65
5.3.	Simulace zemních spojení s shuntováním .....	67
5.3.1.	<i>Závislost poruchových proudů na odporu poruchy</i> .....	69
5.3.2.	<i>Vzdálenost zemního spojení od transformovny</i> .....	69
5.3.3.	<i>Zjištění vhodné velikosti odporu shuntu</i> .....	71
5.3.4.	<i>Rozladění zhášecí tlumivky</i> .....	73
5.3.5.	<i>Vliv velikosti kapacitní oblasti</i> .....	74
5.3.6.	<i>Simulace zatížení na vedení s poruchou</i> .....	75
5.4.	Porovnání simulací s výsledky měření .....	79
5.4.1.	<i>Kapacitní oblast 819 A, nízkoohmové ZS</i> .....	80
5.4.2.	<i>Kapacitní oblast 819 A, obloukové ZS</i> .....	81
5.4.3.	<i>Kapacitní oblast 819 A, obloukové ZS, rozladěná tlumivka</i> .....	82
5.5.	Ověření podmínek automatického připojení shuntu .....	83
5.5.1.	<i>Podmínka podpětí postižené fáze</i> .....	83
5.5.2.	<i>Nežádoucí přizemnění zdravé fáze</i> .....	86
5.5.3.	<i>Podmínka dostatečného napětí uzlu transformátoru</i> .....	89
5.5.4.	<i>Podmínka časového zpoždění</i> .....	91
5.6.	Vyhledání místa ZS pomocí přizemnění nepostižené fáze .....	93
5.6.1.	<i>Činnost distančních ochran v sítích VN</i> .....	93
5.6.2.	<i>Nastavení velikosti reaktance</i> .....	94
5.6.3.	<i>Zhodnocení určení vzdálenosti zemního spojení</i> .....	94
5.7.	Vícenásobné poruchy při aktivním shuntování .....	95
5.7.1.	<i>Dvojnásobné a dvojitě zemní spojení</i> .....	95
5.8.	Shuntování reaktorem – systém SGR .....	97
5.9.	Zhodnocení metody shuntování .....	99
6.	DOPORUČENÍ K PROVOZOVÁNÍ SÍTÍ S VELKÝMI $I_c$ .....	101
7.	ZÁVĚR .....	103
7.1.	Resumé .....	105
7.2.	Resume .....	106
7.3.	Přínosy disertační práce .....	107
8.	DOPORUČENÍ K DALŠÍMU VÝZKUMU .....	108
9.	POUŽITÁ LITERATURA .....	109
	PŘEHLED PUBLIKACÍ A JINÝCH AKTIVIT V RÁMCI DR. STUDIA .....	111
	SEZNAM GRAFŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK .....	113
	PŘÍLOHA Č. 1: VÝPOČET V SIMULTÁNNÍCH PORUCHU MATLAB .....	116

PŘÍLOHA Č. 2: VÝSLEDEK ZÁKLADNÍHO VÝPOČTU .....	118
PŘÍLOHA Č. 3: POROVNÁNÍ VÝPOČTU S NORMOU .....	119
PŘÍLOHA Č. 4: VÝSLEDEK OVĚŘOVACÍHO VÝPOČTU .....	121
PŘÍLOHA Č. 5: SIMULACE SHUNTOVÁNÍ M-FILES.....	122

## Úvod

V praktické elektroenergetice se řeší dlouhodobý nárůst podílu kabelových vedení především ve vztahu provozu sítí vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů. Sítě charakterizované vyššími hodnotami kapacitních proudů během zemního spojení budí obavu z úrazu elektrickým proudem nebezpečným dotykem neživých částí vlivem průchodu zbytkového proudu.

Jednou ze známých metod k omezení zbytkového proudu v místě zemního spojení sítí s vysokými kapacitními proudy patří přizemnění postižené fáze v rozvodně VN přes definovaný odpor popřípadě reaktor. Nejedná se o novou metodu, ale vzhledem k narůstajícím kapacitním proudům v distribučních sítích vysokého napětí a jejím relativně nízkým investičním nákladům je stále častěji napříč odbornými kruhy diskutována. Názory na její bezpečné a spolehlivé uplatnění v praktické aplikaci se různí, a proto byla provedena její pilotní instalace v síti E.ON Distribuce, a.s. a pokusné experimenty. K těm však chyběl seriózní teoretický popis, který by předpovídal výsledky zkoušek, případně analyzoval různé stavy, jež mohou při využití této metody nastat. Aktuálně pokusně instalují přizemnění postižené fáze také další provozovatelé distribučních soustav v České republice, tj. PRE Distribuce, a.s. a ČEZ Distribuce, a.s..

Tato disertační práce se v úvodu zabývá příčinami nárůstu kapacitních proudů v kompenzovaných sítích VN, vlivem zbytkového proudu na dotyková napětí a statisticky vyhodnocuje reálná data o poruchách, které vznikly v síti E.ON Distribuce, a.s. se zaměřením na zemní poruchy ve VN sítích. Zjištěné výsledky dokazují nezbytnost řešení problematiky vysokých kapacitních proudů.

V kapitole simultánních poruch vysvětlují teorii výpočtu širokého spektra dvou simultánních poruch, která dosud nebyla v českých odborných literaturách použita a v případě anglických literatur byl dostupný pouze hrubý teoretický popis bez praktického použití. Tento popis upravuji, rozšiřuji a doplňuji o své poznatky. Jeho přímou aplikací na lokální problém přizemnění postižené fáze jsem vynalezl novou experimentální metodiku, která významnou měrou poslouží k rozvoji analýzy metody přizemnění postižené fáze. Vytvořený model je nutné verifikovat s uznávanou normou případně porovnat s reálným měřením, což je v disertační práci také zpracováno.

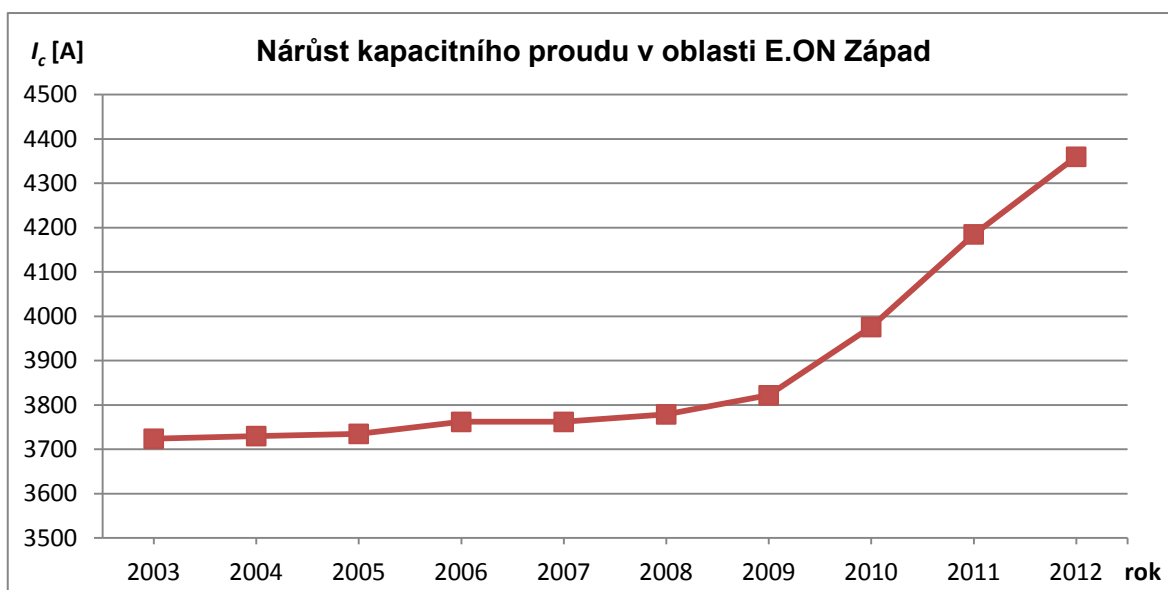
Aplikace nového přístupu výpočtu dvojnásobných zemních spojení poskytuje výsledky proudů a napětí ve dvou různých místech sítě. Zaměřuji se zejména na zbytkový proud v místě skutečného zemního spojení a odvozují možnosti použití metody přizemnění postižené fáze vzhledem k bezpečnému provozu kompenzované sítě VN. V závěru doporučuji provozovatelům distribučních soustav řešení problematiky sítí s vysokými kapacitními proudy a definuji zjištěná rizika.

Disertační práce obohacuje vědní obor elektroenergetiky o novou experimentální metodiku a po praktické stránce přispívá k bezpečnému provozu kompenzovaných sítí VN velkého kapacitního rozsahu.

## 1. Cíl práce

Úkolem distribuční soustavy je zásobovat odběratele elektřinou v požadovaném čase, kvalitě a spolehlivosti, přičemž provozovatel distribuční soustavy musí dodržet závazné dokumenty jako například Energetický zákon 458/2000 Sb. vč. prováděcích vyhlášek, Pravidla provozování distribučních soustav, normy ČSN, PNE atd. Pro splnění základních požadavků je distribuční soustava účelně rozdělena do napěťových hladin, topologicky uspořádána, dispečersky řízena a v ideálním případě i dostatečně dimenzována. Do bezporuchového chodu distribuční soustavy mohou ovšem zasáhnout nepředvídatelné jevy, které významně ohroží spolehlivost dodávky elektřiny odběratelům nebo zapříčiní zvýšené riziko úrazu elektrickým proudem. Je zapotřebí věnovat se těmto poruchovým stavům v návaznosti na nové trendy elektroenergetiky. Analýzou nových metod a případnou následnou aplikací lze pak dosáhnout zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti distribuční soustavy. V případech, kdy dostupná technická opatření nestačí k řešení problémů v síti, musíme hledat opatření metodická a provozní.

Mezi zásadní problémy stávající a budoucí elektroenergetiky patří nárůst kapacitních proudů v sítích vysokého napětí, což je nutné řešit zejména ve vztahu k zemním poruchám a k provozu kabelových, venkovních nebo smíšených sítí VN. Níže uvedený graf prezentuje nárůst kapacitních proudů v zásobovací oblasti E.ON Distribuce, a.s. (pouze pro oblast Jižních Čech) za posledních 10 let.



Graf 1: Nárůst kapacitního proudu v oblasti E.ON Západ

Hodnoty kapacitních proudů byly odečteny z automatik ladění tlumivek při rezonančním naladění dané oblasti vždy v měsíci lednu příslušného roku. V historickém přehledu se vyskytuje zanedbatelná chyba, protože v průběhu let nebyly ve všech transformovných instalovány automatiky ladění a některé tlumivky byly laděny ručně, tudíž s nižší přesností.

V grafu lze vidět extrémní nárůst kapacitního proudu v uplynulých třech letech, což bylo způsobeno několika faktory. Výstavbu nových kabelových sítí komentuji v kapitole 1.2., ale vyšší

hodnoty kapacitních proudů nejsou způsobeny jen častější kabelizací sítí VN, nýbrž se projevuje také hledisko provozní.

Provozovatelé distribučních soustav se snaží zachovat co největší kontinuitu dodávky (podrobněji viz další kapitola), tedy co nejvíce poruch vymanipulovat. Tuto možnost poskytuje provoz sítě se zhášecí tlumivkou. Poruchy v síti často odhalí její slabé články a nastávají tak následné poruchy, zejména na starších kabelech nebo jejich koncovkách, a proto bylo v minulosti výhodnější provozovat větší kabelové celky s odporově uzemněným uzlem transformátoru a poruchy rychle vypínat. Trendem je provozování kabelových sítí se zhášecí tlumivkou, protože nové kabely VN s izolací ze zesíťovaného polyetylénu nejsou tolik náchylné na násobné poruchy jako starší typy kabelů s olejem napuštěnou papírovou izolací. K odolnosti kabelových sítí vůči zemním poruchám také přispěly instalované omezovače přepětí u kabelových vývodů v distribučních trafostanicích. Provozování větších kapacitních celků vysvětluje příspěvek k významnému nárůstu měřeného kapacitního proudu automatikami ladění zhášecích tlumivek v posledních letech.

Stávající provoz distribuční soustavy VN se obecně řídí normou ČSN 33 3070, která je více než 30 let stará, a tedy nerespektuje nové prvky v elektroenergetice. Na Slovensku byla norma STN 33 3070 zneplatněna bez náhrady [5]. Česká verze se aktuálně vyskytuje na seznamu norem k revizi nebo úplnému zrušení.

Tuto práci zpracovávám s cílem vyřešit praktický problém elektroenergetiky a to bezpečně provozovat kompenzované sítě VN velkého rozsahu, čehož lze logicky docílit snížením zbytkových proudů v místech zemních spojení. Dostupné metody omezení zbytkových proudů vydefinuji v následujících kapitolách a vyberu jednu konkrétní nejvhodnější metodu, kterou podrobím detailní analýze. Za tímto účelem budu v práci podrobně rozepisovat také problematiku násobných (simultánních) poruch. Výstupem mé práce má být zhodnocení vybrané metody omezení zbytkových proudů a dále doporučení provozu distribuční sítě VN vzhledem k velikostem kapacitních oblastí a k možnostem analyzované metody omezení zbytkového poruchového proudu.

## 1.1. Ukazatele spolehlivosti distribuce

Provozovatelé distribučních soustav jsou regulátorem finančně motivováni ke zvyšování spolehlivosti a kontinuity dodávky elektřiny zákazníkům. Na druhou stranu distribuční soustava se kontinuálně rozšiřuje. Vnášení dalších prvků s pravděpodobností poruchy vede ke snižování výsledné spolehlivosti distribuční soustavy jako celku.

Vyhláška ERÚ č. 540/2005 stanovuje provozovatelům distribučních soustav mezní hodnoty ukazatelů nepřetržitosti distribuce SAIDI, SAIFI a CAIDI. Metodiku určování nepřetržitosti distribuce popisují PPDS Příloha č. 2.

SAIDI<sup>1</sup> vyjadřuje průměrnou celkovou dobu přerušení za rok na zákazníka v distribučním systému, tj. matematicky:

<sup>1</sup> System Average Interruption Duration Index – systémový ukazatel trvání přerušení

$$SAIDI = \frac{\sum_{h=nn}^{vvn} \sum_j t_{sjh}}{N_s} \quad [\text{minut/rok/zákazník}] \quad (1.1.1)$$

SAIFI<sup>2</sup> je průměrná četnost přerušení za rok na zákazníka v distribučním systému:

$$SAIFI = \frac{\sum_{h=nn}^{vvn} \sum_j n_{jh}}{N_s} \quad [\text{přerušení/rok/zákazník}] \quad (1.1.2)$$

CAIDI<sup>3</sup> průměrná doba trvání jednoho přerušení zákazníka v distribučním systému:

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad [\text{minut/přerušení}] \quad (1.1.3)$$

Kde:

$\sum_{h=nn}^{vvn}$  vyjadřuje průměrné hodnoty dopadů nepřetržitosti distribuce za všechny zákazníky celé distribuční soustavy,

$t_{sjh}$  součet všech dob trvání přerušení distribuce elektřiny v důsledku  $j$ -té události u jednotlivých zákazníků přímo napájených z napěťové hladiny  $h$ , jímž byla přerušena distribuce elektřiny,

$n_{jh}$  celkový počet zákazníků napájených z napěťové hladiny  $h$  postižených přerušením distribuce událostí  $j$  vzniklou na hladině  $h$  i na napěťových hladinách nadřazených napěťové hladině  $h$ ,

$N_s$  celkový počet zákazníků v soustavě (na hladině NN, VN a VVN) ke konci předchozího roku.

Dodržení stále náročnějších výše uvedených ukazatelů je možné jen za předpokladu neustálého investování do obnovy distribuční soustavy, popř. nasazování moderních inteligentních prvků, které zlepšují kontinuitu a spolehlivost dodávky jako například reclosery. Za další, a to je hlavním předmětem této práce, zvýšené kontinuity dodávky při jednofázových zemních poruchách dosáhneme provozem sítí VN se zhášecí tlumivkou.

## 1.2. Rozvoj sítí a kapacitní proud

Jedním z trendů současné elektroenergetiky se stala postupná kabelizace venkovních vedení. Kabelové vedení přispívá ke zvýšení spolehlivosti dodávky, ale na druhou stranu pro hladinu vysokého a velmi vysokého napětí zaujímá vždy dražší variantou rozvoje sítě. V sítích nízkého napětí jsou kabely běžně používány a dnes se nové sítě NN preferují vždy kabelové, protože po započtení všech nákladů (včetně provozních) na toto nejrozsáhlejší distribuční vedení vychází pro provozovatele distribučních soustav nesporně levnější. Toto dokazuje například publikace [6].

Musím ovšem poznamenat, že zvýšená spolehlivost kabelových vedení je dána jejich uložením, které chrání kabely před působením vnějších vlivů oproti venkovním vedením. Na kabelech vzniká méně poruch, ale pokud nastanou, jsou závažnějšího charakteru jak z elektrického hlediska, kde většina poruch přecházejí do vícefázových zkratů, tak z hlediska provozního, které vyžaduje rychlé nalezení a odstranění poruchy, což v kabelových sítích může být někdy problémem.

Mezi další velké výhody kabelového vedení patří nižší zásah do krajiny a velmi malé ochranné pásmo, které měří dle [9] pro podzemní vedení elektrizační soustavy do napětí 110 kV včetně 1 m

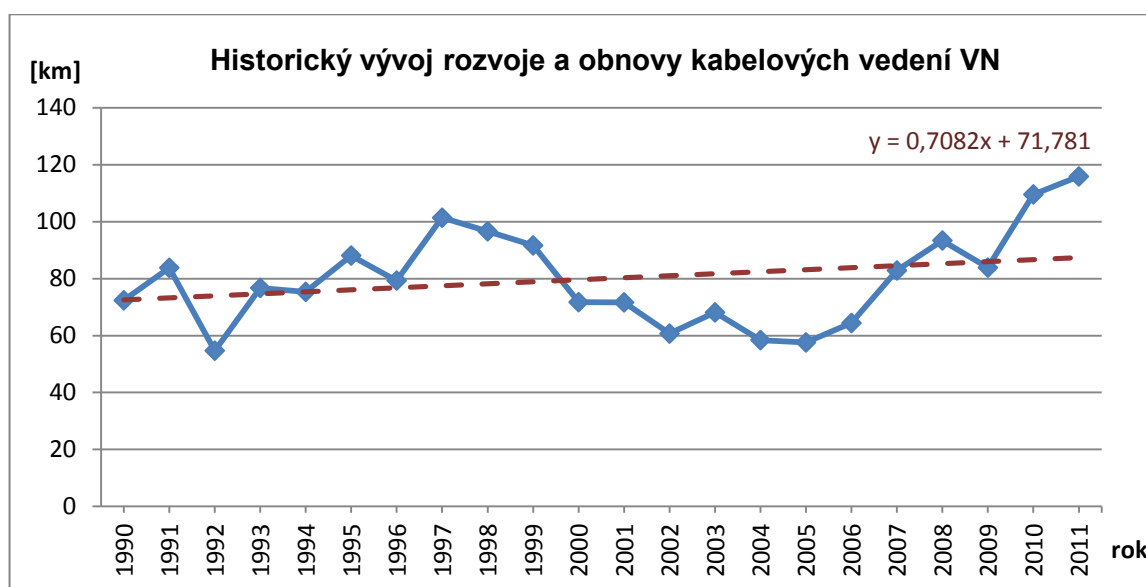
<sup>2</sup> System Average Interruption Frequency Index – systémový ukazatel četnosti přerušení

<sup>3</sup> Customer Average Interruption Duration Index – ukazatel průměrného přerušení zákazníka

po obou stranách krajního kabelu. To je podstatně méně například ve srovnání s venkovním vedením VN, které má ochranné pásmo 7 m od krajního vodiče na jeho obě strany (pro holé vodiče). Proto dnes plní kabely společensky přijatelnější a mnohdy jedinou variantu rozvoje sítě.

Nárůst kabelových sítí je také spojen s rozrůstáním příměstských aglomerací, kam se často s výhledem budoucího rozvoje oblasti rozšiřuje městská kabelová síť.

Z výše uvedeného vyplývá, že kabelové sítě mají v distribuční síti řadu výhod, ale v sítích vysokého napětí může nadměrná kabelizace způsobit problémy v provozu distribuční sítě kvůli vysokým kapacitním proudům. Následující graf ukazuje historický vývoj kabelizace sítí VN na zásobovacím území E.ON Distribuce, a.s.. Hodnota v daném roce určuje celkový součet délek nově vystaveného nebo zrekonstruovaného kabelového vedení VN. Proložená lineární spojnice trendu dokazuje vzrůstající tendenci použití kabelů při rozvoji nebo obnově VN sítí.

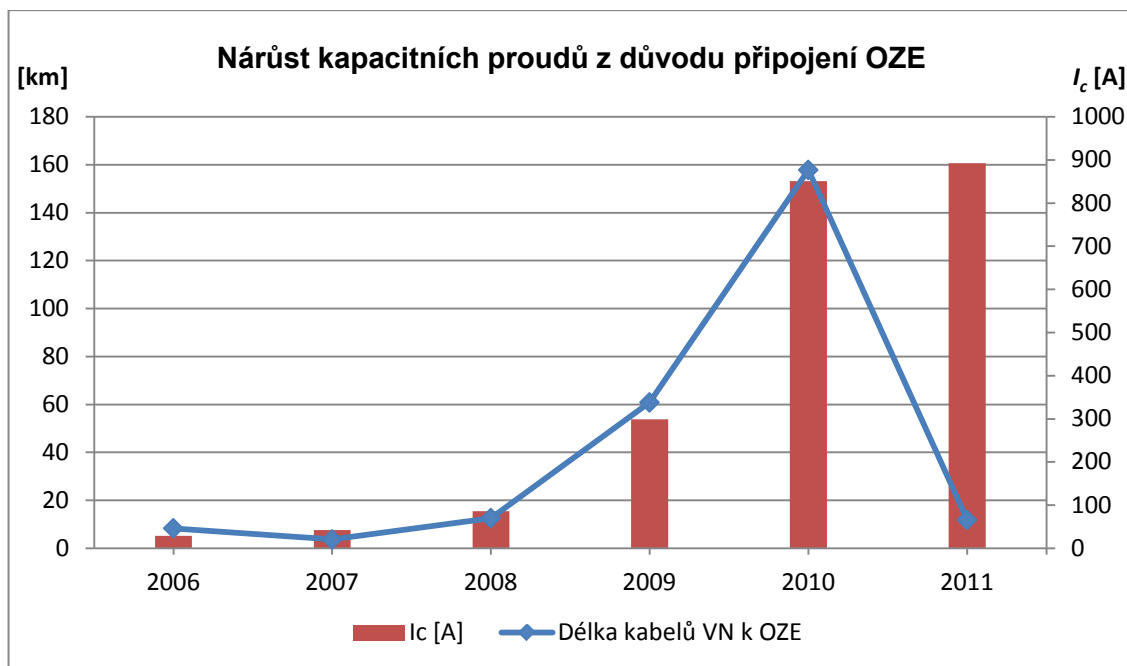


Graf 2: Historický vývoj rozvoje a obnovy kabelových vedení VN

Překvapivě nárůst kapacitních proudů lze do jisté míry spojit také s rozvojem obnovitelných zdrojů energie (dále jen „OZE“). Vyplývá to především z typického způsobu připojení těchto zdrojů, které již od výkonů 100 kW<sup>4</sup> jsou přednostně připojovány do sítí VN paprskovým odbočením nového kabelového vedení od stávajícího venkovního vedení provozovatele distribuční soustavy. Místa připojení nových distribuovaných zdrojů se volí převážně nejbliže k budoucímu umístění výroby elektřiny. To ale není možné vždy splnit z důvodu například neprojednání položení kabelů na konkrétní pozemky nebo z důvodu nedostatečných přenosových kapacit venkovních vedení a dochází tak k budování i několik kilometrů dlouhých přívodních kabelů k výrobnám elektřiny. Nutno ovšem podotknout, že tento přechodný stav zapříčinila vysoká výkupní cena elektřiny vyrobené z OZE, a proto se výstavba dlouhých přívodních vedení vyplatila. Se změnou podpory OZE očekávám, že trend nárůstu kapacitních proudů spojený s rozvojem OZE bude také stagnovat.

<sup>4</sup> Hodnota platí pro výroby elektřiny připojené na zásobovacím území E.ON Distribuce, a.s.





Graf 3: Nárůst kapacitních proudů související s rozvojem OZE

Výše uvedený graf ukazuje množství kabelových vedení (modrá křivka) vystavených v jednotlivých letech z důvodu připojení OZE a tomu odpovídající kumulativní hodnotu kapacitního proudu. Z tohoto grafu lze vidět, že masivní výstavba nových kabelových vedení byla zejména v roce 2010, ve kterém se odráží tzv. „fotovoltaický boom“ z roku 2009. Ve sledovaném období narostla hodnota kapacitního proudu o 900 A na území E.ON Distribuce, a.s..

Závěrem této kapitoly chci poznamenat, že výměna stávajících dožitých kabelových vedení 22 kV, tj. kabelů s olejem napuštěnou papírovou izolací, se provádí pomocí suchých kabelů s izolací ze zesíťeného polyetylen, které mají o 0,6-1 A/km nižší kapacitní zemní proud v závislosti na průřezu vodiče. Takže obnova starých kabelových vedení se nebude negativně projevat v nárůstu kapacitních proudů.

Průřez kabelu [mm <sup>2</sup> ]	70	95	120	150	185	240
Izolace	Kapacitní zemní proud [A/km]					
Papír + olej	3	3,4	3,7	4	4,3	4,7
Zesíťený polyetylen	2,4	2,7	2,9	3,1	3,4	3,7
Rozdíl [A/km]	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1

Tabulka 1: Kapacitní proudy kabelů s odlišnými izolačními materiály

### 1.3. Dostupné metody k omezení zbytkového poruchového proudu

Norma [1] připouští provoz kompenzované sítě VN se zemním spojením (dále jen „ZS“) při maximální velikosti zbytkového kapacitního proudu 60 A, přičemž doporučuje, že se nemají tvořit velké síťové celky. Provozu sítě během ZS se s výhodou využívá k vymanipulování místa poruchy dispečerem bez delšího přerušení dodávky elektřiny všem odběratelům na postiženém vývodu, tzv. provoz sítě se ZS po dobu nezbytně nutnou. Z tohoto důvodu byly vynalezeny metody

pro redukci zbytkového proudu při jednofázových zemních poruchách v síti VN. Jedná se o tyto způsoby:

- a) Kompenzace kapacitních proudů zhášecí tlumivkou
- b) Nepřímo uzemněný nulový bod přes Bauchův transformátor
- c) Systém Swedish Neutral
- d) Metoda shuntování
- e) Snížení rozsahu napájené oblasti

Běžně se používá kompenzace kapacitních proudů pomocí kompenzačních tlumivek. Jejich možnosti použití jsou dány normou [1] pro venkovní sítě s hodnotou celkového zemního kapacitního proudu do 100 A, pro smíšené sítě s maximální velikostí zemního kapacitního proudu 300 A a pro kabelové sítě, které je dovoleno provozovat do 450 A kapacitního proudu sítě. Zhášecí tlumivka z fyzikálního principu nemůže vykompenzovat poruchový kapacitní proud úplně na nulu. Norma [1] dále uvádí, že velikost zbytkového proudu má být do 10 % velikosti kapacitního proudu sítě.

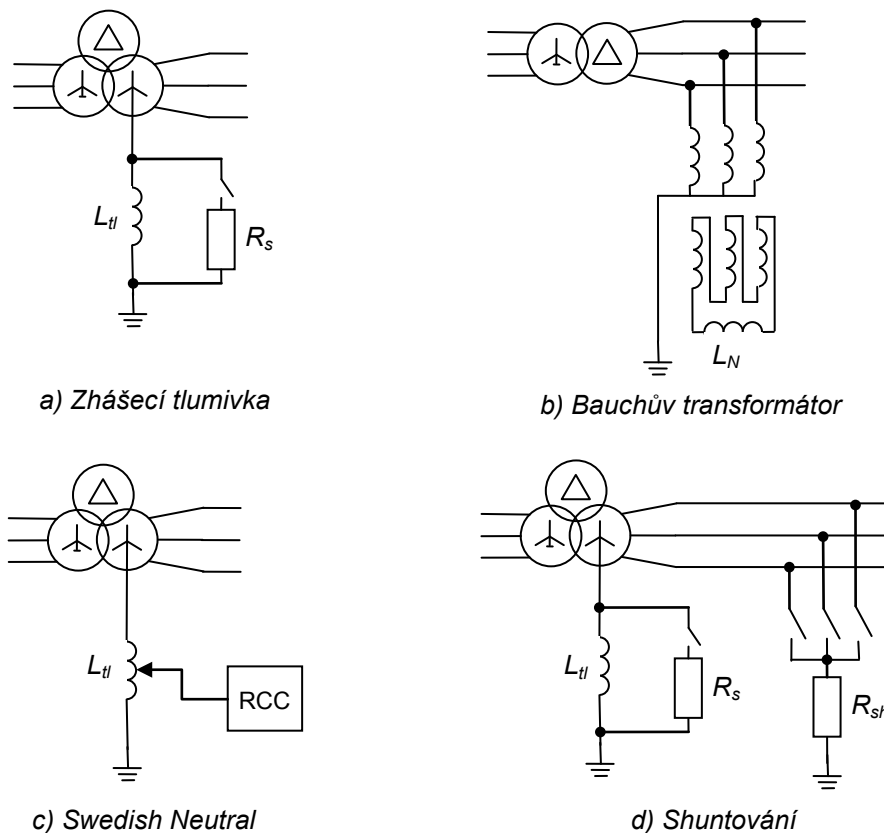
Nepřímo uzemněný nulový bod přes Bauchův transformátor se již nepoužívá. Jeho výhodou bylo, že kompenzaci zemních kapacitních proudů šlo docílit i bez vyvedeného uzlu VN vinutí transformátoru VVN/VN. Bauchův transformátor je konstruován ze dvou vinutí: Primární přímo připojené na přípojnice a zapojené do hvězdy s uzemněným uzlem. Sekundární vinutí má zapojení do trojúhelníka, kde se uzavírá nulová složka proudu přes vloženou regulovatelnou indukčnost. Toto řešení ve výsledku kompenzuje poruchový kapacitní proud stejným způsobem jako použití zhášecí tlumivky, ale nutnost dvou vinutí zvyšuje investiční náklady, což je také důvodem, proč se od jeho použití upustilo. Obdobné řešení, které lze vidět v průmyslových nebo důlních rozvodech je umělý uzel vytvořený třífázovou tlumivkou s vinutím zapojeným do lomené hvězdy, do jejíhož uzlu se připojí zhášecí tlumivka.

Systém Swedish Neutral (tzv. švédská neutrála) je ve srovnání se zhášecí tlumivkou schopen vykompenzovat zbytkový kapacitní proud úplně. Místem zemního spojení protéká poté nulový poruchový proud. To zajistí pomocné zařízení, které injektuje potřebný proud do pomocného vinutí zhášecí tlumivky. Na obrázku c) ho zobrazuji jen velmi zjednodušeně. Tento systém se používá od roku 1992, ale v České republice byl zatím pokusně instalován jen dvakrát a jeho další nasazení se momentálně nepředpokládá z důvodů zjištěné nespolehlivosti složitějšího zařízení, problematické technické podpoře jediného švédského dodavatele (držitele patentu) a v neposlední řadě vysokých nákladů na pořízení tohoto zařízení.

Další známou metodou k omezení zbytkového proudu zemního spojení je tzv. metoda shuntování<sup>5</sup>. Provedená měření ukazují, že toto zařízení účinně snižuje zbytkový (nevykompenzovaný tlumivkou) proud zemního spojení a to hlavně při obloukovém zemním spojení [18]. Materiál [17] uvádí, že v případě kovového zemního spojení při současně nízkém odporu uzemnění postiženého zařízení automatika přizemnění postižené fáze účinná není

<sup>5</sup> Název vychází z anglického slova „shunt“ (= bočník) a zažitý počeštěný název je shuntování.

a dokonce může při vysokém odporu zemnicích soustav napájecích transformoven VVN/VN paradoxně poruchový proud v místě zemního spojení zvýšit. Tyto závěry ověřím v kapitolách 5.3.



Obrázek 1: Principiální schémata metod redukce zbytkového proudu

V neposlední řadě musím vzít v úvahu snížení zbytkového proudu zemního spojení zmenšením rozsahu napájené oblasti, a to buď změnou řazení sítě, a nebo zahuštěním nové transformovny VVN/VN. Toto řešení je ovšem nejvíce nákladné a mělo by spíše korespondovat s nárůstem spotřeby elektřiny a nikoliv s nárůstem kapacitního proudu. V některých případech ani není reálné novou transformovnu postavit.

#### 1.4. Mimořádný provozní stav sítě VN

Dalším důvodem, proč se zabývám analýzou poruchových stavů v kompenzovaných sítích VN ve vazbě na velikosti kapacitních oblastí a zbytkovým proudem při jednofázových zemních poruchách, je praktická zkušenost provozovatele distribuční soustavy s transformovny, které napájejí velké kapacitní oblasti (např. kabelové sítě měst).

Takové transformovny jsou obvykle vybaveny dvěma transformátory, kde jeden napájí kabelovou síť VN a má uzemněný uzel transformátoru přes činný odpor. Druhý transformátor napájí převážně venkovní vedení VN a ke kompenzaci kapacitních proudů při poruše využívá tlumivku. Problém nastane v případě revize (nebo jiného důvodu nutného vypnutí) jednoho transformátoru, kdy rozsáhlou kabelovou síť či její větší část není možné napájet z jiné

transformovny a transformátor, který zůstává v provozu, napájí venkovní i kabelovou síť velkého kapacitního rozsahu.

Při tomto provozním režimu často ani původní zhašecí tlumivka nestačí svým výkonem, a proto se nad rámec normy [1] zapojí dvě tlumivky paralelně. Důsledkem je reálná obava příliš vysokých zbytkových proudů během zemních spojení v taktu provozované sítě. Podotýkám, že provoz venkovní sítě s odporově uzemněným uzlem napájecího transformátoru nepřipadá v úvahu vzhledem k dovoleným dotykovým napětím a kvalitě uzemnění podpěrných bodů venkovního vedení. Odstávka jednoho transformátoru v transformovně se v ročním průměru pohybuje mezi 300 – 400 hodinami<sup>6</sup>, tj. cca 3,4 – 4,6 % z roku, což nelze zanedbat.

---

<sup>6</sup> Průměrnou dobu odpojeného transformátoru v transformovně v síti E.ON Distribuce, a.s. na území Jihočeského kraje jsem vypočetl z údajů roku 2010 na 357 hodin.

## 2. Zbytkový proud a dotyková napětí

Požadovaná kvalita uzemnění a uzemňovacích přívodů závisí na mnoha faktorech, například rezistivita půdy, mechanická a tepelná odolnost, proudová zatížitelnost, vysokofrekvenční rušení, tepelné účinky poruchového proudu a hlavně na stanovených mezích dovolených dotykových a krokových napětí. Provedení uzemnění zásadně ovlivňuje bezpečnost osob pohybujících se v blízkosti elektrického zařízení nebo se ho přímo dotýkajících. Zkušenosti ukázaly, že pro člověka vzniká vyšší riziko úrazu elektrickým proudem vlivem dotykového napětí. Oproti tomu kroková napětí více ohrožují zemědělská zvířata.

Norma ČSN EN 50522 – Uzemňování elektrických instalací AC nad 1kV (prosinec 2011) se zaměřuje na návrh, dimenzování a kontrolu uzemnění a uzemňovacích soustav. Tato norma [24] společně s normou ČSN EN 61936-1 nahradí stávající normu ČSN 33 3201 a to s účinností od 1.11.2013. Již nyní ale platí norma [24] souběžně s oběma normami, a proto budu v následujícím textu používat podmínky, které stanovuje.

### 2.1. Výpočet maximálního zbytkového proudu

Dle normy [24] závisí velikost dovoleného dotykového napětí na době trvání poruchy v rozmezí 0 – 10 sekund. Jelikož řeším síť VN s kompenzací kapacitních proudů, je třeba předpokládat dobu trvání poruchy mnohem delší, omezenou maximálním provozem zhášecí tlumivky při poruše vzhledem k jejímu oteplení nebo, jak ukážu dále, maximálním oteplením odporu shuntu za použití metody shuntování. Z tohoto důvodu budu respektovat normou stanovenou hodnotu dovoleného dotykového napětí po dobu trvání poruchy vyšší než 10 sekund  $U_{Tp} = 80$  V. Nutno podotknout, že při návrhu uzemnění se hodnoty dotykových napětí považují za splněné, nepřekročí-li nárůst potenciálu zemniče dvojnásobek dovoleného dotykového napětí  $U_E \leq 2U_{Tp}$ , tj. 160 V, nebo jsou-li provedena uznávaná zvláštní opatření M dle přílohy E normy [24] až  $U_E \leq 4U_{Tp}$ . Zvláštní opatření ale nejsou typická pro všechna místa ve VN sítích, a proto tuto podmínku již nezohledňuji.

V dalších úvahách budu kontrolovat mezní velikost zbytkového proudu zemního spojení vzhledem k dovoleným dotykovým napětím citované normy, přičemž hodnotu  $U_{Tp}$  resp.  $2U_{Tp}$  beru jako fakt, daný normou a vypočtený dle její přílohy A.

Připojení sekundárního odporníku pro lokalizaci postiženého vývodu se nevěnuji, protože trvá kratší dobu. Pro typickou prodlevu připojení sekundárního odporníku 0,5 sekundy platí hodnota dotykového napětí  $U_{Tp} = 220$  V. Časové zpoždění připojení přídatného odporníku lze nastavit v rozmezí od 0,5 – 10 sekund, což se musí vhodně zvolit za účelem samozhášení přechodných zemních spojení. Často volenou hodnotou časového zpoždění je 1 s. Volba ale vždy závisí na konkrétní oblasti, zkušenostech s jejím provozem a typem poruch, které se v ní vyskytují.

Pozn.: Nutno podotknout, že velikost dovoleného dotykového napětí 80 V vychází z maximálního bezpečného proudu, který projde lidským tělem v dráze z jedné ruky do nohy, aniž by došlo k fibrilaci srdečních komor a je počítána při pravděpodobné impedanci lidského těla bez přídatné

izolace jako například obuv. To pokládám za nepravděpodobné, a proto není přílišným rizikem dimenzovat uzemnění na dvojnásobek tohoto napětí.

Ve vztahu mezních dotykových napětí k provozu kompenzované sítě se zemním spojením by se měla věnovat pozornost zejména těmto místům:

- Jednotlivá uzemnění ve VN síti především ve vzdálených oblastech, dlouhé odbočky venkovního vedení vzdálené od hustě osídlených částí.
- Společné uzemnění trafostanice VN/NN, kde může vzniknout riziko tzv. zavlčeného potenciálu na neživé části zařízení NN přes PEN popř. PE vodič a to opět ve vzdálených místech od osídlených oblastí, např. trafostanice napájející samoty, vzdálené benzínové pumpy atd.

V centrech měst, kde převládá kabelové vedení, lze hovořit o celkové uzemňovací soustavě, kde nebezpečí vzniku nebezpečného dotykového napětí není, protože se v této oblasti vyskytuje vysoká hustota uzemnění ve VN i NN síti. Dále nepředpokládám, že by bylo nutné řešit nebezpečný nárůst potenciálu na neživých částech v elektrických stanicích, kam nemají přístup laici a osoby bez elektrotechnické kvalifikace.

Základní vztah pro výpočet dovoleného nárůstu potenciálu zemniče vychází z Ohmova zákona:

$$\bar{U}_E = \bar{Z}_E \cdot \bar{I}_E \quad (2.1.1)$$

Nárůst potenciálu zemniče vzájemně propojených uzemňovacích soustav VN a NN musí vyhovět v NN síti typu TN:

$$\bar{U}_E \leq F \cdot \bar{U}_{Tp} \quad (2.1.2)$$

Kde  $F$  se rovná 1, je-li vodič PEN nebo PE spojen se zemní pouze v místě uzemňovací soustavy VN. To však běžně nenastane. Normální hodnota  $F$  dle [24] je 2.

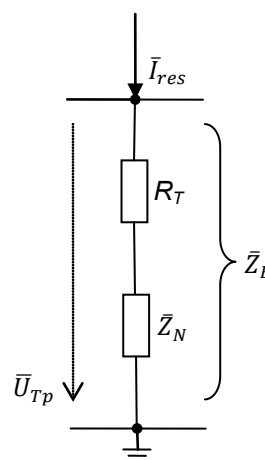
Pro vydefinovaná rizika a) a b) se zemní proud vypočítá:

$$\bar{I}_E = r \bar{I}_{res} \quad (2.1.3)$$

Kde  $r$  je redukční činitel, který se ve venkovních sítích VN (bez zemního lana) rovná 1. V kabelových sítích VN s kabely vybavenými průběžně uzemňovaným pláštěm by mohl být redukční činitel nižší, např. 0,2 – 0,6 v závislosti na materiálu pláště a hustotě jeho uzemnění. Ale opět případ kabelové sítě s častým zemněním není potenciaální problém z hlediska dotykových napětí, a proto ho dále neřeším.

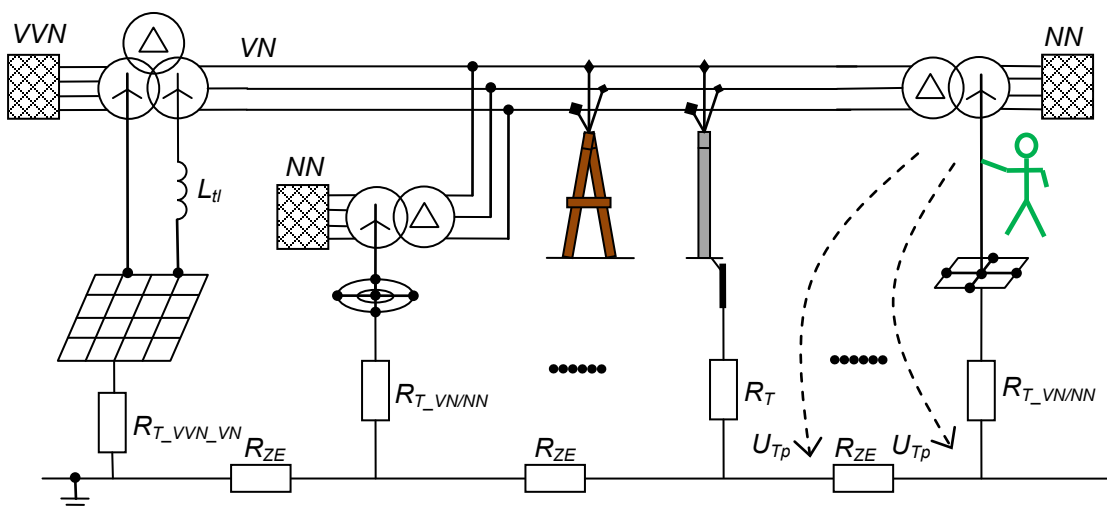
$I_{res}$  reprezentuje zbytkový proud (nevykompenzovaný) zemního spojení. Pokud není známa jeho hodnota, může se vypočítat dle [24] jako 10 %  $I_C$ .

Abych určil maximální zbytkový proud vzhledem k dovolenému nárůstu potenciálu zemniče, potřebuji znát celkovou impedanci uzemnění  $\bar{Z}_E$ .



Obrázek 2: Schéma pro výpočet dotykového napětí na neživé části

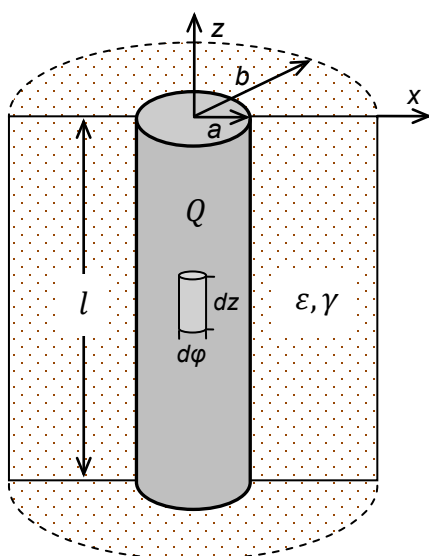
Ta v síti VN zpravidla bez zemního lana bude dána v horším případě čistě odporem zemniče zařízení se zemním spojením v sérii s impedancí uzlu transformátoru proti zemi, tj. impedancí zhášecí tlumivky a odporu uzemnění napájecí transformovny. V lepším případě se do této kombinace projeví potenciál vzdálené země (např. existence blízké elektrické sítě, drážní koleje apod.). Zde lze opět připouštět dvojnásobek dovoleného dotykového napětí.



Obrázek 3: Ilustrace celkové impedance uzemnění ve VN síti

Obrázek 3 celou situaci ilustruje, kdy všechny stožáry (betonové sloupy), úsekové odpínače a trafostanice mají zřízené uzemnění, zatímco dřevěné podpěrné body nikoliv. Proud se tedy šíří zemí s rozdílnou konduktivitou, velmi odlišnou hustotou a provedením uzemnění po prakticky nedefinovatelné dráze zemních odporů  $R_{ZE}$ . Z tohoto důvodu volím postup výpočtu mezních zbytkových proudů vzhledem k dotykovým napětím z řešení stacionárního proudového pole jednoho zemniče, který poté zobecním na celkovou impedanci uzemnění v následující kapitole.

## 2.2. Odvození zbytkových proudů ze vztahu jednoho zemniče



Teoreticky lze odvodit maximální průchod proudu při definovaném dotykovém napětí nebo krokovém napětí vyřešením stacionárního proudového pole kolem jednoho zemniče. Zemničů existuje mnoho druhů pro zvýšení bezpečnosti i v horších půdních podmínkách. Pro běžnou rezistivitu půdy  $200 \Omega$ , která odpovídá hlíně, jílu či písku, vypočítám velikost proudu protékající zemí v závislosti na dotykovém napětí ze vztahu proudového pole tyčového zemniče o poloměru  $a$ , délce  $l$  a vzdálenosti osoby  $b$ , viz obrázek 4. Dle normativní definice krokového a dotykového napětí má být vzdálenost osoby od neživé části nebo délka kroku jeden metr.

Obrázek 4: Ilustrace pro výpočet stacionárního proudového pole tyčového zemniče

Elektrický proud v závislosti na dotykovém napětí:

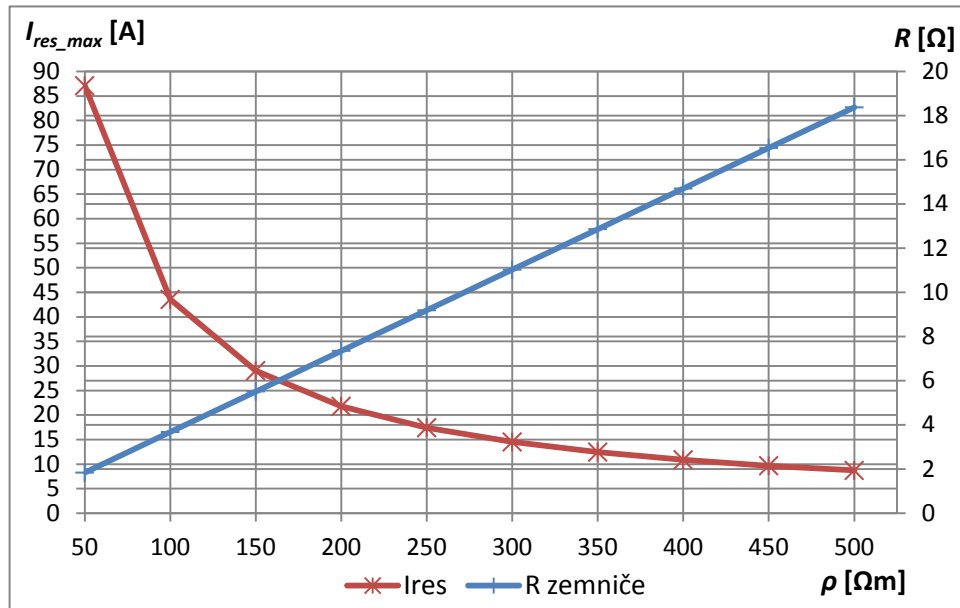
$$I = 2\pi l \gamma \frac{U_{ab}}{\ln \frac{b}{a}} \quad (2.2.1)$$

Častěji se v normách neudává konduktivita půdy ale rezistivita, která je její převrácenou hodnotou:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad (2.2.2)$$

Odpor tyčového zemniče se určí z Ohmova zákona:

$$R = \frac{U_{ab}}{I} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{b}{a} \quad (2.2.3)$$



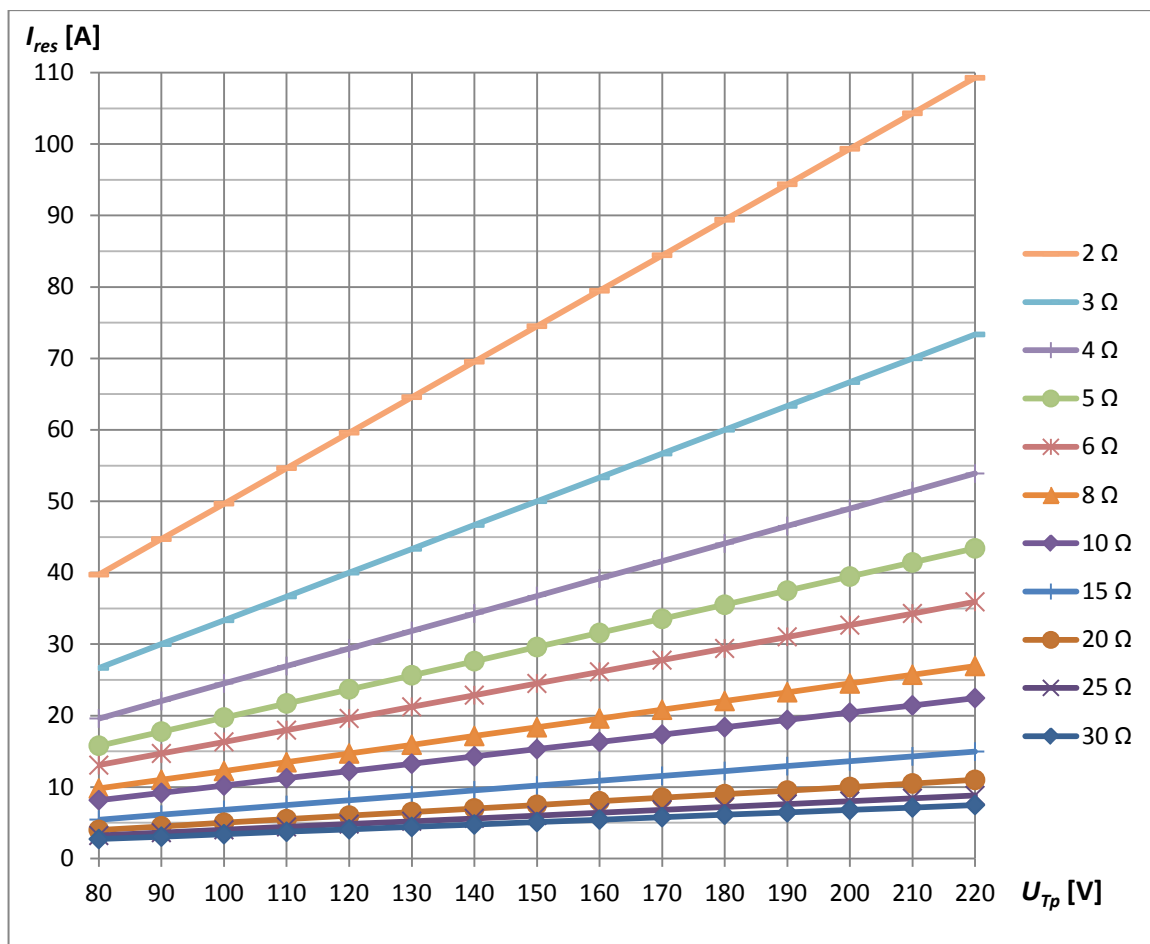
Graf 4: Závislost maximálního residuálního proudu na rezistivitě půdy

Nyní aplikuji výchozí vztahy do praktického výpočtu zemniče kruhového průřezu o délce 20 m ( $l = 20$ ), průměru 2 cm ( $a = 0,01$ ), vzdálenosti osoby od neživé části 1 m ( $b = 1,01$ ) a dotykovém napětí rovnající se maximálnímu dovolenému nárůstu potenciálu 160 V ( $U_{ab} = U_E = 160$  V). Závislost maximálního residuálního proudu vzhledem k dovolenému dotykovému napětí při různých půdních podmínkách a s tím souvisejícím různým odporem zemniče ukazuje výše uvedený graf 4.

Řada  $R_{zemniče}$  prezentuje lineární závislost odporu zemniče na rezistanci půdy. Velikost odporu zemniče v každém bodě osy  $x$  odpovídá maximální hodnotě dovoleného zbytkového proudu červené křivky  $I_{res}$ . Z výsledných průběhů (řada  $I_{res}$ ) mohu vyvodit, že velký zbytkový proud (v rozmezí 40 – 88 A) lze připustit pouze v místech s kvalitním zemněním (1,8 – 4 Ω) nebo velmi příznivými půdními podmínkami. Oproti tomu v nepříznivých půdních podmínkách mezní hodnota residuálního proudu značně klesá a při odporech zemniče nad 10 Ω stagnuje mezi 10 a 15 A.

Nutno ovšem podotknout, že komentuji přijatelný residuální proud pouze jednoho zemniče bez vlivu okolních zemničů, kteří situaci značně zlepšují.





Graf 5: Závislost residuálního proudu na dotykovém napětí

Graf 5 ilustruje závislost residuálního proudu na dotykovém napětí a to pro různé hodnoty odporu uzemnění. S kvalitnějším uzemněním lineární charakteristiky více závisí na dotykovém napětí a lze pak tolerovat vyšší zemní proudy. Ideální zemnič má odpor uzemnění 2 až 3 Ω vzhledem k dotykovým napětím a provozu velkých kapacitních oblastí během zemního spojení. Na druhou stranu při špatném uzemnění charakteristiky na dotykovém napětí téměř nezávisí a hodnoty povolených residuálních proudů se pohybují velmi nízko. S odporem uzemnění nad 10 Ω je zemnicí účinek jednoho zemniče téměř nulový.

Na základě teorie uvedené v předchozí kapitole lineární charakteristiky v grafu 5 reprezentují mezní zemní proudy procházející celkovou impedancí uzemnění, kde bychom se pak ideálně pohybovali v hodnotách 2 Ω a méně. Střízlivým předpokladem 2 Ω lze přistoupit až na residuální proudy 80 A. Dnešní pravidla řídicí se původní normou [1] vycházejí z mezní hodnoty 60 A, což přičítám nižším hodnotám dovolených dotykových napětí v době zpracování původní normy a dále zahrnutí bezpečnostního koeficientu zohledňující degradaci uzemnění, nepřesnost ručního ladění tlumivek apod. Z výše uvedených předpokladů vycházejí nejvyšší přípustné kapacitní oblasti v rozmezí 600 až 800 A.

Stanovit maximální kapacitní rozsah napájené oblasti není jednoduché z důvodu nejednotných půdních podmínek a tedy odporů uzemnění napříč celou oblastí. Z tohoto důvodu určení jedné

hodnoty pro obecně smíšenou síť mimo rámec normy [1], která definuje hodnoty nižší, dnes běžně překračované, nemůže být jednoznačné a bylo by neopatrné zaujmout jednotné stanovisko pro všechny oblasti. Speklativně lze tvrdit, že také z tohoto důvodu nové normy předepisují ve výčtu kritérií volby provozu uzlu transformátoru kromě proudů podmínku dodržení dovoleného dotykového napětí. Právě provedení sítě zaujímá významnou roli v možnostech jejího provozování se zemním spojením a s očekávanými vyššími zbytkovými proudy. Vždy je nutné před provozem konkrétní oblasti s vyššími kapacitními proudy důkladně analyzovat její slabá místa, týkající se kvality zemnicí soustavy.

### 3. Statistika poruch v distribuční síti VN

Jelikož se v této práci zabývám omezením rizika úrazu elektrickým proudem způsobeného poruchovým stavem v síti VN, považuji za nezbytné vyhodnotit údaje o poruchách a jejich četnosti v této síti. Mimo jiné se může stát statistika poruch důležitým kritériem volby provozu sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů během technicko-ekonomického hodnocení.

Mezi základní rozdělení poruch patří podélné a příčné poruchy. Příčné poruchy jsou také nazývány poruchami izolačními, vznikají tedy při snížené izolační pevnosti a doprovází je nárůst procházejícího proudu v postižené fázi nebo fázích. V účinně uzemněných sítích mají tyto poruchy vždy charakter zkratu, který se kvůli výraznému nárůstu poruchového proudu rychle vypíná.

Oproti tomu k podélným poruchám dochází přerušením jedné nebo více fází, jedná se tedy o přerušení toku proudu. Přetržení vodičů se v distribuční síti vyskytuje zřídka, mnohem častější jsou provozní rozeprnutí nebo působení automatiky opětného zapnutí.

#### 3.1. Analyzovaná data

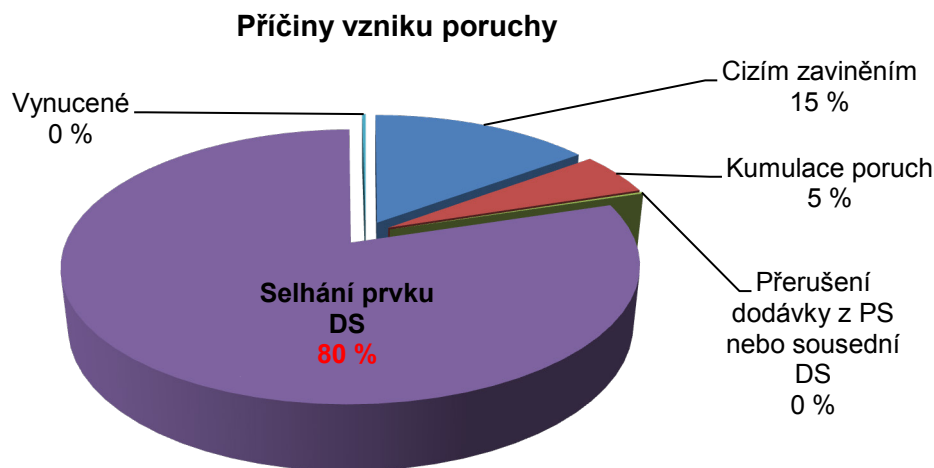
Abych zjistil skladbu poruch v distribučním systému vysokého napětí, byla společností E.ON Česká republika, s.r.o. poskytnuta data s informacemi o poruchách a manipulačních vypnutích zařízení vysokého napětí v období 1.1. 2009 až 31.12.2012. Alespoň čtyřletý časový interval volím záměrně z důvodu minimalizování vlivu kalamitních stavů v inkriminovaných letech. Z těchto dat dále filtruji pouze vzorek týkající se výpadku konkrétního zařízení způsobený poruchou, tj. neplánovanou událostí na hladině vysokého napětí. Nutno ovšem poznamenat, že krátkodobé přechodné poruchy zaznamenány nejsou. Vyhodnocovaná data obsahují informace o poruchách s dobou trvání delší než tři minuty, které se používají pro vyhodnocení ukazatelů nepřetržitosti distribuce z kapitoly 1.1. Stále častěji se diskutuje o snížení časového intervalu zaznamenávaných událostí. I přesto se v analýze zabývám více než 125 tisíci poruchami ve sledovaném období. Za zmínku stojí, že velká část přechodných poruch je likvidována působením automatiky opětného zapnutí, popř. samozhášením.

#### 3.2. Vyhodnocení dat

Nejprve se zaměřím na důvody vzniku poruchy na hladině vysokého napětí. Z tabulky 2 je na první pohled zřejmé, že k nejčastěji označované příčině vzniku poruchy v distribuční soustavě patří selhání jejího prvku. 80 % poruch způsobených selháním prvku distribuční soustavy výrazně ukazuje na důležitost vynakládání investičních prostředků do obnovy distribuční soustavy a zajištění jejího spolehlivého provozu.

Cizím zaviněním	Kumulace poruch	Přerušení dodávky z PS nebo sousední DS	Selhání prvku DS	Vynucené
18 655	6 446	248	99 737	304

Tabulka 2: Počty poruch a jejich příčiny



Graf 6: Procentuelní rozdělení poruch dle jejich příčiny vzniku

Dále se významnějším procentuelním podílem ukazuje cizí zavinění, kam mohou spadat poruchy vzniklé na zařízení mimo distribuční soustavu (ale galvanicky propojené) nebo neodbornými zásahy do zařízení distribuční soustavy. Jen 5 % podíl zaujímají poruchy následně způsobené jinou poruchou. Zanedbatelné pak jsou poruchy vynucené např. z důvodu provedení měření nebo přerušení dodávky z přenosové nebo sousední distribuční soustavy. Opět musím poznamenat, že nejčastější poruchy na hladině VN, tzv. mžiková a krátkodobá<sup>7</sup> zemní spojení způsobené povětrnostními vlivy a porosty kolem venkovních vedení, zde zaznamenány nejsou.

Pokud se dále zaměřím, čím byly poruchy detekovány, získám následující tabulku počtů poruch se způsobem vyhodnocení.

Distanční	Frekvenční	Nadproudá	Rozdílová	Srovnávací	Vypnuto dispečerem	Zemní
402	224	31 168	619	17	6 011	35 270

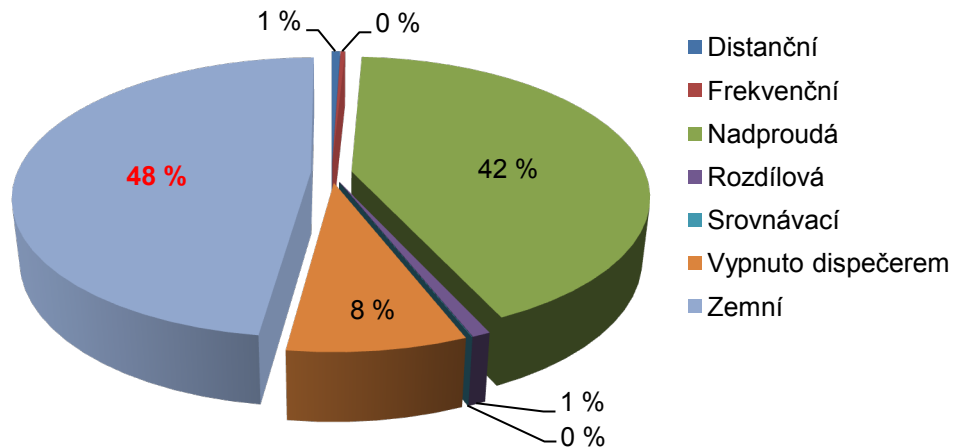
Tabulka 3: Počty poruch rozdělené dle jejich detekce

Z celkového počtu poruch v tabulce 3 chybí přibližně 51 tisíc záznamů, které v datech neměly uvedené vyhodnocovací zařízení. Věnuji se tedy jen těm poruchám, jejichž typ mohu určit podle způsobu detekce. Zde se ukazuje, že většina poruch je detekována ochranami a jen 8 % uvádí status vypnuto dispečerem, což znamená vypnutí na základě oznámení terénního pracovníka nebo odběratele elektřiny.

I když většina zemních spojení má přechodný charakter a ve vyhodnocovaných datech nebyla zahrnuta, další výsledky analýzy ukazují, že nejvyšší měrou se podílí ve skladbě poruch zemní spojení i s dobou trvání delší než tři minuty. Téměř polovina ze všech analyzovaných poruch se dá označit za zemní spojení. Významně se ve skladbě poruch také projevují vypnutí způsobené nadproudy. Zbytek zaujímají spíše ojedinělé typy poruch detekované rozdílovými, distančními, frekvenčními a srovnávacími.

<sup>7</sup> dle ČSN 33 3070 Mžiková zemní spojení ( $t < 5$  s), krátkodobá ( $5 \text{ s} < t < 10$  min), trvalá ( $t > 10$  min)

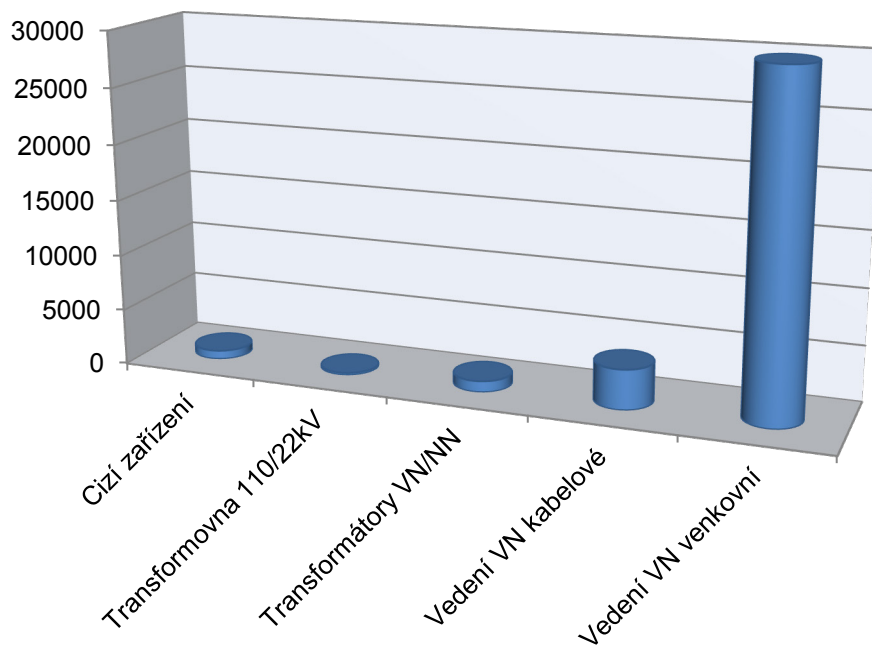
### Vyhodnocení poruchového stavu



Graf 7: Procentuelní rozdělení poruch dle jejich detekce

Vzhledem k zaměření této práce se ještě blíže pozastavím nad zemními spojeními. Z analyzovaných dat jsem zkoumal, na jakém zařízení zemní spojení vznikalo. Toto rozčlenění ilustruje následující graf.

### Počty zemních spojení rozdělené dle místa vzniku



Graf 8: Počty zemních spojení rozdělené dle místa vzniku

Potvrzuje se tak obecně známý výskyt zemních spojení převážně na venkovních vedeních. Přibližně 10 % zemních spojení pak vzniklo i na kabelech VN, 3 % na VN straně distribučních trafostanic a jen velmi zřídka vzniklo zemní spojení v rozvodně 22 kV v transformovných

110/22 kV. 2% zemních spojení se stala na zařízení ve vnitřní instalaci odběratelů nebo výrobců elektřiny, tj. mimo distribuční soustavu.

Co se týče časového výskytu zemních spojení, nepřinášejí výsledky mé analýzy žádné překvapivé výsledky. V každém sledovaném roce byla četnost zemních spojení oscilačně rozložena do celého roku s žádnou opakovatelnou pravidelností. Z toho vyplývá, že jejich zvýšenou četnost nelze předpovídat ani pro určitá roční období.

## 4. Nesymetrické poruchy

Nesouměrný stav obecně vzniká, pokud vektorový součet vyšetřovaných veličin (vektorů) vychází rozdílný od nuly. V třífázové soustavě řeším fázory aktivních veličin a nesouměrná třífázová soustava je taková, která nespĺňuje podmínku rovnosti velikosti fázorů a jejich vzájemných fázových posunů  $2\pi/3$ .

Zdroje nesymetrie mohou rozdělit mezi interní a externí. Jako interní zdroje se označují nesymetrie způsobené malými rozdíly mezi fázovými impedancemi a susceptancemi v třífázovém systému především u venkovního vedení a transformátorů. Interní zdroje nesymetrie mají v distribuční soustavě svojí důležitost, zejména kapacitní nesymetrie, která se využívá pro rezonanční ladění kompenzačních tlumivek. U většiny sítí 22 kV se dle [2] tato nesymetrie pohybuje mezi 0,01 – 0,5 %. Analýzu vnitřních nesymetrií podrobně popisuje teoretická elektrotechnika a pro potřeby této práce budu předpokládat vnitřní nesymetrii jako vlastnost systému.

Externí zdroje nesymetrie jsou takové, které způsobují nesouměrný stav jako například připojení nesymetrické zátěže k třífázové síti nebo vznik nesymetrických příčných nebo podélných poruch.

Vzhledem k cílům disertační práce se dále zabývám nesymetrickými zemními poruchami, které mohou být příčinou vzniku nebezpečného potenciálu na neživých částech elektrického zařízení a zároveň se v sítích VN vyskytují nejčastěji, což dokazují v předchozí kapitole.

V této části vysvětluji nutnou teorii řešení konkrétních typů nesymetrických poruch případně jejich kombinací. Rozborem elementárních zemních poruch se zabývám jen okrajově a v nezbytné míře uvádím pouze propojení složkových soustav v další návaznosti na vysvětlení složitějších stavů simultánních poruch.

### 4.1. Metoda souměrných složkových soustav

Metoda souměrných složek (dále jen MSS) byla vynalezena v roce 1918 (Dr. Charles L. Fortescue) a patří k fundamentálním nástrojům řešení nesouměrných stavů. Obecně umožňuje řešit složité nesouměrné třífázové děje rozkladem do tří souměrných složkových soustav, tj. sousledná, zpětná a nulová<sup>8</sup> složková soustava. Sousledná a zpětná složková soustava je symetrická, nulová složková soustava musí být z principu metody nesymetrická.

Použití MSS omezuje princip superpozice pouze na lineární systémy. Metoda předpokládá výjimečnost fáze  $a$ , která je označována jako referenční. Lze vyšetřovat také jakoukoliv jinou fázi nebo fáze, ale výběr fáze  $a$  poskytuje jednodušší matematické odvození. Výpočty nesymetrických poruch pomocí MSS splňují podmínku harmonického ustáleného stavu, a proto se používají fázory z principu symbolicko-komplexní metody.

<sup>8</sup> V některých literaturách bývá nulová složková soustava označována jako netočivá. Toto označení je však chybné, protože i v nulové složkové soustavě fázory rotují v kladném smyslu.

### 4.1.1. Zhodnocení MSS

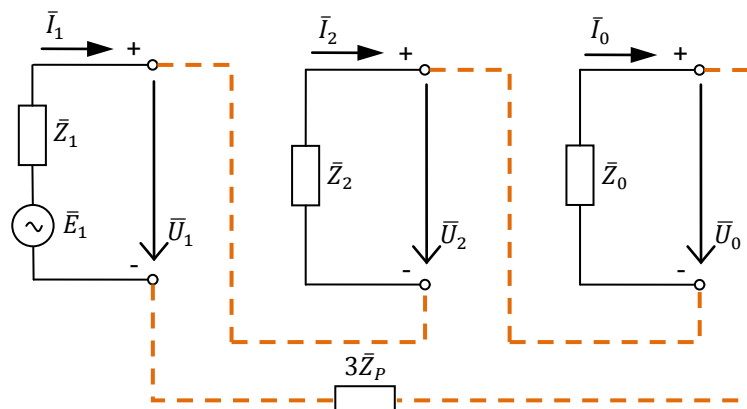
Jelikož jsou složkové soustavy souměrné, jejich náhradní obvod lze reprezentovat jen jednou fází. Jednofázové obvody složkových soustav je výhodné propojit v jedno náhradní schéma, což umožňuje princip superpozice. Propojení náhradních schémat složkových soustav se určí výpočtem soustav rovnic pro složkové proudy a napětí. K sestavení rovnic se musí nejprve stanovit podmínky v uzlu s poruchou. V případě více poruch najednou je sestavení a řešení rovnic na základě podmínek v různých místech obtížnější.

Z náhradního schématu se poté vyjádří složkové proudy a napětí jako funkce složkových impedancí. Následně lze opět transformovat zpět tyto veličiny na fázové hodnoty poruchových proudů a napětí. Výhodou složkového náhradního schématu je mimo jiné získání vztahů aktivních veličin při ustáleném poruchovém stavu závislých na složkových impedancích. Poruchový proud jako funkce složkových impedancí a poruchového napětí poskytuje mnoho informací pro analýzu poruchového stavu.

Pozn.: Výpočet transienčních dějů při poruchách je třeba řešit v časové oblasti kvůli časové derivaci nebo integraci aktivních veličin. Pro posouzení přechodného děje se používá výpočetní technika s příslušným softwarem, např. *DYNAST*, *MATLAB SIMULINK*, *PS CAD*, *EMTP ATP* atd.

### 4.1.2. Náhradní schémata elementárních nesymetrických zemních poruch

Při jednofázové zemní poruše tvoří celkovou impedanci k místu poruchy součet všech složkových impedancí a impedance poruchy řazených v sérii. Velikost poruchového proudu tedy omezuje součet komplexních impedancí, kde impedance poruchy vstupuje trojnásobně.

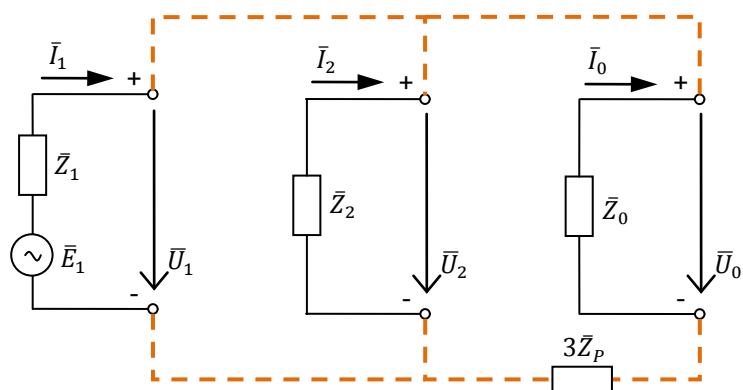


Obrázek 5: Náhradní složkové schéma jednofázové zemní poruchy

Impedance sousledné složky obsahuje součet všech sousledných impedancí jednotlivých prvků (vedení) soustavy od zdroje k místu poruchy v sérioparalelním zapojení v závislosti na topologii sítě. Stejným způsobem se vypočítá také celková impedance zpětné a nulové složkové soustavy. Zpětná složková impedance je pro nerotační elektrické zařízení totožná se souslednou. Impedance nulové složky závisí na mnoha faktorech, například na úrovni napětí, typu stožárů, zemních lan, použitých vodičů, kvalitě zemnicí soustavy, zapojení vinutí transformátoru atd.



V případě dvoufázové zemní poruchy vychází propojení složkových soustav paralelní, což opět vychází ze vztahů mezi složkovými proudy a impedancemi.



Obrázek 6: Náhradní složkové schéma dvoufázové zemní poruchy

Velikost poruchového proudu je úměrná velikosti napájecího napětí a výsledné impedanci sérioparalelního zapojení složkových impedancí a impedance poruchy.

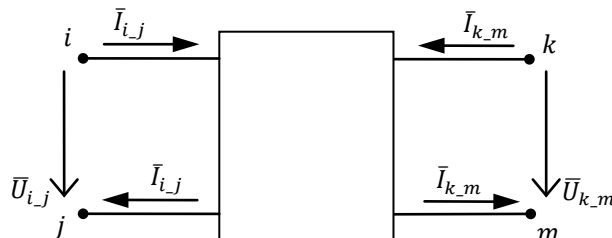
## 4.2. Simultánní poruchy

Následující kapitoly vysvětlují výpočet poruchového proudu při výskytu dvou současných, nesoumístných poruch. Pravděpodobnost vzniku simultánních poruch je obecně malá, ale v kompenzovaných sítích VN může jednoduchá porucha zapříčinit poruchu následnou, především ve „slabém“ místě sítě. Následné poruchy vznikají buď přepětovými špičkami během přechodného děje, které tlumivka na rozdíl od odporově uzemněného nulového bodu příliš netlumí, nebo provozem sítě se zemním spojením, kdy je izolace namáhána sduženým napětím proti zemi. Proto se vyskytují simultánní poruchy v kompenzované síti častěji než v síti s uzemněným uzlem transformátoru přes odpor. Studii simultánních poruch se také zabývám ve vztahu k dalšímu zkoumání metody redukce zbytkového proudu shuntování.

Pozn.: Elektroenergetické systémy od napěťové hladiny 110 kV se navrhují a dimenzují na stav  $n-1$ , tj. výpadek nebo plánované vyřazení jednoho prvku. Analýzu více současných, nesoumístných poruch lze do jisté míry chápat jako  $n-2$ , a proto teorie simultánních poruch není vhodná pro dimenzování zařízení.

### 4.2.1. Teorie dvojbranů

Aplikací teorie dvojbranů je možné rozšířit metodu souměrných složkových soustav pro výpočet poruchového stavu ve dvou místech sítě. Kromě podmínek v jednom poruchovém bodu umožňuje stanovit podmínky pro jakýkoliv typ poruchy v jiném místě sítě. Obecně lze tedy použít tuto metodu pro shodné nebo různé typy dvou simultánních poruch, tj. příčné i podélné poruchy, jednofázové i vícefázové.



Obrázek 7: Obecný dvojbran

Obrázek 7 ilustruje obecný dvojbran s vyznačeným kladným směrem proudů a napětí, který definují a v další teorii ho musím respektovat. Pro obecný dvojbran sestavím následující soustavy rovnic vyjádřením vstupních a výstupních napětí nebo proudů, popř. jejich kombinací:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{i,j} \\ \bar{U}_{k,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{i,j} \\ \bar{I}_{k,m} \end{bmatrix} \quad \bar{U} = \bar{Z} \bar{I} \quad (4.2.1)$$

Kde  $\bar{Z}$  značí charakteristickou impedanční matici dvojbranu.

Vyjádřením proudů dostanu charakteristickou admitanční matici  $\bar{Y}$ :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{i,j} \\ \bar{I}_{k,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{i,j} \\ \bar{U}_{k,m} \end{bmatrix} \quad \bar{I} = \bar{Y} \bar{U} \quad (4.2.2)$$

Impedanční matici dvojbranu získám inverzí z admitanční matice:

$$\bar{Z} = \bar{Y}^{-1} \quad (4.2.3)$$

Kombinací vstupního napětí a výstupního proudu mohu sestavit tzv. sériově paralelní hybridní matici  $\bar{H}$ :

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{i,j} \\ \bar{I}_{k,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{11} & \bar{H}_{12} \\ \bar{H}_{21} & \bar{H}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{i,j} \\ \bar{U}_{k,m} \end{bmatrix} \quad (4.2.4)$$

Paralelně sériovou hybridní matici  $\bar{G}$  není nutné popisovat, protože pro účely této práce to není nutné. Při teoretických výpočtech je možné změnit parametry sítě ke konkrétní poruše a de facto zaměnit vstup s výstupem dvojbranů. U výpočtů n-uzlové sítě už to jednoduše nelze, ale není složité výpočet simultánních poruch s paralelně sériovou hybridní maticí odvodit z teorie uvedené v kapitole 4.2.7.

Prvky charakteristických matic dvojbranů mohu mimo jiné obecně určit ze stavu naprázdno nebo nakrátko. Vstupní, přenosové a výstupní impedance naprázdno jsou:

$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_{i,j}^{i,j} = \left. \frac{\bar{U}_{i,j}}{\bar{I}_{i,j}} \right|_{\bar{I}_{k,m} = 0} \quad (4.2.5)$$

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{k,m}^{i,j} = \left. \frac{\bar{U}_{i,j}}{\bar{I}_{k,m}} \right|_{\bar{I}_{i,j} = 0} \quad (4.2.6)$$

$$\bar{Z}_{21} = \bar{Z}_{i,j}^{k,m} = \left. \frac{\bar{U}_{k,m}}{\bar{I}_{i,j}} \right|_{\bar{I}_{k,m} = 0} \quad (4.2.7)$$

$$\bar{Z}_{22} = \bar{Z}_{k,m}^{k,m} = \left. \frac{\bar{U}_{k,m}}{\bar{I}_{k,m}} \right|_{\bar{I}_{i,j} = 0} \quad (4.2.8)$$

Nalezení prvků charakteristických matic ve vztahu na konkrétní síť VN vysvětlují dále dvěma možnými přístupy.

## 4.2.2. Prvky charakteristické matice $\bar{Z}$ pro výpočet simultánních poruch

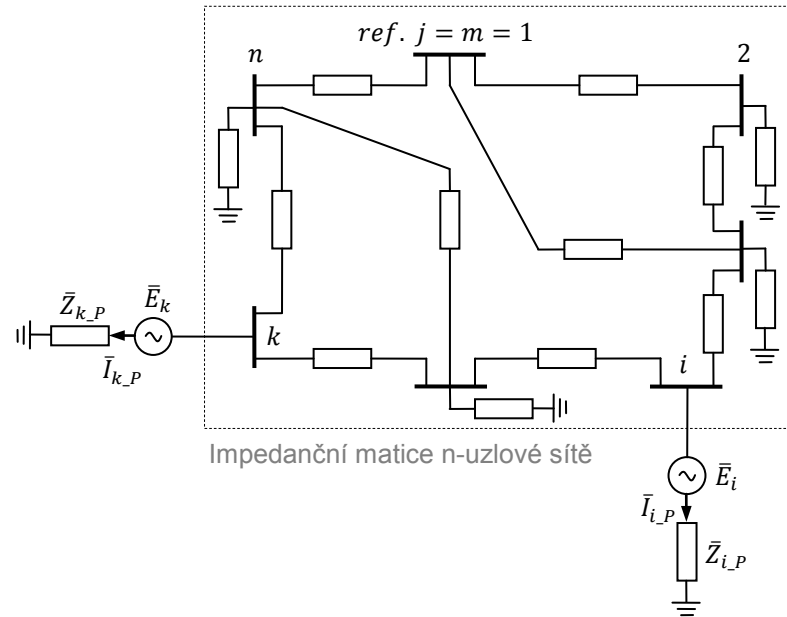
### a) Z admitanční matice n-uzlové sítě

Prvky matice  $\bar{Z}$  pro výpočet simultánních poruch by měly představovat náhradní impedance mezi dvěma uzly s poruchou ( $i, k$ ) a referenčními body napájení ( $j, m$ ). Řešení se zjednoduší, když budou dvě simultánní poruchy napájeny ze společného referenčního bodu, což je obvyklý provoz distribučních sítí VN. V případě napájení ze dvou nezávislých míst, tj. např. při paralelním provozu generátorů, není problém upravit náhradní schéma sítě pro výpočet poruch na jediný referenční bod. Příklad náhradního schématu n-uzlové sítě pro výpočet poruch ilustruje obrázek 8.

Prvky charakteristické impedanční matice dvojbranu se získají z impedanční matice n-uzlové sítě pro poruchy v uzlech  $i$  a  $k$  následujícím předpisem:

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_{i,j}^{i,j} & \bar{Z}_{k,m}^{i,j} \\ \bar{Z}_{i,j}^{k,m} & \bar{Z}_{k,m}^{k,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\bar{Z}_s\}_{ii} & \{\bar{Z}_s\}_{ik} \\ \{\bar{Z}_s\}_{ki} & \{\bar{Z}_s\}_{kk} \end{bmatrix} \quad (4.2.9)$$

Kde  $\bar{Z}_s$  je impedanční matice n-uzlové sítě a  $\{\bar{Z}_s\}_{ik}$  je prvek v  $i$ -tém řádku a  $k$ -tém sloupci impedanční matice n-uzlové sítě.



Obrázek 8: N-uzlová síť se simultánními poruchami

Tato úvaha vyplývá z řešení jednoduchých příčných poruch v síti s  $n$ -uzly, kde principiálně dojde ke změně napětí jen v uzlech, kterými prochází poruchový proud. Předpokladem výpočtu zkratových poměrů je nejprve výpočet ustáleného chodu sítě některou ze známých metod (obvykle Newton-Rapsonova zajišťující dostatečně rychlou konvergenci výpočtu), a tedy znalost fázorů napětí ve všech uzlech těsně před vznikem poruchy, tzv. výpočet aktivní soustavy. Fázory napětí aktivní soustavy v uzlech  $i$  a  $k$  těsně před vznikem poruch označím např.  $\bar{E}_i$  a  $\bar{E}_k$ . Dále se provede výpočet pasivní soustavy, která má definovaná napětí jen v uzlech s poruchami, kde musí být napětí z principu s opačnou orientací než u aktivní soustavy, tj.  $-\bar{E}_i$  a  $-\bar{E}_k$ . To znamená, že touto pasivní soustavou protékají pouze poruchové proudy a proudy v poruchami neovlivněných uzlech jsou nulové. Po superpozici aktivní a pasivní soustavy je v uzlech poruch napětí buď nulové ( $\bar{U}_{i,F} = 0$ ,  $\bar{U}_{k,F} = 0$ ) v případě bezimpedanční (kovové) poruchy nebo přímo úměrné impedanci poruchy ( $\bar{U}_{i,P} = \bar{Z}_{i,P} \cdot \bar{I}_{i,P}$ ,  $\bar{U}_{k,P} = \bar{Z}_{k,P} \cdot \bar{I}_{k,P}$ ). Ze změny napětí v jednotlivých uzlech sítě mezi dvěma ustálenými stavy (bezporuchový a poruchový) lze vypočítat poruchový proud. Za předpokladu nesymetrických příčných poruch musím opět vše řešit ve složkových soustavách (indexy 1,2,0).

Změna napětí vyvolaná dvěma simultánními poruchami v  $n$ -uzlové síti:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{U}_i \\ \Delta \bar{U}_k \\ \vdots \\ \Delta \bar{U}_n \end{bmatrix}^{(1,2,0)} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \dots & \bar{Z}_{1i} & \bar{Z}_{1k} & \dots & \bar{Z}_{1n} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \bar{Z}_{i1} & \dots & \bar{Z}_{ii} & \bar{Z}_{ik} & \dots & \bar{Z}_{in} \\ \bar{Z}_{k1} & \dots & \bar{Z}_{ki} & \bar{Z}_{kk} & \dots & \bar{Z}_{kn} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \bar{Z}_{n1} & \dots & \bar{Z}_{ni} & \bar{Z}_{nk} & \dots & \bar{Z}_{nn} \end{bmatrix}^{(1,2,0)} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\bar{I}_{i,P} \\ -\bar{I}_{k,P} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}^{(1,2,0)} \quad (4.2.10)$$

Ze soustavy rovnic je na první pohled zřejmé, že poruchový proud způsobí změnu napětí jen v uzlech, kterými prochází.

Změna napětí mezi dvěma ustálenými stavy v uzlu  $i$ :

$$\Delta \bar{U}_i^{(1,2,0)} = \bar{U}_{i,P}^{(1,2,0)} - \bar{E}_i^{(1,2,0)} \quad (4.2.11)$$

a v uzlu  $k$ :

$$\Delta \bar{U}_k^{(1,2,0)} = \bar{U}_{k_P}^{(1,2,0)} - \bar{E}_k^{(1,2,0)} \quad (4.2.12)$$

Po dosažení změny napětí ze vztahu (4.2.10) a po úpravě dostanu v uzlu  $i$ :

$$\bar{U}_{i_P}^{(1,2,0)} = \bar{E}_i^{(1,2,0)} - \bar{Z}_{ii}^{(1,2,0)} \bar{I}_{i_P}^{(1,2,0)} - \bar{Z}_{ik}^{(1,2,0)} \bar{I}_{k_P}^{(1,2,0)} \quad (4.2.13)$$

a v uzlu  $k$ :

$$\bar{U}_{k_P}^{(1,2,0)} = \bar{E}_k^{(1,2,0)} - \bar{Z}_{ki}^{(1,2,0)} \bar{I}_{i_P}^{(1,2,0)} - \bar{Z}_{kk}^{(1,2,0)} \bar{I}_{k_P}^{(1,2,0)} \quad (4.2.14)$$

Což lze zapsat v maticové podobě:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{i_P} \\ \bar{U}_{k_P} \end{bmatrix}^{(1,2,0)} = \begin{bmatrix} \bar{E}_i \\ \bar{E}_k \end{bmatrix}^{(1,2,0)} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii} & \bar{Z}_{ik} \\ \bar{Z}_{ki} & \bar{Z}_{kk} \end{bmatrix}^{(1,2,0)} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{i_P} \\ \bar{I}_{k_P} \end{bmatrix}^{(1,2,0)} \quad (4.2.15)$$

Za předpokladu, že napětí v uzlech poruch byla těsně před jejich vznikem souměrná, jejich zpětné a nulové složky se rovnají nule, tj.  $\bar{E}_i^{(2,0)} = 0$  a  $\bar{E}_k^{(2,0)} = 0$ . Z výsledných vztahů (4.2.15) usuzuji, že ve výpočtech poruchových stavů v  $n$ -uzlové síti ovlivňují aktivní veličiny v uzlech s poruchou pouze prvky impedanční matice sítě přiřazené tomuto uzlu a v případě dvou simultánních poruch také přenosové impedance mezi oběma uzly. Pochopitelně poruchový proud ovlivní jen uzly, kterými prochází.

S úvahou mohu pokračovat dále a to rozbořím výpočtu pasivní soustavy, kde při jedné poruše v uzlu  $i$  je definováno napětí  $-\bar{E}_i$  a ekvivalentní impedancí je  $\bar{Z}_{ii}$ . Obdobně to platí pro poruchu jen v uzlu  $k$ . Při uplatnění principu superpozice přírůstek ke změně napětí v uzlu  $i$  způsobený poruchou v uzlu  $k$  dostanu předpokladem nulového poruchového proudu v tomto uzlu ( $\bar{I}_{i_P} = 0$ ) a definovaným napětím  $-\bar{E}_i$ . A naopak přírůstek ke změně napětí v uzlu  $k$  proudem  $\bar{I}_{i_P}$  bude odpovídat nulovému proudu v tomto uzlu ( $\bar{I}_{k_P} = 0$ ) a definovanému napětí  $-\bar{E}_k$ . Což jsou vlastně definice dle vztahů (4.2.6) a (4.2.7) přenosové charakteristické impedance dvojbranu  $\bar{Z}_{ik}$  a  $\bar{Z}_{ki}$ . Tyto prvky budou ze symetrie impedanční matice  $n$ -uzlové sítě identické, tj.  $\bar{Z}_{ik} = \bar{Z}_{ki}$ .

Rozdělení výpočtu na aktivní a pasivní soustavu odpovídá Théveninově větě, pomocí které lze vypočítat aktivní veličiny v řešeném uzlu, resp. mezi dvěma uzly, náhradou zbytku obvodu ideálním zdrojem napětí a náhradní impedancí celého obvodu k řešenému uzlu či uzlům. Tato náhradní impedance se často v literaturách označuje jako Théveninova ( $\bar{Z}_{Th}$ ). Z výše popsaného vyplývá, že právě  $\bar{Z}_{ii}$  plní funkci náhradní Théveninovy impedance k uzlu  $i$  a obdobně  $\bar{Z}_{kk}$  k uzlu  $k$ . Pro symetrický třífázový zkrat jsou Théveninovy impedance rovny zkratovým impedancím úměrným zkratovému výkonu v konkrétním místě sítě.

Nutno poznamenat, že při výpočtech pasivní soustavy a zohlednění vlivu zátěže mají být odběry v uzlech nahrazeny impedancemi a generátory, které se v pasivní soustavě nevyskytují, nahrazeny reaktancemi, resp. rázovými zkratovými reaktancemi. Prvky označené  $\bar{Z}_{ik}^{(1,2,0)}$  jsou prvky impedanční matice sítě pro souslednou, zpětnou a nulovou složkovou soustavu, kde zejména pro nulovou složku budou odlišné hodnoty z důvodu odlišného náhradního schématu pro průchod nulové složky proudu.

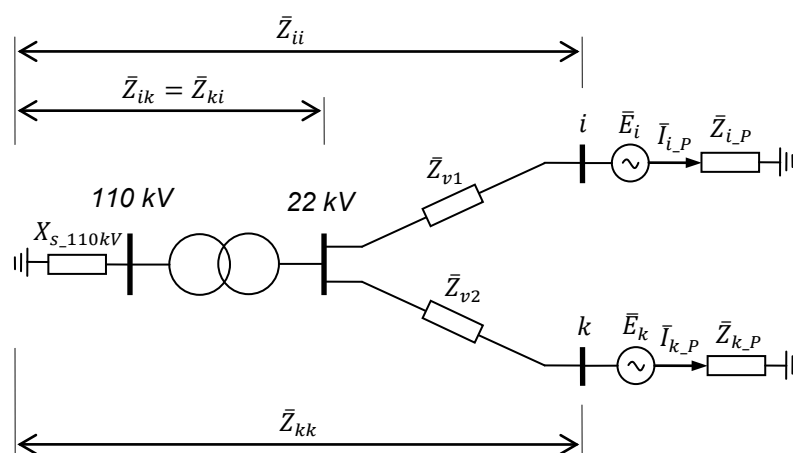
Při sestavování impedanční matice sítě doporučuji dopředu uvažovat s uzly, ve kterých se předpokládají poruchy, za účelem vyjádření výše popsaných impedancí. Protože někdy může být užitečné vytvořit „umělé“ uzly pro místa s poruchou před sestavením impedanční matice sítě. Impedanční matice se nejnáze získá inverzí admitanční matice. Sestavení admitanční matice detailně popisuje například literatura [3]. Impedanční nebo admitanční matici se musí sestavit pro souslednou, zpětnou i nulovou složkovou soustavu. Po změně řazení sítě je nutné přepočítat impedanční matici sítě dle aktuálního řazení.

### b) Prvky charakteristické matice $\bar{Z}$ přímým sestavením T-článku radiální sítě

Kabelové sítě VN se budují přednostně jako kruhové a venkovní vedení VN lze často napájet ze dvou různých transformoven, ale obě tato vedení se provozují paprskově. V tomto případě se výpočet poruchových proudů ve dvou místech zjednoduší. Théveninovy impedance ke každému uzlu s poruchou tvoří součty podélných impedancí od zdroje napájení (referenčního bodu) k místu poruchy, tj. vstupní a výstupní charakteristické impedance dvojbranu ( $\bar{Z}_{ii}$ ,  $\bar{Z}_{kk}$ ).

Pokud předpokládám dvě simultánní poruchy v radiální síti a chci počítat jejich napěťové a proudové poměry při obou těchto poruchách, Théveninovy impedance k jednotlivým místům poruch mohou účelně rozdělit na části, kde prochází oba poruchové proudy a části ovlivněné pouze proudem od jedné poruchy. Část sítě, přes kterou prochází oba poruchové proudy v radiální síti, vlastně představují přenosové impedance, jež jsou opět totožné, tj.  $\bar{Z}_{ik} = \bar{Z}_{ki}$ , viz obrázek 9.

Když budu řešit například dva vývody z TR 110/22 kV, na nichž vznikne současně porucha, společná část ovlivňující stav v obou uzlech poruch bude náhradní impedance, resp. reaktance sítě 110 kV a transformátoru 110/22 kV. Impedance jednotlivých vedení (vývodů) pak tvoří část, kterou ovlivňuje pouze jeden z obou poruchových proudů. Ostatní vývody 22 kV, jimiž poruchové proudy neprocházejí, není účelné do schématu zahrnovat.



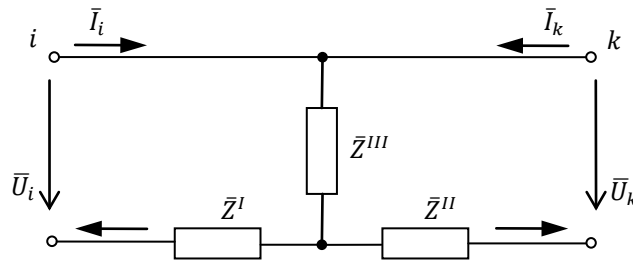
Obrázek 9: Prvky charakteristické matice z radiální sítě

Opět je třeba mít na paměti, že v případě nesymetrických poruch musím provést výpočet ve složkových soustavách, kde jsou odlišné hodnoty impedancí zejména pro nulovou složku, což

dále demonstřuji na praktickém výpočtu v kapitole 4.3.1. Příklad transformovny se dvěma vývody evokuje k použití dvojbranu typu T-článek, viz dále.

### 4.2.3. Náhradní obvod dvojbranu

Ideálním dvojbranem pro výpočty dvou simultánních poruch se jeví T-článek, který budu dále kreslit obrácený. Výhodu tohoto zapojení zaujímá především snadné odvození prvků charakteristické matice dvojbranu a analogie s radiálním řazením sítě. Jak bylo vysvětleno v předchozí kapitole, T-článek poskytuje transparentní řešení vyšetřování simultánních poruch v paprskově řazené síti.



Obrázek 10: Pasivní dvojbran obrácený T-článek

Aplikací podmínek naprázdno pro pasivní dvojbran T-článek, viz obrázek 10, získám následující prvky charakteristické matice dvojbranu:

$$\bar{Z}_{ii} = \left. \frac{\bar{U}_i}{\bar{I}_i} \right|_{\bar{I}_k = 0} = \left. \frac{(\bar{Z}^I + \bar{Z}^{III})\bar{I}_i}{\bar{I}_i} \right|_{\bar{I}_k = 0} \quad (4.2.16)$$

$$\bar{Z}_{ik} = \left. \frac{\bar{U}_i}{\bar{I}_k} \right|_{\bar{I}_i = 0} = \left. \frac{\bar{Z}^{III}\bar{I}_k}{\bar{I}_k} \right|_{\bar{I}_i = 0} \quad (4.2.17)$$

$$\bar{Z}_{ki} = \left. \frac{\bar{U}_k}{\bar{I}_i} \right|_{\bar{I}_k = 0} = \left. \frac{\bar{Z}^{III}\bar{I}_i}{\bar{I}_i} \right|_{\bar{I}_k = 0} \quad (4.2.18)$$

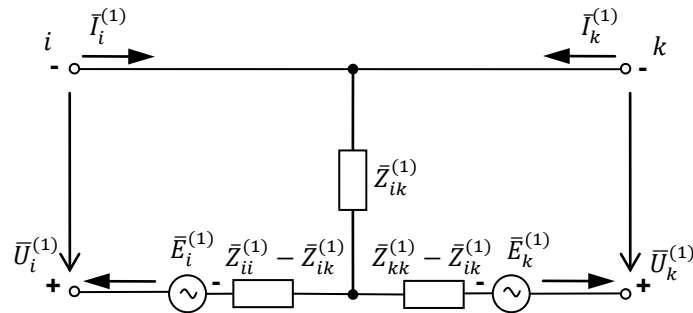
$$\bar{Z}_{kk} = \left. \frac{\bar{U}_k}{\bar{I}_k} \right|_{\bar{I}_i = 0} = \left. \frac{(\bar{Z}^{II} + \bar{Z}^{III})\bar{I}_k}{\bar{I}_k} \right|_{\bar{I}_i = 0} \quad (4.2.19)$$

Ze vztahů pro vstupní, výstupní a přenosové impedance naprázdno vyplývá velikost jednotlivých impedancí náhradního pasivního dvojbranu:

$$\begin{aligned} \bar{Z}^{III} &= \bar{Z}_{ik} = \bar{Z}_{ki} \\ \bar{Z}^I &= \bar{Z}_{ii} - \bar{Z}_{ik} \\ \bar{Z}^{II} &= \bar{Z}_{kk} - \bar{Z}_{ik} \end{aligned} \quad (4.2.20)$$

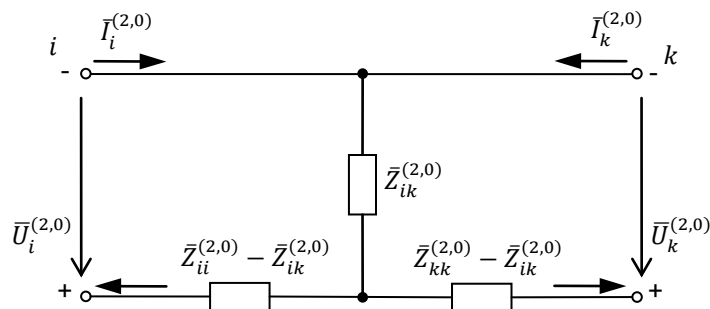
Ve výpočtech nesymetrií pomocí teorie dvojbranů je nutné vypočítat jejich prvky pro souslednou zpětnou i nulovou složkovou soustavu. Každá složková soustava bude mít tedy vlastní dvojbran odpovídající náhradnímu schématu příslušné složky. Sousledná složková soustava je aktivní, zpětnou a nulovou složkovou soustavu předpokládám pasivní, tj. neobsahující zdroje za podmínky souměrných napájecích napětí. Náhradní dvojbran sousledné složkové soustavy musím tedy doplnit o zdroje, které budou reprezentovat fázory předporuchových napětí v uzlech poruch. Protože předpokládám dvě místa poruchy, zahrnu do schématu dva zdroje předporuchových napětí ve dvou různých uzlech sítě ( $i$ ,  $k$ ). Pro dodržení znaménkové konvence a kladných směrů

vstupních a výstupních proudů dvojbranů orientují záporné póly zdrojů do uzlu, což je také důvodem použití obráceného T-článku.



Obrázek 11: Aktivní dvojbran sousledné složkové soustavy

Zapojení náhradních pasivních dvojbranů pro zpětnou a nulovou složkovou soustavu je totožné, a proto ho uvádím v jednom obrázku níže, kde impedance  $\bar{Z}_{ii}^{(2,0)}$ ,  $\bar{Z}_{ik}^{(2,0)}$  a  $\bar{Z}_{kk}^{(2,0)}$  značí impedance pro zpětnou složkovou soustavu (horní index 2) v dvojbranu této soustavy nebo pro nulovou složkovou soustavu (horní index 0) ve schématu nulové složkové soustavy. Stejnou logikou také značím aktivní veličiny. Pasivní dvojbrany zpětné a nulové složkové soustavy budou reciproční, a tím pádem platí  $\bar{Z}_{ik}^{(2,0)} = \bar{Z}_{ki}^{(2,0)}$ .



Obrázek 12: Pasivní dvojbran pro zpětnou a nulovou složkovou soustavu

#### 4.2.4. Spojování dvojbranů – náhradní schémata poruch

Výše uvedená teorie dvojbranů platí za předpokladu naznačeného kladného smyslu vstupních a výstupních proudů. Dále ukážu, že náhradní dvojbrany složkových soustav mohou mít vstupní svorky či výstupní svorky propojeny do série nebo paralelně. K dosažení stále kladného smyslu vstupních a výstupních proudů a napětí, což bylo předpokladem v odvození vztahů v předchozí kapitole, oddělím vstupní a výstupní svorky složkových dvojbranů přes ideální transformátory, přičemž převod těchto transformátorů je 1:1 za podmínky výjimečnosti fáze  $a$ .

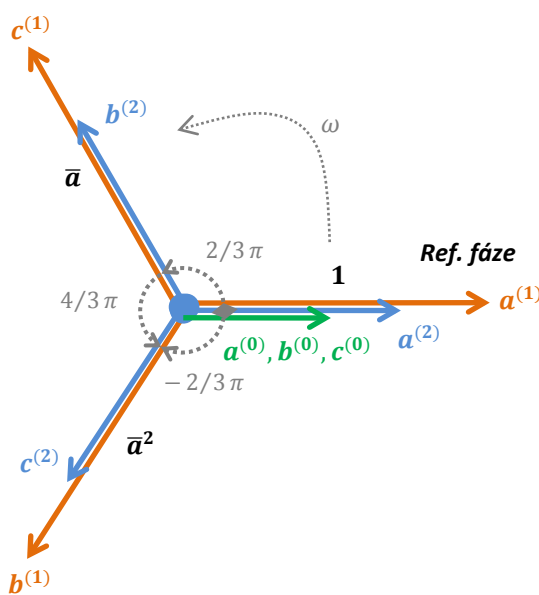
Pakliže není splněna podmínka referenční fáze  $a$ , musí se otočit fázory aktivních veličin postižené fáze pomocí fázoru natočení tak, aby byly fázově totožné s fází  $a$ . Vhodné natočení aktivních veličin docílím využitím ideálních oddělovacích transformátorů, jejichž převody budou pro poruchu v uzlu  $i$ :  $\bar{n}_i^{(l)}:1$ , kde  $l = 1, 2, 0$ , a analogicky pro poruchu v uzlu  $k$ :  $\bar{n}_k^{(l)}:1$ , kde  $l = 1, 2, 0$ .



Důvodem natočení fázoru je samotný princip metody složkových soustav, který vychází z transformace nesouměrných fázorů ve sledu fází  $a$ - $b$ - $c$  do složkových soustav, kde stačí poté vyšetřovat pouze fázi  $a$ .

Propojení složkových soustav s respektováním výjimečné fáze  $a$  bylo ukázáno v kapitole 4.1.2, kde jako základní vstupní parametr odvození slouží podmínky pro konkrétní poruchu. Tyto podmínky platí i pro simultánní poruchy s tím rozdílem, že každá porucha má vlastní podmínky a zároveň může dojít k tomu, že každá porucha nastane v jiné fázi. Z tohoto důvodu definuji zvlášť převody ideálních transformátorů v uzlu  $i$  a v uzlu  $k$ .

Třífázový levotočivý složkový systém ilustruje následující obrázek, kde jsou jednotlivé fáze složkových soustav interpretovány pomocí jednotkového fázoru natočení. Ten s výhodou použijí dále k vyjádření převodu ideálních transformátorů.



V případě jedné poruchy ve fázi  $b$  nebo  $c$  bude pro souslednou a zpětnou složkovou soustavu ideální převod transformátoru podle obrázku  $\bar{a}$  nebo  $\bar{a}^2$ . Z obrázku dále vyplývá, že převod pro nulovou složkovou soustavu bude vždy 1:1, protože fázory nulové složkové soustavy jsou ve fázi s referenční fází  $a$ .

Pro poruchy ve dvou fázích plní funkci referenční vždy fáze, která je nepostižená. Například pro příčnou poruchu mezi fázemi  $b$  a  $c$  je referenční zdravá fáze  $a$ , tudíž převody ideálních transformátorů složkových soustav se stanoví v tomto případě 1:1.

Obrázek 13: Třífázový složkový systém

Pokud dojde k mezifázové poruše mezi fázemi  $a$  a  $c$ , otočím fázi  $b$  na referenční fázi  $a$  pomocí fázoru natočení dle obrázku 13. Výsledky pro jednotlivé typy poruch shrnuji v níže uvedené tabulce 4.

Porucha ve fázi	$\bar{n}_i^{(1)}, \bar{n}_k^{(1)}$	$\bar{n}_i^{(2)}, \bar{n}_k^{(2)}$	$\bar{n}_i^{(0)}, \bar{n}_k^{(0)}$
$a$	1	1	1
$b$	$\bar{a}^2$	$\bar{a}$	1
$c$	$\bar{a}$	$\bar{a}^2$	1
$b$ - $c$	1	1	1
$a$ - $b$	$\bar{a}$	$\bar{a}^2$	1
$a$ - $c$	$\bar{a}^2$	$\bar{a}$	1

Tabulka 4: Převedení ideálních transformátorů

Pozn.: Tabulka 4 platí pro příčné i podélné poruchy v postižené fázi nebo fázích. Tedy v případech přerušené fáze  $b$  nebo zemního spojení téže fáze platí stejné převody oddělovacích ideálních transformátorů a výše popsany princip.

Propojení složkových soustav v náhradních schématech elementárních poruch, uvedených v kapitole 4.1.2, lze analogicky aplikovat také mezi dvojbrany při simultánních poruchách. Na základě těchto předpokladů budu dále řešit propojení svorek složkových dvojbranů buď sériové nebo paralelní dle typu poruchy a to na vstupu nebo výstupu dvojbranu v závislosti na místě vzniku konkrétní poruchy. Výsledek těchto předpokladů shrnuji v následující tabulce 5.

Typ poruchy v uzlu		Propojení svorek dvojbranu		Charakteristická matice složk. dvojbranů
$i$	$k$	Vstupní	Výstupní	
1 fáze - zem	1 fáze - zem	sériové	sériové	$\bar{Z}$
1 fáze - zem	2 fáze - zem	sériové	paralelní	$\bar{H}$
2 fáze - zem	1 fáze - zem	paralelní	sériové	$\bar{G}$
2 fáze - zem	2 fáze - zem	paralelní	paralelní	$\bar{Y}$

Tabulka 5: Propojení složkových dvojbranů pro různé typy poruch

Propojením vstupních a výstupních svorek složkových dvojbranů mohou získat jeden výsledný dvojbran s impedanční, admitanční nebo hybridní (sériově paralelní nebo paralelně sériovou) charakteristickou maticí v závislosti na kombinaci typů obou poruch. Podle výsledné charakteristické matice rozdělím dále simultánní poruchy na poruchy s impedanční, admitanční a hybridní charakteristickou maticí. Tyto tři typy simultánních poruch mají vlastní teoretické řešení, a proto je rozeberu zvlášť v následujících kapitolách. Principiálně náhrada celého schématu jedním výsledným dvojbranem zajistí vyřešit počáteční úlohu šesti rovnic o dvanácti neznámých (vstupní a výstupní složkové proudy a napětí) převedením na řešitelnou úlohu dvou rovnic se dvěma neznámými.

#### 4.2.5. Simultánní poruchy s impedanční charakteristickou maticí

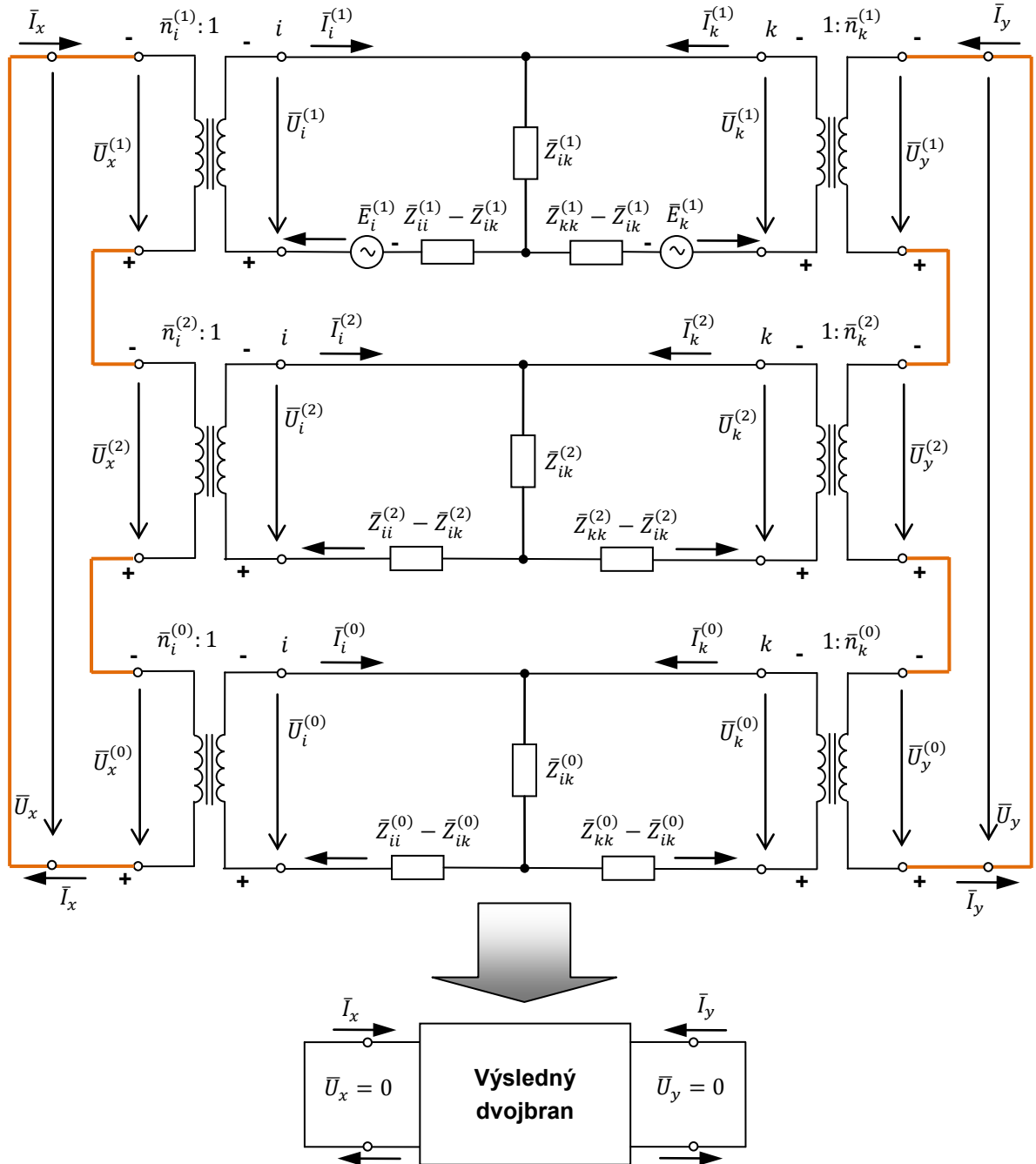
Následující náhradní schéma na obrázku 14 se uplatní pro dvě simultánní poruchy, které mají sériové propojení složkových soustav, což dle tabulky 5 odpovídá dvěma simultánním jednofázovým zemním poruchám. Toto náhradní schéma popíši následujícími vztahy a vyřeším obvod za účelem výpočtu fázorů poruchových napětí a proudů.

Aplikací II. KZ vyjádřím vstupní a výstupní napětí sousledné složkové soustavy:

$$\begin{aligned}\bar{U}_i^{(1)} &= \bar{E}_i^{(1)} - \bar{Z}_{ik}^{(1)}\bar{I}_i^{(1)} - \bar{Z}_{ik}^{(1)}\bar{I}_k^{(1)} - (\bar{Z}_{ii}^{(1)} - \bar{Z}_{ik}^{(1)})\bar{I}_i^{(1)} \\ \bar{U}_k^{(1)} &= \bar{E}_k^{(1)} - \bar{Z}_{ik}^{(1)}\bar{I}_i^{(1)} - \bar{Z}_{ik}^{(1)}\bar{I}_k^{(1)} - (\bar{Z}_{kk}^{(1)} - \bar{Z}_{ik}^{(1)})\bar{I}_k^{(1)}\end{aligned}\quad (4.2.21)$$

Což lze také přepsat do maticového tvaru za předpokladu  $\bar{Z}_{ik}^{(1)} = \bar{Z}_{ki}^{(1)}$ .

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_i^{(1)} \\ \bar{U}_k^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{E}_k^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii}^{(1)} & \bar{Z}_{ik}^{(1)} \\ \bar{Z}_{ki}^{(1)} & \bar{Z}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_i^{(1)} \\ \bar{I}_k^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.22)$$



Obrázek 14: Náhradní schéma simultánních poruch s impedanční maticí

Převody oddělovacích transformátorů složkových soustav  $\bar{n}_i^{(l)}$ , kde  $l = 1, 2, 0$ , vyjádřím takto:

$$\bar{n}_i^{(l)} = \frac{\bar{U}_x^{(l)}}{\bar{U}_i^{(l)}} = \frac{\bar{I}_x^{(l)}}{\bar{I}_i^{(l)}} \quad (4.2.23)$$

$$\bar{n}_k^{(l)} = \frac{\bar{U}_y^{(l)}}{\bar{U}_k^{(l)}} = \frac{\bar{I}_y^{(l)}}{\bar{I}_k^{(l)}} \quad (4.2.24)$$

Nyní do soustavy rovnic (4.2.22) dosadím napětí a proudy pomocí (4.2.23) a (4.2.24), po substituci získám:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(1)} \\ \bar{U}_y^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{E}_k^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii}^{(1)} & \frac{\bar{n}_i^{(1)} \bar{Z}_{ik}^{(1)}}{\bar{n}_k^{(1)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(1)} \bar{Z}_{ki}^{(1)}}{\bar{n}_i^{(1)}} & \bar{Z}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.25)$$

Kde pro sériové propojení  $\bar{I}_x^{(1)} = \bar{I}_x^{(2)} = \bar{I}_x^{(0)} = \bar{I}_x$  a  $\bar{I}_y^{(1)} = \bar{I}_y^{(2)} = \bar{I}_y^{(0)} = \bar{I}_y$ .

Obdobně sestavím soustavu rovnic pro pasivní zpětnou a nulovou složkovou soustavu:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(2)} \\ \bar{U}_y^{(2)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii}^{(2)} & \frac{\bar{n}_i^{(2)} \bar{Z}_{ik}^{(2)}}{\bar{n}_k^{(2)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(2)} \bar{Z}_{ki}^{(2)}}{\bar{n}_i^{(2)}} & \bar{Z}_{kk}^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.26)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(0)} \\ \bar{U}_y^{(0)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii}^{(0)} & \frac{\bar{n}_i^{(0)} \bar{Z}_{ik}^{(0)}}{\bar{n}_k^{(0)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(0)} \bar{Z}_{ki}^{(0)}}{\bar{n}_i^{(0)}} & \bar{Z}_{kk}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.27)$$

Dle tabulky 4 odvozené v předchozí kapitole platí  $\bar{n}_i^{(0)} = \bar{n}_k^{(0)} = 1$ :

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(0)} \\ \bar{U}_y^{(0)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii}^{(0)} & \bar{Z}_{ik}^{(0)} \\ \bar{Z}_{ki}^{(0)} & \bar{Z}_{kk}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.28)$$

Z obrázku 14 přímo vyplývá, že výsledné vstupní napětí je součtem všech vstupních složkových napětí a taktéž výsledné výstupní napětí. Celková vstupní i výstupní napětí jsou zkratována pro dané zapojení složkových soustav.

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(1)} \\ \bar{U}_y^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(2)} \\ \bar{U}_y^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(0)} \\ \bar{U}_y^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2.29)$$

Dosazením za vstupní a výstupní složková napětí z (4.2.25), (4.2.26) a (4.2.28) dostanu soustavu rovnic výsledného dvojbranu:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{E}_k^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii} & \bar{Z}_{ik} \\ \bar{Z}_{ki} & \bar{Z}_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.30)$$

Kde prvky výsledné charakteristické impedanční matice tvoří součty prvků složkových charakteristických matic:

$$\bar{Z}_{ii} = \bar{Z}_{ii}^{(1)} + \bar{Z}_{ii}^{(2)} + \bar{Z}_{ii}^{(0)} \quad (4.2.31)$$

$$\bar{Z}_{ik} = \frac{\bar{n}_i^{(1)} \bar{Z}_{ik}^{(1)}}{\bar{n}_k^{(1)}} + \frac{\bar{n}_i^{(2)} \bar{Z}_{ik}^{(2)}}{\bar{n}_k^{(2)}} + \bar{Z}_{ik}^{(0)} \quad (4.2.32)$$

$$\bar{Z}_{ki} = \frac{\bar{n}_k^{(1)} \bar{Z}_{ki}^{(1)}}{\bar{n}_i^{(1)}} + \frac{\bar{n}_k^{(2)} \bar{Z}_{ki}^{(2)}}{\bar{n}_i^{(2)}} + \bar{Z}_{ki}^{(0)} \quad (4.2.33)$$

$$\bar{Z}_{kk} = \bar{Z}_{kk}^{(1)} + \bar{Z}_{kk}^{(2)} + \bar{Z}_{kk}^{(0)} \quad (4.2.34)$$

Výše uvedené součty prvků složkových impedančních matic vychází z předpokladu sériového spojení složkových dvojbranů, kde se sčítají jednotlivá vstupní a výstupní napětí složkových

dvojbranů a zároveň zde platí rovnost vstupních a výstupních proudů  $\bar{I}_x, \bar{I}_y$ , tzn., je zde analogie jako při spojování dvojpólů s rozdílem sčítání matic pro dvojbrany.

Neznámými ze soustavy rovnic (4.2.30) jsou proudy  $\bar{I}_x, \bar{I}_y$ , které získám vyřešením této soustavy rovnic pro nulová vstupní a výstupní napětí.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii} & \bar{Z}_{ik} \\ \bar{Z}_{ki} & \bar{Z}_{kk} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{E}_k^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.35)$$

Ze znalosti proudů  $\bar{I}_x, \bar{I}_y$  vypočítám fázory složkových proudů:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_i^{(1)} \\ \bar{I}_i^{(2)} \\ \bar{I}_i^{(0)} \end{bmatrix} = \bar{I}_x \cdot \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_i^{(1)} \\ 1/\bar{n}_i^{(2)} \\ 1/\bar{n}_i^{(0)} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \bar{I}_k^{(1)} \\ \bar{I}_k^{(2)} \\ \bar{I}_k^{(0)} \end{bmatrix} = \bar{I}_y \cdot \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_k^{(1)} \\ 1/\bar{n}_k^{(2)} \\ 1/\bar{n}_k^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.2.36)$$

Dosazením složkových proudů zpět do soustav rovnic (4.2.25), (4.2.26), (4.2.28) vypočítám složková napětí  $\bar{U}_x^{(l)}$  a  $\bar{U}_y^{(l)}$ , kde  $l = 0, 1, 2$  a zpátky přepočtu přes ideální oddělovací transformátory:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_i^{(1)} \\ \bar{U}_i^{(2)} \\ \bar{U}_i^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_i^{(1)} \\ 1/\bar{n}_i^{(2)} \\ 1/\bar{n}_i^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(1)} \\ \bar{U}_x^{(2)} \\ \bar{U}_x^{(0)} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \bar{U}_k^{(1)} \\ \bar{U}_k^{(2)} \\ \bar{U}_k^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_k^{(1)} \\ 1/\bar{n}_k^{(2)} \\ 1/\bar{n}_k^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_y^{(1)} \\ \bar{U}_y^{(2)} \\ \bar{U}_y^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.2.37)$$

Poruchové proudy a napětí v uzlech  $i$  a  $k$  dostanu transformací složkových soustav:

$$\bar{U}_{abc,i} = \bar{F} \bar{U}_{120,i} \quad (4.2.38)$$

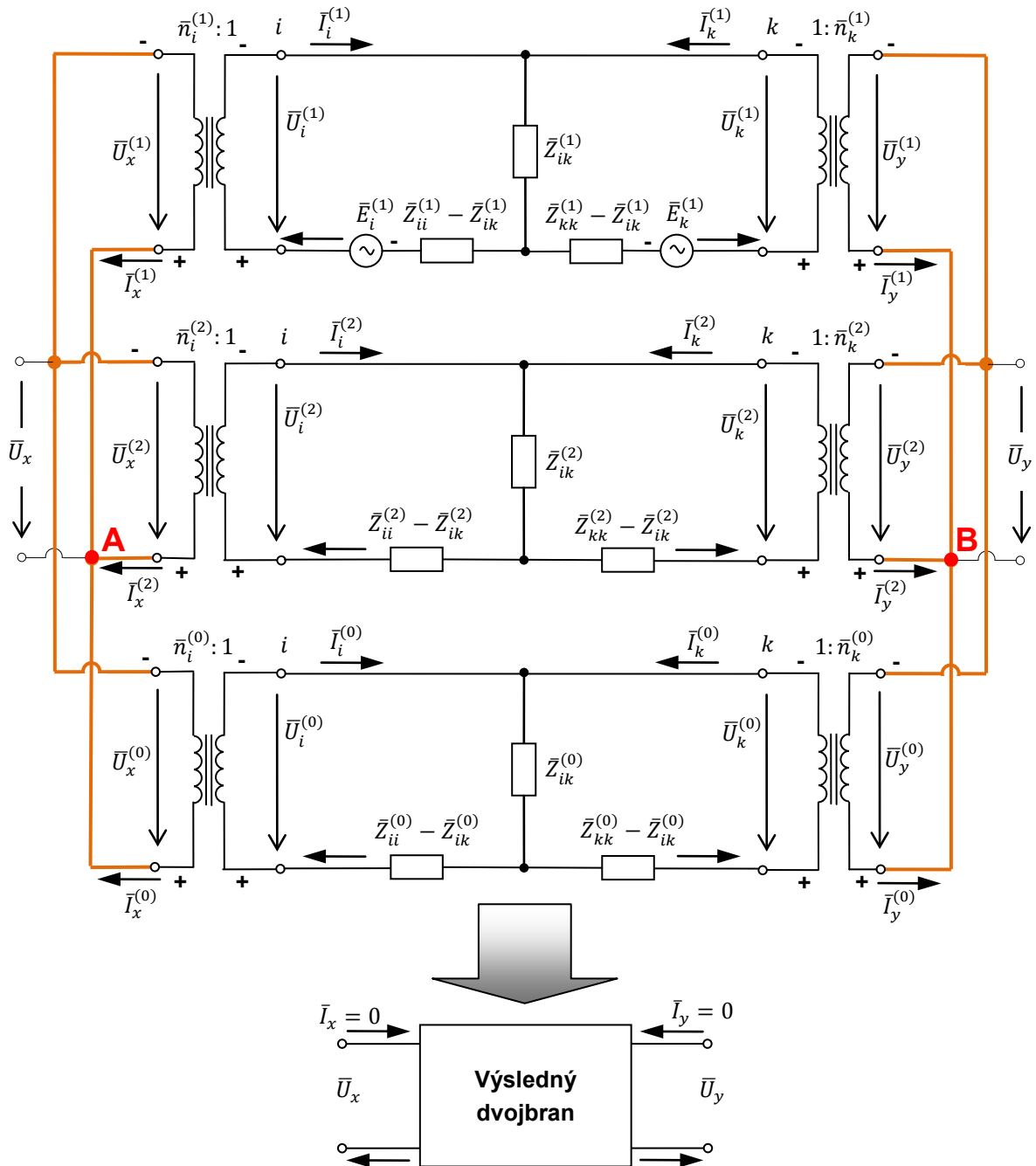
$$\bar{I}_{abc,i} = \bar{F} \bar{I}_{120,i}$$

$$\bar{U}_{abc,k} = \bar{F} \bar{U}_{120,k}$$

$$\bar{I}_{abc,k} = \bar{F} \bar{I}_{120,k} \quad (4.2.39)$$

### 4.2.6. Simultánní poruchy s admitanční charakteristickou maticí

V předchozím případě jsem k odvození výsledného dvojbranu využil typických vlastností sériového propojení dvojbranů. Nyní se zaměřím na vlastnosti paralelního spojení, kde se vstupní a výstupní napětí rovnají. Naopak celkový vstupní proud je dán součtem všech vstupních proudů složkových dvojbranů. Obdobně celkový výstupní proud získám součtem všech výstupních proudů.



Obrázek 15: Náhradní schéma simultánních poruch s admitanční maticí

Pro dvě simultánní dvoufázové zemní poruchy, viz tabulka 5, použijí admitanční složkové matice z důvodu paralelního propojení složkových dvojbranů za účelem odvození charakteristické matice výsledného dvojbranu, pomocí něhož vypočtu složkové proudy a napětí.

Soustava rovnic (4.2.22) odvozená v přechází kapitole platí i v tomto případě. Nyní z ní vyjádřím vstupní a výstupní složkové proudy.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_i^{(1)} \\ \bar{I}_k^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii}^{(1)} & \bar{Z}_{ik}^{(1)} \\ \bar{Z}_{ki}^{(1)} & \bar{Z}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{E}_k^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii}^{(1)} & \bar{Z}_{ik}^{(1)} \\ \bar{Z}_{ki}^{(1)} & \bar{Z}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_i^{(1)} \\ \bar{U}_k^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.40)$$

Zdroje napětí transformované do sousledné složkové soustavy vyjádřím jako zdroje proudu:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{E,i}^{(1)} \\ \bar{I}_{E,k}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii}^{(1)} & \bar{Z}_{ik}^{(1)} \\ \bar{Z}_{ki}^{(1)} & \bar{Z}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{E}_k^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.41)$$

Pro souslednou složkovou soustavu dostanu:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_i^{(1)} \\ \bar{I}_k^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{E,i}^{(1)} \\ \bar{I}_{E,k}^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ii}^{(1)} & \bar{Y}_{ik}^{(1)} \\ \bar{Y}_{ki}^{(1)} & \bar{Y}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_i^{(1)} \\ \bar{U}_k^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.42)$$

Dále převedu vstupní a výstupní proudy a napětí složkového dvojbranu přes převody ideálních transformátorů:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_x^{(1)} \\ \bar{I}_y^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{I}_{E,i}^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{I}_{E,k}^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ii}^{(1)} & \frac{\bar{n}_i^{(1)} \bar{Y}_{ik}^{(1)}}{\bar{n}_k^{(1)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(1)} \bar{Y}_{ki}^{(1)}}{\bar{n}_i^{(1)}} & \bar{Y}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.43)$$

Kde pro paralelní propojení platí  $\bar{U}_x^{(1)} = \bar{U}_x^{(2)} = \bar{U}_x^{(0)} = \bar{U}_x$  a  $\bar{U}_y^{(1)} = \bar{U}_y^{(2)} = \bar{U}_y^{(0)} = \bar{U}_y$ .

Obdobně mohu sestavit soustavu rovnic pro pasivní zpětnou a nulovou složkovou soustavu:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_x^{(2)} \\ \bar{I}_y^{(2)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ii}^{(2)} & \frac{\bar{n}_i^{(2)} \bar{Y}_{ik}^{(2)}}{\bar{n}_k^{(2)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(2)} \bar{Y}_{ki}^{(2)}}{\bar{n}_i^{(2)}} & \bar{Y}_{kk}^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.44)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_x^{(0)} \\ \bar{I}_y^{(0)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ii}^{(0)} & \frac{\bar{n}_i^{(0)} \bar{Y}_{ik}^{(0)}}{\bar{n}_k^{(0)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(0)} \bar{Y}_{ki}^{(0)}}{\bar{n}_i^{(0)}} & \bar{Y}_{kk}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ii}^{(0)} & \bar{Y}_{ik}^{(0)} \\ \bar{Y}_{ki}^{(0)} & \bar{Y}_{kk}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.45)$$

Aplikací I. KZ v uzlech A, B v náhradním schématu dostanu:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_x^{(1)} \\ \bar{I}_y^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_x^{(2)} \\ \bar{I}_y^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_x^{(0)} \\ \bar{I}_y^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2.46)$$

Dosažením za vstupní a výstupní složkové proudy formuluji soustavu rovnic výsledného dvojbranu:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{I}_{E,i}^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{I}_{E,k}^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ii} & \bar{Y}_{ik} \\ \bar{Y}_{ki} & \bar{Y}_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.47)$$

Kde prvky výsledné charakteristické admitanční matice tvoří součty prvků složkových charakteristických matic:

$$\bar{Y}_{ii} = \bar{Y}_{ii}^{(1)} + \bar{Y}_{ii}^{(2)} + \bar{Y}_{ii}^{(0)} \quad (4.2.48)$$

$$\bar{Y}_{ik} = \frac{\bar{n}_i^{(1)} \bar{Y}_{ik}^{(1)}}{\bar{n}_k^{(1)}} + \frac{\bar{n}_i^{(2)} \bar{Y}_{ik}^{(2)}}{\bar{n}_k^{(2)}} + \bar{Y}_{ik}^{(0)} \quad (4.2.49)$$

$$\bar{Y}_{ki} = \frac{\bar{n}_k^{(1)} \bar{Y}_{ki}^{(1)}}{\bar{n}_i^{(1)}} + \frac{\bar{n}_k^{(2)} \bar{Y}_{ki}^{(2)}}{\bar{n}_i^{(2)}} + \bar{Y}_{ki}^{(0)} \quad (4.2.50)$$

$$\bar{Y}_{kk} = \bar{Y}_{kk}^{(1)} + \bar{Y}_{kk}^{(2)} + \bar{Y}_{kk}^{(0)} \quad (4.2.51)$$

Výše uvedené součty prvků admitančních složkových matic jsou typické pro paralelní propojení dvojbranů.

Jelikož předpokládám nulové celkové vstupní a výstupní proudy výsledného dvojbranu  $\bar{I}_x$ ,  $\bar{I}_y$ , neznámými ze soustavy rovnic (4.2.47) jsou napětí, které získám vyřešením soustavy rovnic:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ii} & \bar{Y}_{ik} \\ \bar{Y}_{ki} & \bar{Y}_{kk} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{I}_{E_i}^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{I}_{E_k}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.52)$$

Ze znalosti  $\bar{U}_x$  a  $\bar{U}_y$  zpětným dosazením do rovnic (4.2.43), (4.2.44), (4.2.45) vypočítám  $\bar{I}_x^{(l)}$  a  $\bar{I}_y^{(l)}$ , kde  $l = 0, 1, 2$ . Fázory složkových soustav získám přepočtením přes ideální oddělovací transformátory:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_i^{(1)} \\ \bar{U}_i^{(2)} \\ \bar{U}_i^{(0)} \end{bmatrix} = \bar{U}_x \cdot \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_i^{(1)} \\ 1/\bar{n}_i^{(2)} \\ 1/\bar{n}_i^{(0)} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \bar{U}_k^{(1)} \\ \bar{U}_k^{(2)} \\ \bar{U}_k^{(0)} \end{bmatrix} = \bar{U}_y \cdot \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_k^{(1)} \\ 1/\bar{n}_k^{(2)} \\ 1/\bar{n}_k^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.2.53)$$

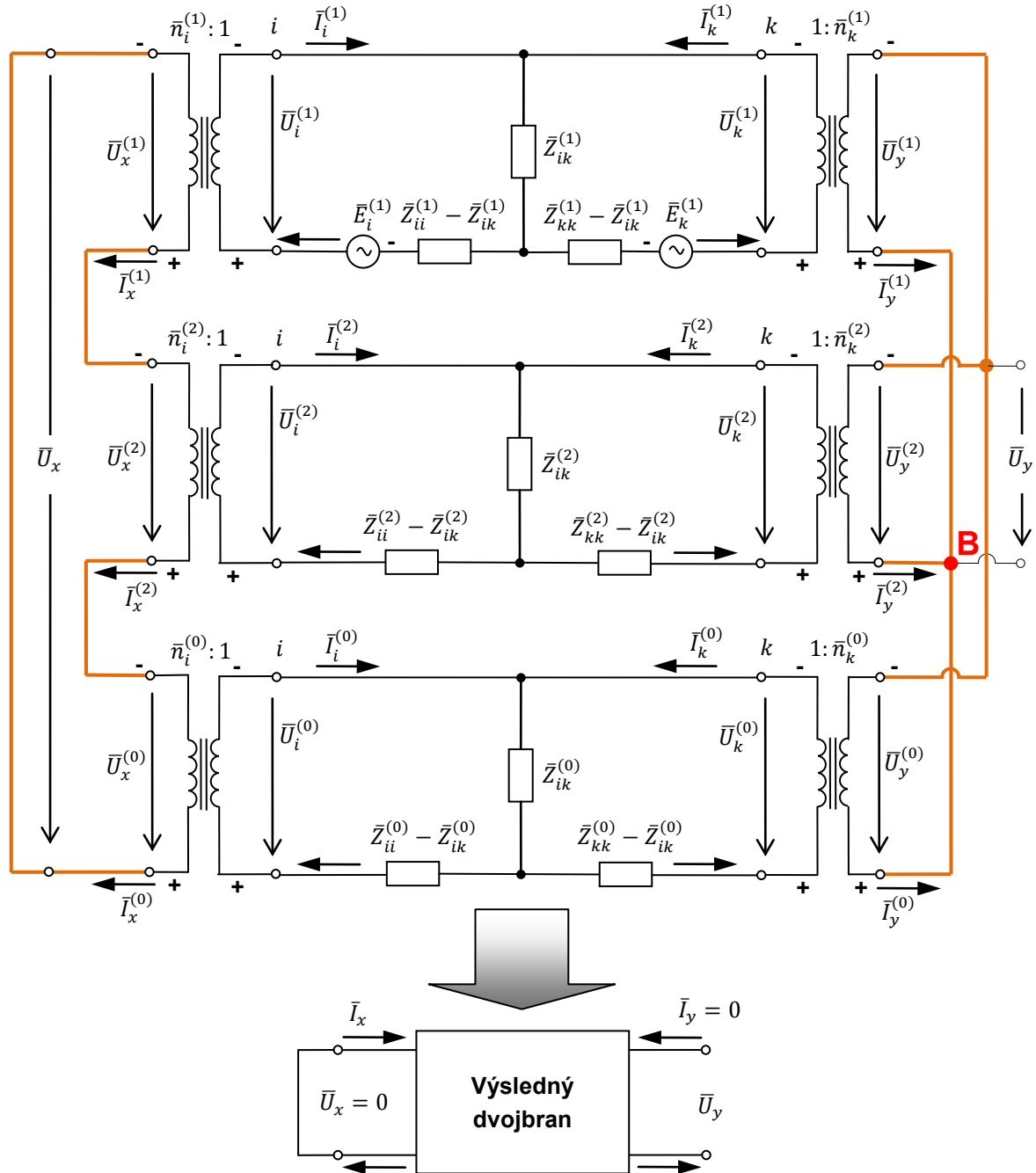
$$\begin{bmatrix} \bar{I}_i^{(1)} \\ \bar{I}_i^{(2)} \\ \bar{I}_i^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_i^{(1)} \\ 1/\bar{n}_i^{(2)} \\ 1/\bar{n}_i^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x^{(1)} \\ \bar{I}_x^{(2)} \\ \bar{I}_x^{(0)} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \bar{I}_k^{(1)} \\ \bar{I}_k^{(2)} \\ \bar{I}_k^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_k^{(1)} \\ 1/\bar{n}_k^{(2)} \\ 1/\bar{n}_k^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_y^{(1)} \\ \bar{I}_y^{(2)} \\ \bar{I}_y^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.2.54)$$

Výsledné poruchové proudy a napětí v uzlech  $i$  a  $k$  vypočítám transformací složkových soustav stejně jako v předchozí kapitole.



### 4.2.7. Simultánní poruchy s hybridní charakteristickou maticí

Kombinací poruch dvou předchozích případů dostanu sérioparalelní propojení dvojobranů, které ilustruje následující obrázek.



Obrázek 16: Náhradní schéma simultánních poruch s hybridní maticí

Stejně jako doposud úkolem je odvodit jeden výsledný dvojobran pro výpočet složkových proudů a napětí v poruchových místech. Jelikož nyní mám odlišné podmínky pro vstup a výstup dvojobranů, úloha se komplikuje, ale opět mohu využít dvě podmínky pro vstup a výstup výsledného dvojobranu. Z obrázku 16 vyplývá nulová velikost vstupního napětí (pro sériově propojené svorky složkových dvojobranů) a výstupního proudu (pro paralelně propojené svorky složkových dvojobranů).

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(1)} \\ \bar{I}_y^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(2)} \\ \bar{I}_y^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(0)} \\ \bar{I}_y^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2.55)$$

Hybridní sériově paralelní charakteristická matice dvojbranu určuje vztah vstupního napětí a výstupního proudu na vstupním proudu a výstupním napětí, a proto se hodí pro řešení kombinace simultánní jednofázové a dvoufázové zemní poruchy.

Pro dvojbran sousledné složkové soustavy platí:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_i^{(1)} \\ \bar{I}_{E.k}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{I}_{E.k}^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{H}_{ii}^{(1)} & \bar{H}_{ik}^{(1)} \\ \bar{H}_{ki}^{(1)} & \bar{H}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_i^{(1)} \\ \bar{U}_k^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.56)$$

Kde vektor reprezentující napěťový a proudový zdroj sousledné složky lze vyjádřit:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{I}_{E.k}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & \frac{\bar{Z}_{ik}^{(1)}}{\bar{Z}_{kk}^{(1)}} \\ 0 & \frac{1}{\bar{Z}_{kk}^{(1)}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{E}_k^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.57)$$

A dále prvky hybridních matic složkových soustav se vypočítají:

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{ii}^{(l)} & \bar{H}_{ik}^{(l)} \\ \bar{H}_{ki}^{(l)} & \bar{H}_{kk}^{(l)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\det \bar{Z}^{(l)}}{\bar{Z}_{kk}^{(l)}} & -\frac{\bar{Z}_{ik}^{(l)}}{\bar{Z}_{kk}^{(l)}} \\ \frac{\bar{Z}_{ki}^{(l)}}{\bar{Z}_{kk}^{(l)}} & \frac{1}{\bar{Z}_{kk}^{(l)}} \end{bmatrix} \quad (4.2.58)$$

Stejně jako v předchozích případech přepočtu aktivní veličiny přes oddělovací transformátor pro souslednou složkovou soustavu:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(1)} \\ \bar{I}_y^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{I}_{E.k}^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{H}_{ii}^{(1)} & \frac{\bar{n}_i^{(1)} \bar{H}_{ik}^{(1)}}{\bar{n}_k^{(1)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(1)} \bar{H}_{ki}^{(1)}}{\bar{n}_i^{(1)}} & \bar{H}_{kk}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.59)$$

Kde pro sériové propojení na vstupech platí:  $\bar{I}_x^{(1)} = \bar{I}_x^{(2)} = \bar{I}_x^{(0)} = \bar{I}_x$  a pro paralelní propojení na výstupech dvojbranů platí:  $\bar{U}_y^{(1)} = \bar{U}_y^{(2)} = \bar{U}_y^{(0)} = \bar{U}_y$ . Dále formuluji vztahy pro zpětnou složkovou soustavu:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(2)} \\ \bar{I}_y^{(2)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{H}_{ii}^{(2)} & \frac{\bar{n}_i^{(2)} \bar{H}_{ik}^{(2)}}{\bar{n}_k^{(2)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(2)} \bar{H}_{ki}^{(2)}}{\bar{n}_i^{(2)}} & \bar{H}_{kk}^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.60)$$

a pro nulovou složkovou soustavu:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(0)} \\ \bar{I}_y^{(0)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{H}_{ii}^{(0)} & \frac{\bar{n}_i^{(0)} \bar{H}_{ik}^{(0)}}{\bar{n}_k^{(0)}} \\ \frac{\bar{n}_k^{(0)} \bar{H}_{ki}^{(0)}}{\bar{n}_i^{(0)}} & \bar{H}_{kk}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{H}_{ii}^{(0)} & \bar{H}_{ik}^{(0)} \\ \bar{H}_{ki}^{(0)} & \bar{H}_{kk}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.61)$$

Nyní sestavím jednu soustavu rovnic pro výsledný dvojbran:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{I}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{I}_{E,k}^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{H}_{ii} & \bar{H}_{ik} \\ \bar{H}_{ki} & \bar{H}_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.2.62)$$

Po dosazení nulového vektoru mohu vyjádřit neznámé:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{ii} & \bar{H}_{ik} \\ \bar{H}_{ki} & \bar{H}_{kk} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{n}_i^{(1)} \bar{E}_i^{(1)} \\ \bar{n}_k^{(1)} \bar{I}_{E,k}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.2.63)$$

Kde prvky výsledné charakteristické hybridní matice tvoří:

$$\bar{H}_{ii} = \bar{H}_{ii}^{(1)} + \bar{H}_{ii}^{(2)} + \bar{H}_{ii}^{(0)} = -\frac{\det \bar{Z}^{(1)}}{\bar{Z}_{kk}^{(1)}} - \frac{\det \bar{Z}^{(2)}}{\bar{Z}_{kk}^{(2)}} - \frac{\det \bar{Z}^{(0)}}{\bar{Z}_{kk}^{(0)}} \quad (4.2.64)$$

$$\bar{H}_{ik} = \frac{\bar{n}_i^{(1)} \bar{H}_{ik}^{(1)}}{\bar{n}_k^{(1)}} + \frac{\bar{n}_i^{(2)} \bar{H}_{ik}^{(2)}}{\bar{n}_k^{(2)}} + \bar{H}_{ik}^{(0)} = -\frac{\bar{n}_i^{(1)}}{\bar{n}_k^{(1)}} \cdot \frac{\bar{Z}_{ik}^{(1)}}{\bar{Z}_{kk}^{(1)}} - \frac{\bar{n}_i^{(2)}}{\bar{n}_k^{(2)}} \cdot \frac{\bar{Z}_{ik}^{(2)}}{\bar{Z}_{kk}^{(2)}} - \frac{\bar{Z}_{ik}^{(0)}}{\bar{Z}_{kk}^{(0)}} \quad (4.2.65)$$

$$\bar{H}_{ki} = \frac{\bar{n}_k^{(1)} \bar{H}_{ki}^{(1)}}{\bar{n}_i^{(1)}} + \frac{\bar{n}_k^{(2)} \bar{H}_{ki}^{(2)}}{\bar{n}_i^{(2)}} + \bar{H}_{ki}^{(0)} = \frac{\bar{n}_k^{(1)}}{\bar{n}_i^{(1)}} \cdot \frac{\bar{Z}_{ki}^{(1)}}{\bar{Z}_{kk}^{(1)}} + \frac{\bar{n}_k^{(2)}}{\bar{n}_i^{(2)}} \cdot \frac{\bar{Z}_{ki}^{(2)}}{\bar{Z}_{kk}^{(2)}} + \frac{\bar{Z}_{ki}^{(0)}}{\bar{Z}_{kk}^{(0)}} \quad (4.2.66)$$

$$\bar{H}_{kk} = \bar{H}_{kk}^{(1)} + \bar{H}_{kk}^{(2)} + \bar{H}_{kk}^{(0)} = \frac{1}{\bar{Z}_{kk}^{(1)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{kk}^{(2)}} + \frac{1}{\bar{Z}_{kk}^{(0)}} \quad (4.2.67)$$

Ze znalosti  $\bar{I}_x$  a  $\bar{U}_y$  zpětným dosazením do vztahů (4.2.59), (4.2.60), (4.2.61) vypočítám  $\bar{U}_x^{(l)}$  a  $\bar{I}_y^{(l)}$ , kde  $l = 0, 1, 2$ . Fázory složkových soustav získám přepočtením přes oddělovací transformátory:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_i^{(1)} \\ \bar{I}_i^{(2)} \\ \bar{I}_i^{(0)} \end{bmatrix} = \bar{I}_x \cdot \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_i^{(1)} \\ 1/\bar{n}_i^{(2)} \\ 1/\bar{n}_i^{(0)} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \bar{U}_k^{(1)} \\ \bar{U}_k^{(2)} \\ \bar{U}_k^{(0)} \end{bmatrix} = \bar{U}_y \cdot \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_k^{(1)} \\ 1/\bar{n}_k^{(2)} \\ 1/\bar{n}_k^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.2.68)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_i^{(1)} \\ \bar{U}_i^{(2)} \\ \bar{U}_i^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_i^{(1)} \\ 1/\bar{n}_i^{(2)} \\ 1/\bar{n}_i^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_x^{(1)} \\ \bar{U}_x^{(2)} \\ \bar{U}_x^{(0)} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \bar{I}_k^{(1)} \\ \bar{I}_k^{(2)} \\ \bar{I}_k^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\bar{n}_k^{(1)} \\ 1/\bar{n}_k^{(2)} \\ 1/\bar{n}_k^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_y^{(1)} \\ \bar{I}_y^{(2)} \\ \bar{I}_y^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.2.69)$$

Opět výsledné fázory poruchových proudů a napětí v uzlech  $i$  a  $k$  dostanu transformací složkových soustav.

#### 4.2.8. Omezení metody

Pomocí výše uvedené velmi specifické metodiky mohou vypočítat poměry při dvou různých nesoumírných, současných poruchách, přičemž z principu vyplývá několik zjednodušujících předpokladů:

- Výpočet stacionárního poruchového stavu se zanedbáním transientního děje při vzniku poruchy.
- Metoda souměrných složkových soustav omezuje použití pouze pro lineární systémy.
- Řešení pro soustředěné parametry vedení nerespektuje vysokofrekvenční jevy během poruchy, které při vyšetřování ustáleného poruchového stavu zanedbávám.
- Předporuchová napětí jsou souměrná v obou uzlech s poruchou.
- V některých výpočtech je možné předpokládat rovnost předporuchového napětí v uzlu s poruchou a napájecího napětí v transformovně, tj. bez úbytku napětí na vedení. Toto lze odstranit respektováním proudu zátěže pomocí úbytku napětí na vedení, viz kapitola 5.3.6.
- Do odvození ilustrativně vstupovaly pouze podélné parametry vedení a příčné jsem vynechal z důvodu přehledného vysvětlení teorie. Avšak kapacitní susceptance vedení je zásadní při výpočtech zemních spojení. V praktických výpočtech v následujících kapitolách již budu tento parametr zohledňovat a odůvodním jeho uplatnění v náhradním schématu složkových dvojbranů.
- Metoda složkových T-článků omezuje výpočet na dva řešené vývody z transformovny, což ale nebude mít vliv na její aplikaci pro následující analýzu metody přizemnění postižené fáze.
- Není řešeno ovlivňování blízkých vedení. Pokud jsou na stejných podpěrných bodech umístěna vícenásobná vedení, mohou do výpočtů vnášet chybu jejich vzájemným ovlivňováním. V sítích 22 kV lze tuto chybu zanedbat, ale její úplné vyloučení znamená respektovat tyto vlivy v impedanční matici n-uzlové sítě.
- V teoretických odvozeních a náhradních schématech nebyly přímo zahrnuty přirozené kapacitní a odporová nesymetrie vedení, odpor poruchy a impedance uzemnění uzlu transformátoru. Tyto parametry zásadně ovlivňují velikost a případně i charakter poruchového proudu, a proto je musím dále zohlednit. V teoretických odvozeních se nic nemění, protože tyto prvky se uplatní v náhradním dvojbranu nulové složky, což vysvětlím v dalších kapitolách.

### 4.3. Aplikace teorie simultánních poruch

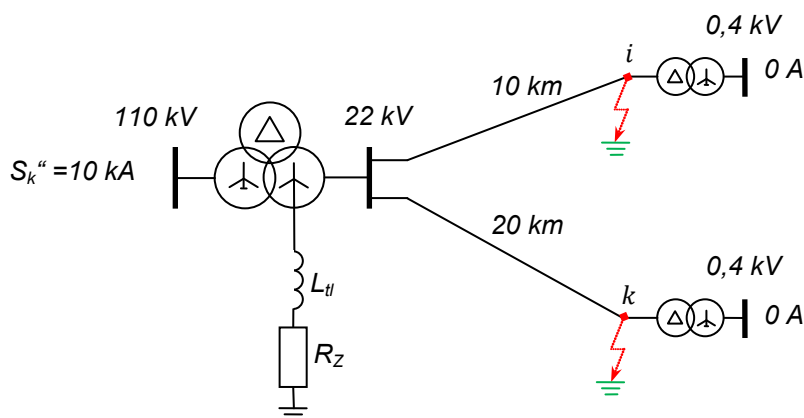
Nyní aplikuji teorii odvozenou v předchozích kapitolách pro řešení ukázkového příkladu s cílem ověřit platnost teoretických odvození a případně ji rozšířit o důležité předpoklady, které nebyly patrné v teoretické části a mohou mít významný vliv na výsledky. Výpočet provedu pro radiální síť, kde předpokládám vedení napájená z jednoho transformátoru 110/22 kV. Výpočty v komplexní rovině provedu pomocí programu *MATLAB*, ve kterém jsem zpracoval programy typu *m-file*, jež uvádím v přílohách. Poruchy stále řeším v uzlech *i* a *k*.

S ohledem na zaměření této práce se zaměřím na výpočet těchto jednofázových zemních simultánních poruch:

- Dvojnásobné zemní spojení: ZS stejné fáze v různých místech sítě.
- Dvojitě zemní spojení: ZS dvou různých fází v různých místech sítě.

#### 4.3.1. Výpočet dvou jednofázových zemních poruch sestavením T-článků

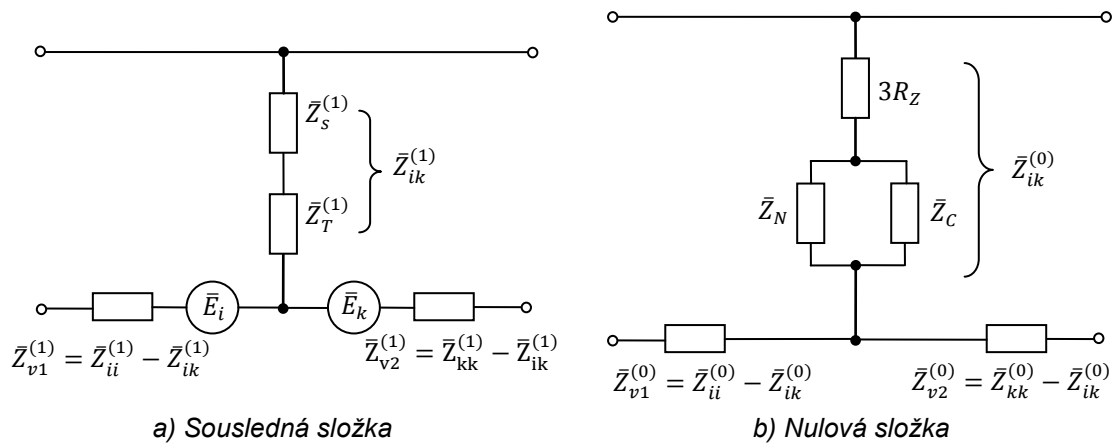
Na obrázku níže jsou schematicky znázorněné dva vývody z rozvodny 22 kV napájené z jednoho referenčního bodu transformovny 110/22 kV. Budu řešit dvě poruchy v uzlech *i* a *k*. V uzlu VN vinutí transformátoru je připojena zhašecí tlumivka a naznačen odpor uzemnění. Obě vedení předpokládám naprázdno.



Obrázek 17: Schéma sítě pro výpočet simultánních poruch

Parametry jednotlivých prvků jsem čerpal z [2] a [3] a jsou patrné z programu *m-file* v příloze č. 1.

Uspořádání dvou paprsků je výhodné, protože mohou rovnou síť nahradit dvojbranem typu T-článek a to pro všechny složkové soustavy. Odpadá tím tvorba admitanční matice sítě a její inverze na impedanční matici.



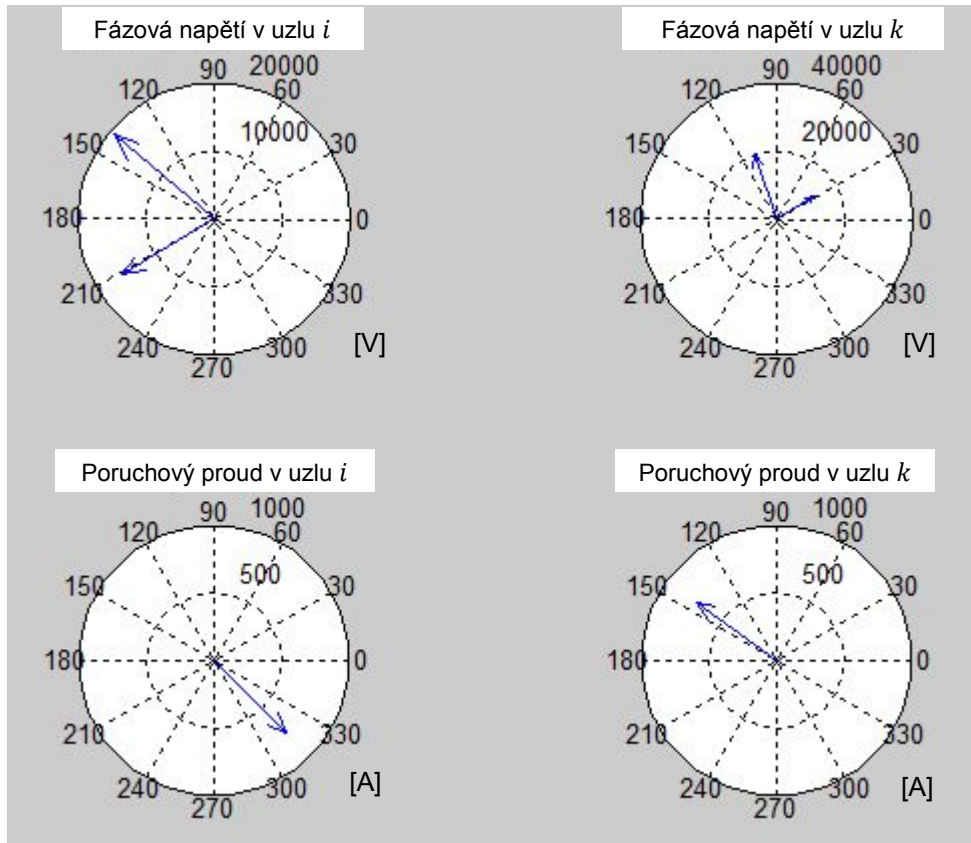
Obrázek 18: Složkové dvojbrany typu T-článek

Na obrázku 18 uvádím náhradní dvojbran sousledné složkové soustavy. Pro zpětnou složkovou soustavu předpokládám ve výpočtech tentýž, ale pasivní, tj. bez zdrojů  $\bar{E}_i$  a  $\bar{E}_k$ . Náhradní dvojbran sousledné a zpětné složky tedy obsahuje impedance nadřazené síti, transformátoru a obou vedení.

Náhradní dvojbran nulové složky respektuje nejen parametry venkovních vedení pro tuto soustavu, ale hlavně paralelní kombinaci indukčnosti zhášecí tlumivky a kapacity sítě, které v případě dokonale naladěné tlumivky tvoří paralelní rezonanční obvod. Do příčné části dvojbranu nulové složky zahrnuji dále odpor zemnicí soustavy. Vliv odporů obou poruch blíže rozebírám v kapitole 5.3.

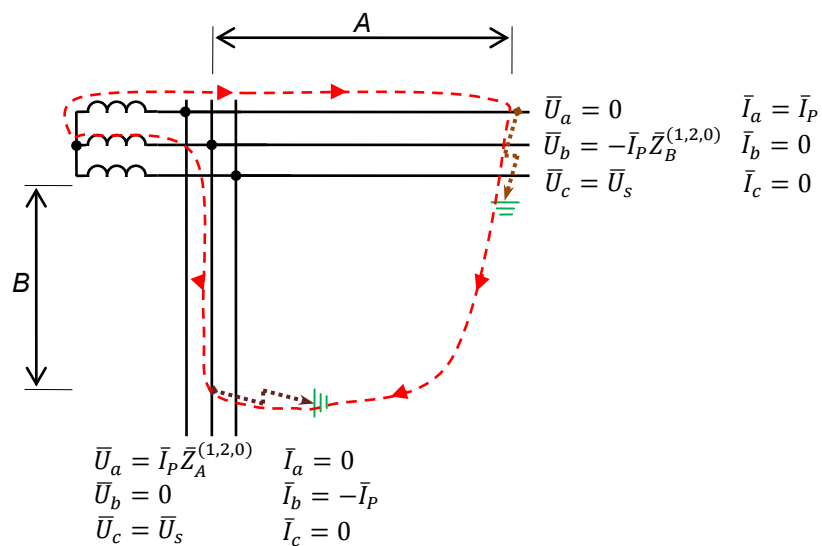
Postup řešení vyplývá z již uvedené teorie a z programu *m-file* v příloze č. 1. Výčet výsledků uvádím v příloze č. 2. Grafickou interpretaci výsledných fázorů napětí a proudů během dvojitého zemního spojení (fáze *a* spojená se zemí v uzlu *i* a fáze *b* spojená se zemí v uzlu *k*) zobrazuje obrázek 19.

Z výsledných průběhů vychází několik předpokládaných vlastností. V uzlu *i* se zemním spojením se napětí snaží dosáhnout sdružené hodnoty, ale druhé zemní spojení ve fázi *b* v uzlu *k* deformuje tato napětí a snižuje napětí na druhé postižené fázi. Protože výpočet respektuje impedance vedení a odpor uzemnění, nepokleslo napětí úplně na nulu. V uzlu *k* je napětí v postižené fázi v protifázi s napětím v uzlu *i*. Poruchové proudy v různých místech sítě jsou také opačné, což jsem pro dvoufázovou poruchu předpokládal. Typickým jevem se pro kovovou dvoufázovou poruchu potvrzuje také průchod vysokého poruchového proudu.



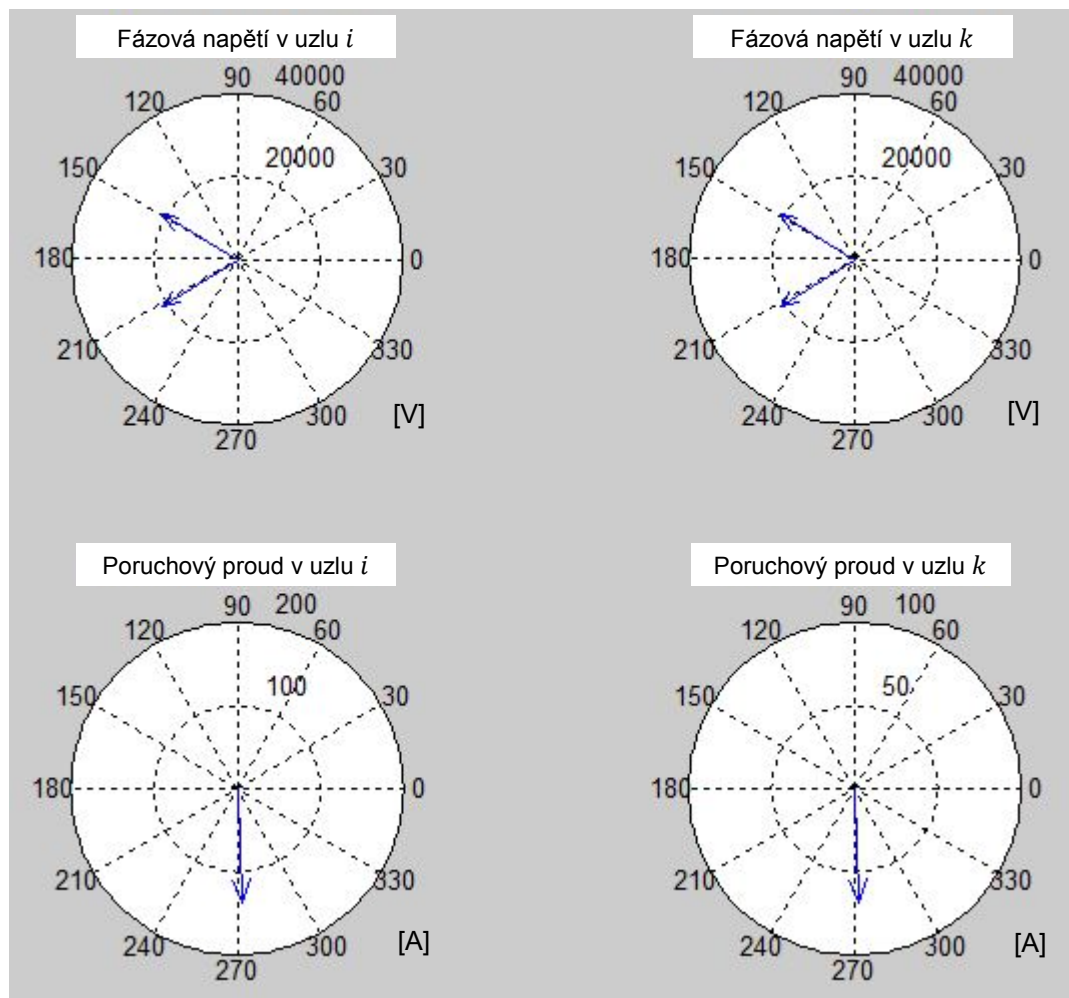
Obrázek 19: Dvojité zemní spojení

Správnost předpokládaných výsledků mohou nejlépe vysvětlit na obrázku 20, který ukazuje vstupní podmínky k odvození vztahů veličin složkových soustav v obou poruchových místech a průchod poruchového proudu. Je zřejmé, že fázové proudy musí být v protifázi. Napětí v postižené fázi má nulovou hodnotu (kovová porucha) a ve zdravé buď srušenou hodnotu proti zemi (tj. fáze nepostižená v celé síti) nebo úměrnou součinu impedance vedení v úseku vedení k druhé poruše a poruchového proudu.



Obrázek 20: Teoretická interpretace dvojitého zemního spojení

Dále jsem na stejném výpočetním modelu v příloze č. 1 změnou převodů ideálních oddělovacích transformátorů dle již uvedené teorie simuloval zemní spojení ve fázi  $a$  v obou uzlech  $i$  a  $k$  a to nejprve pro síť s izolovaným<sup>9</sup> uzlem transformátoru:



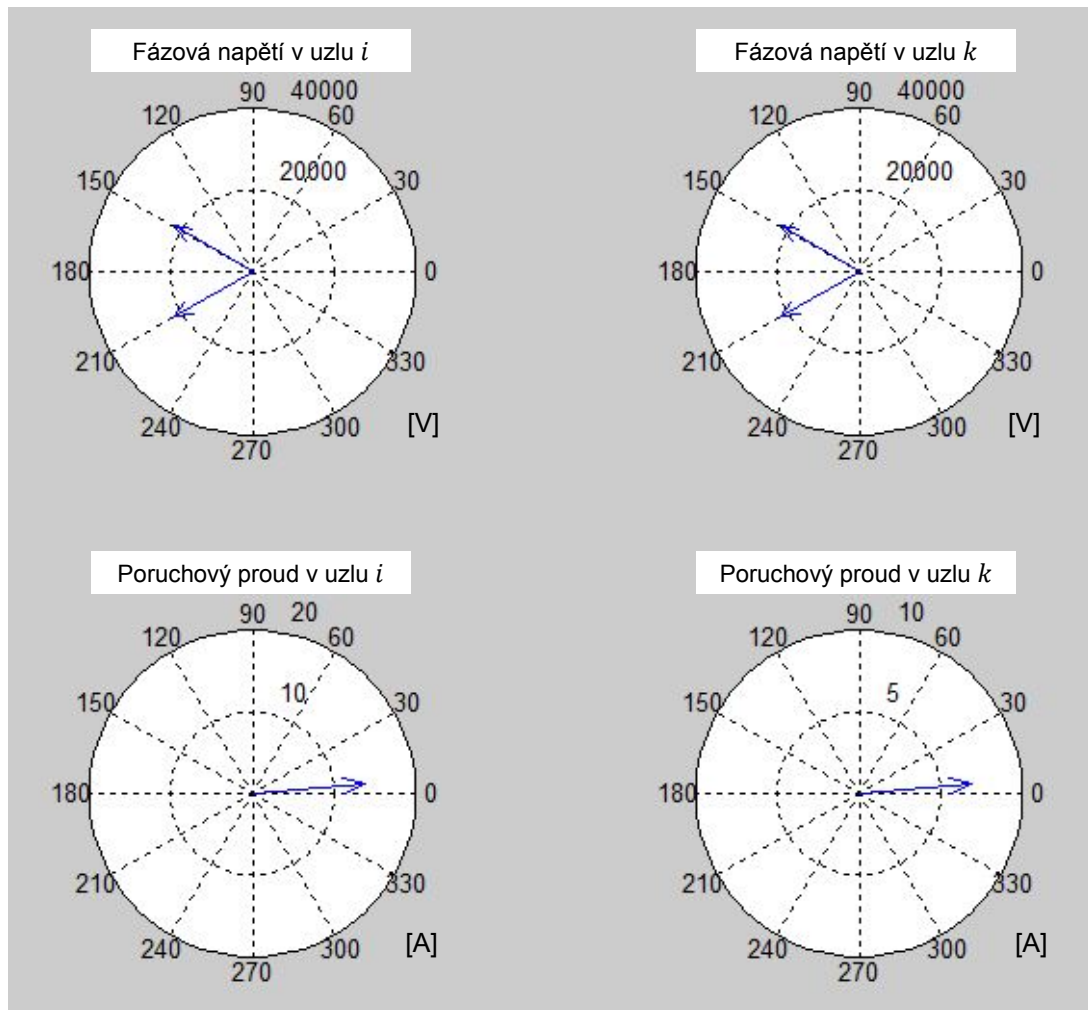
Obrázek 21: Dvojnásobné zemní spojení v síti s izolovaným uzlem

Napětí postižené fáze  $a$  je nulové v obou místech sítě. Napětí zdravých fází dosahuje sdružené hodnoty proti zemi. Poruchový proud má kapacitní charakter, protože předbíhá napětí uzlu o  $90^\circ$ . Tyto výsledky jsou v souladu s obecně známými poměry napětí a proudů během jednoduchého zemního spojení. Z kontrolního výpočtu kapacitní oblasti sítě (viz příloha č. 2) mi vyšla hodnota přibližně 230 A a dle výsledných fázových diagramů je vidět, že přibližně 140 A této hodnoty tvoří poruchový proud v uzlu  $i$  zbytek teče poruchou v uzlu  $k$ . Tedy celkový kapacitní proud se v tomto případě rozdělil mezi dvě místa poruchy v poměru  $2/3$  a  $1/3$ .

Případ dvojnásobného zemního spojení jedné fáze doplním o zhášecí tlumivku a činný odpor uzemnění, výsledné poměry ukazuje následující obrázek 22.

<sup>9</sup> Autor si je vědom, že se tento způsob provozu uzlu transformátoru v distribučních sítích v České republice nepoužívá, ale cílem tohoto výpočtu je ukázat kontrast s kompenzovanou sítí dále.





Obrázek 22: Dvojnásobné zemní spojení v kompenzované síti

Tlumivka neovlivňuje charakter ani velikost napětí během poruchy, která zůstávají na sdružené hodnotě proti zemi. Oproti tomu fázory proudů mají nyní převážně činný charakter (mírně převažuje induktivní) a jejich velikost poklesla přibližně 10x než v předchozím případě. Poměr velikostí poruchových proudů mezi dvěma místy  $2/3$  a  $1/3$  zůstal zachován.

#### 4.3.2. Verifikace modelu s normou ČSN EN 60909-3

Norma „Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 3: Proudů během dvou nesoumírných, současných jednofázových zkratů a příspěvky zkratových proudů tekoucích zemí“ je prakticky jediným platným normativním dokumentem, který se částečně dotýká simultánních poruch. I když se norma zaměřuje hlavně na vyšetření proudů tekoucích zemí při jednofázových zkratech v sítích provozovaných se zemním lanem (v České republice převážně až od napěťové hladiny 110 kV), uvádí také vztahy pro výpočet počátečních rázových jednofázových proudů během dvou nesoumírných, současných, jednofázových zemních poruch v sítích s izolovaným nebo rezonančně uzemněným uzlem transformátoru.

Výchozí vztah dvou jednofázových zemních simultánních poruch dle této normy je:

$$I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{\bar{Z}_{(1)A} + \bar{Z}_{(2)A} + \bar{Z}_{(1)B} + \bar{Z}_{(2)B} + \bar{M}_{(1)} + \bar{M}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \quad (4.3.1)$$

Kde  $\bar{Z}_{(1)A}$  a  $\bar{Z}_{(2)A}$ ,  $\bar{Z}_{(1)B}$  a  $\bar{Z}_{(2)B}$  obsahují sousledné a zpětné náhradní impedance k místům poruch A, B;  $\bar{M}_{(1)}$  a  $\bar{M}_{(2)}$  zohledňují zpětné a sousledné vzájemné impedance;  $\bar{Z}_{(0)}$  je impedance nulové složky.

Pro jednoduché případy dvou nesoumírných, současných, jednofázových poruch norma zavádí zjednodušené vztahy, které předpokládají stejnou velikost sousledné a zpětné impedance a ideálně transponované vedení, tj. bez induktivních vazeb.

a) Jeden jednostranně napájený vývod

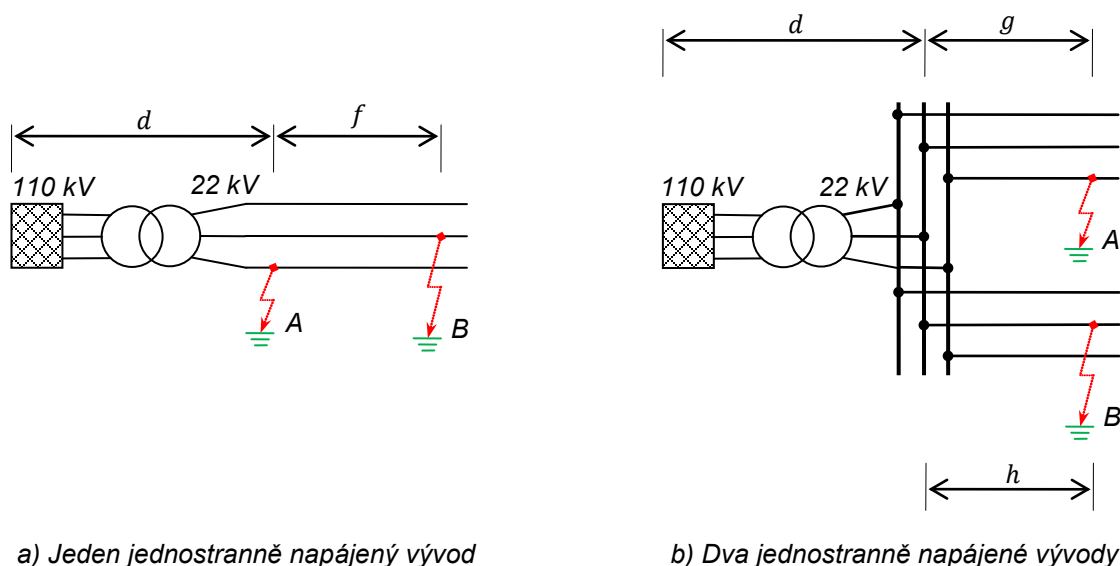
$$I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{6\bar{Z}_{(1)d} + 2\bar{Z}_{(1)f} + \bar{Z}_{(0)f}} \quad (4.3.2)$$

b) Dva jednostranně napájené vývody

$$I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{6\bar{Z}_{(1)d} + 2(\bar{Z}_{(1)g} + \bar{Z}_{(1)h}) + \bar{Z}_{(0)g} + \bar{Z}_{(0)h}} \quad (4.3.3)$$

Kde indexy  $d, f, g, h$  značí impedanci úseku okótovanou v následujícím obrázku.

Porovnáním vztahů (4.3.2) a (4.3.3) mohou usuzovat, že limitním přiblížením délky jednoho vedení k nule v situaci b) získám vztah pro simultánní poruchu na jednom jednostranně napájeném radiálním vývodu (situace a)).



Obrázek 23: Jednoduché případy dvojitých ZS dle ČSN EN 60909-3

Pozn.: Kromě uvedených radiálních vedení norma uvádí také vztah pro dvoustranně napájené jednoduché vedení, který by se použil v případě kruhově provozovaných sítí, což není (prozatím) případ řešených VN sítí.

Situace b) odpovídá příkladu v předchozí kapitole, a proto nyní výpočetně ověřím, zda se uvedený výpočet shoduje s normou. Vztahy odvozené v teorii dvojbranů použité pro řešení

předchozích příkladů nelze zobecnit na jediný vztah, který by se dal porovnat se vztahem dle normy. Z tohoto důvodu jsem provedl kontrolní výpočet, jež dokládám v přílohách 3, 4.

Z výsledků kontrolního výpočtu (příloha č. 4) vyplývá, že poruchový proud dvojitého zemního spojení 741 A vychází totožně s výpočtem z teorie dvojbranů a výpočtem dle normy. Nutno ovšem podotknout, že v teorii dvojbranů byl navíc zohledňován i výsledný odpor zemnicí soustavy  $5 \Omega$ . Na druhou stranu výsledek poruchového proudu ze vztahu dle normy ovlivňuje napěťový součinitel  $c$ , který se rovná 1,1 pro jeho maximální hodnotu. Jelikož hodnotu tohoto proudu porovnávám s ustálenou hodnotou poruchového proudu vycházející z teorie dvojbranů, zvolil jsem hodnotu napěťového součinitele 1 pro minimální hodnotu poruchového proudu v síti 22 kV. Výstupem verifikace výpočtu dvou současných, nesoumírných, jednofázových poruch metodou dvojbranů je velmi přesná shoda výsledků obou přístupů.

## 5. Analýza metody shuntování

V kapitole 1.3. byly krátce komentovány známé metody k omezení zbytkového proudu během zemního spojení za účelem provozu těchto sítí s jednofázovou zemní poruchou. Na úvod této části připomenu, že obecně se dnes takto sítě provozují pouze po dobu nezbytně nutnou k vymanipulování a nalezení místa zemního spojení. Vypnutí úseku vedení se zemním spojením ovšem zvyšuje ukazatele spolehlivosti distribuce, za které jsou provozovatelé distribučních soustav posléze finančně sankciováni. Vzhledem k ukazatelům spolehlivosti distribuce se na druhou stranu snaží provozovatelé distribučních soustav provozovat větší kapacitní celky. Motivace provozovatele distribuční soustavy provozovat kompenzovanou síť se ZS je tedy i finanční. Nelze ale pouze zlepšovat spolehlivostní ukazatele a nezhlednit přitom bezpečný provoz. Dostupné zařízení, které nabízí komplexně řešit výše uvedené problémy, je třeba důkladně analyzovat, protože zajistit bezpečný provoz distribuční soustavy musí být předním úkolem každého distributora. Zdánlivě jednoduchým zařízením se jeví automatika připojení shuntu.

Nejedná se o objevení zcela nové metody, protože shuntování je známo již řadu let a například v minulosti se používala podobná metoda úmyslného připojování rezistoru do fáze během ladění tlumivek při umělé odporové nesymetrii.

Jak již bylo v předchozích textech naznačeno, teorii simultánních poruch aplikují pro analýzu metody shuntování. V této kapitole se budu věnovat podrobnému popisu automatiky shuntu, jejími možnostmi, fyzikálním rozбором zemního spojení s připojeným shuntem v transformovně a testováním změn parametrů prvků sítě pro zjištění účinnosti této metody při různých provozních stavech. Nutno podotknout, že výchozí teorie simultánních poruch poslouží k rozboru aktivních veličin jen ve dvou místech sítě (místa s „poruchou“, tj. rozvodna 22 kV a místo skutečné poruchy). K ostatním místům v síti VN respektive také NN, která je třeba řešit ve vztahu k dotykovým napětím, se musí přistupovat samostatně na základě zjištěných poruchových proudů z následujících kapitol a odporů uzemnění rozebíraných v kapitole 2.

### 5.1. Popis automatiky shuntu a její instalace

Údaje o popisovaném zařízení v následujících podkapitolách vychází z [21] pro zařízení německého výrobce mat - Dr. Becker GmbH (dále budu uvádět pouze zkráceně „MAT“), označované pod obchodním názvem Phase earthing. V oblasti shuntování se angažuje i česká společnost EGE, spol. s r.o. se svým zařízením označovaným jako systém SGR. Porovnání obou přístupů omezení zbytkového proudu bude diskutováno dále v kapitole 5.8.

Obrázek 24 ukazuje provedení německého systému shuntování, kde vlevo jsou tři jednopólové vypínače, foto uprostřed ukazuje výkonový rezistor a vpravo soustava relé pro ovládání a blokování, AC/DC převodníky a programovatelná řídicí jednotka (RTU).



Obrázek 24: Systém mat - Dr. Becker GmbH [21]

### 5.1.1. Parametry zařízení MAT

Výhodou zařízení automatiky připojení shuntu je její jednoduchost a konstrukční nenáročnost. Je ale nutné tuto automatiku vhodně provázat se stávajícími prvky v rozvodně, a to nejen se silovými, ale také s datovými a měřicími. Prvky automatiky mohou rozdělit do třech základních částí:

#### a) Silové části:

- Pasové vodiče,  $I_{max} = 2000$  A.
- Odpojovače od přípojnice (pro více systémů přípojníc navrhuji provést pro každou přípojnicí zvlášť, aby bylo možné připojit zařízení na každou přípojnicí, pokud má stanice k dispozici pouze jednu automatiku) – odpojovače nejsou součástí dodávaného zařízení.
- Tři jednopólové vakuové vypínače, 24 kV,  $I_n = 800$  A (typ: Tavrida ISM/TEL 24-16/800 Single Phase Module).
- Průchodka do skříně rezistoru, průchodka do skříně s vypínači.
- Rezistory, celkový odpor 11,5  $\Omega$  při teplotě 20°C ( $\pm 5\%$ ).

Silové části jsou dimenzovány celkově na jmenovitý počáteční proud 70 A, maximální krátkodobý průchozí proud 2000 A, jmenovité napětí 24 kV, provozní napětí 22 kV. Izolační odolnost výrobce uvádí ve třech stupních 24/50/125 kV.

#### b) Měřicí technika:

- Měřicí transformátor proudu protékající shuntem (součást automatiky shuntu), 24 kV, 100/1 A, 15 VA.
- Detekce postižené fáze: měření  $U_f$  a  $U_o$  (vybavení el. stanice) vstupuje do AC/DC převodníků zařízení. Logika je nastavena v RTU zařízení shuntování.

#### c) Datové prvky:

- Začlenění do dispečerského řídicího systému, zařízení podporuje standard IEC 60694.
- Řídící jednotka, dálkové ovládání.
- Místní ovládání.

Rozměry celého zařízení jsou 1200x1920x1700 mm a jeho hmotnost je přibližně 350 kg.

### 5.1.2. Fyzická instalace shuntování

Systém automatiky připojování paralelního odporu se umísťuje do vnitřních prostor elektrických stanic. Ve zděných rozvodnách 22 kV je nejjednodušší umístění do volné kobky. Pokud v rozvodně není rezervní kobka, je zapotřebí hledat prostor pro její vybudování.

Není nutné, aby byl vybaven každý vývod automatikou spínáním odporu, ale postačí připojit zařízení shuntování na společnou přípojnicí. Pokud se zamýšlí instalace do rozvodny s dvojitým systémem přípojníc, kde jedna přípojnice se využívá pro síť s uzlem transformátoru provozovaným přes odpor a druhá přípojnice pro síť kompenzovanou pomocí tlumivky, postačí pro tento typ rozvodny pouze jedna automatika shuntu.

Zařízení MAT má skříňové provedení s krytím IP00. Výrobce uvádí, že pro správnou instalaci musí být rovná podlaha s maximálním zešikmením 2 mm na metr a propojení odporu se zemnicí soustavou by mělo být co nejkratší. V tuto chvíli není známa možnost instalace zařízení MAT do rozvodu se zapouzdřenými rozvaděči VN, ale vzhledem k jednoduchému konstrukčnímu řešení tohoto zařízení nepředpokládám v tomto problém. Pouze bude nutné zajistit oddělení výkonového rezistoru od VN rozvaděče a jeho samostatné bezpečné umístění.

### 5.1.3. Popis funkce a nastavení

Do převodníků (4 ks) vstupuje změřené napětí ve všech třech fázích a napětí uzlu. Převodníky mají vstupní napětí 100 V AC a výstupní 0 až 20 mA DC. V případě zemního spojení se sníží napětí na postižené fázi a napětí na fázích, které nemají poruchu, vzroste. Současně naroste napětí uzlu transformátoru proti zemi. Jednou z podmínek pro připojení rezistoru k postižené fázi je dostatečné napětí uzlu, které musí překročit hodnotu 30 % nebo 50 % z nastavitelné hodnoty napětí uzlu sítě proti zemi, tj. fázové hodnoty napětí. Pomocí přepínače lze tuto hodnotu nastavit na 30 % nebo 50 %. Pevně stanovenou podmínku k vyhodnocení postižené fáze plní pevně dána hodnota podpětí  $0,8 U_f$ .

Rekapitulace nutných podmínek pro paralelní připojení shuntu do postižené fáze:

- Jenom jedna fáze má podpětí menší než  $0,8 U_f$ .
- Napětí uzlu  $U_o$  překročí nastavenou hodnotu 30 % nebo 50 % nastavené hodnoty napětí.
- Tyto hodnoty napětí poruchy musí trvat minimálně 5 s – nastavitelná doba.

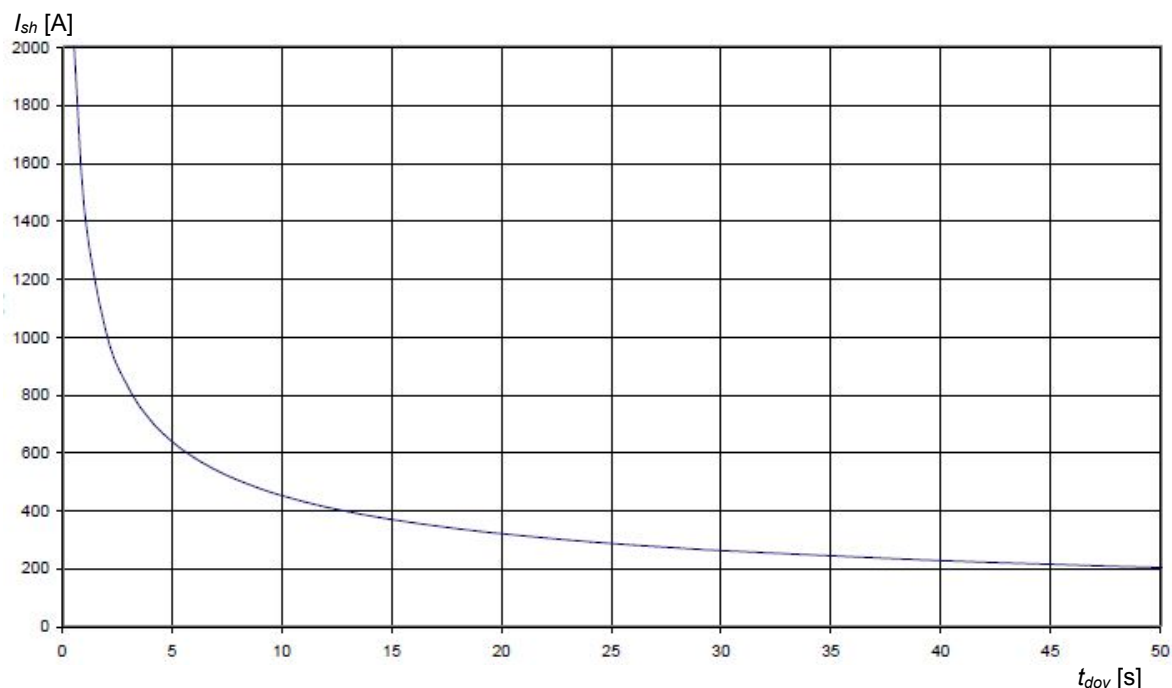
Pozn.: Správností nastavení těchto podmínek se budu zabývat v kapitolách 5.5.1. až 5.5.4.

Pokud jsou výše uvedené podmínky splněny, vypínač v postižené fázi sepne. Připojením vznikne další zemní spojení přes  $11,5 \Omega$  odpor, přičemž nejdelší doba do připojení odporu je 0,5 s. Obvodem paralelního odporu může po omezenou dobu procházet až 70 A.

Při vzniku následné poruchy v jiné fázi při aktivním shuntování, tj. dvojitě a dvojnásobně ZS (viz kapitola 5.7.1.), rezistor shuntu omezí zemní poruchový proud na maximálně 1000 A.

Aby nedošlo k destrukci zařízení tepelnými účinky procházejícího proudu, chrání odpor proti přehřátí ochrana s tepelným modelem. Ochrana působí přímo na všechny tři vypínače tak,

že v případě přetížení dostanou vypínací povel. Dovolená doba provozu systému [21] tedy závisí na procházejícím proudu:



Graf 9: Provozní charakteristika shuntování MAT [21]

Z provozní charakteristiky je zřejmý nárůst dovolené doby shuntování při snižujícím se procházejícím proudu. Výrobce v [21] také uvádí charakteristiky v delším časovém měřítku, ze kterých vyvozují, že při proudech procházejících shuntem o velikosti 70 A lze systém provozovat 1000 sekund a při cca 25 A vydrží odpor přibližně hodinový provoz.

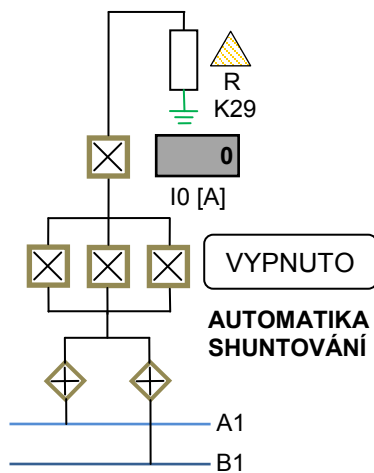
Systém shuntování je vybaven ovládacím panelem pro místní ovládání, který má v zásadě stejné funkce jako automatický provoz. Pokud jsou splněny výše uvedené podmínky, lze odpor ručně připnout. Nastavené časové zpoždění se v tomto případě nepředpokládá.

Poslední diskutovanou funkcionalitou zařízení MAT bývá doplnění o zařízení lokalizace místa zemního spojení pomocí uměle vytvořeného dvojitého zemního spojení, což blíže rozebírám v kapitole 5.6.

#### 5.1.4. Implementace do dispečerského řídicího systému

Obrázek 25 ukazuje příklad implementace automatiky do dispečerského řídicího systému rozvodny 22 kV vybavené dvojitým systémem přípojnic. Níže uvádím výčet informací, jejichž přenos se musí zajistit.

- signalizace stavu QA – vyp/zap včetně povelu
- signalizace stavu QB – vyp/zap včetně povelu
- signalizace stavu QM/L1 – vyp/zap včetně povelu
- signalizace stavu QM/L2 – vyp/zap včetně povelu
- signalizace stavu QM/L3 – vyp/zap včetně povelu



- ztráta ovládacího napětí vypínačů
- vypnutí jističe ovládacího napětí odpojovačů
- kontrola napětí
- vypnutí jističe pohonu vypínačů
- vypnutí jističe pohonu odpojovačů
- poruchy pohonu vypínače
- IRF automatiky zařízení
- IRF terminálu
- působení automatiky
- automatika zapnuta včetně povelu
- automatika vypnuta včetně povelu

Obrázek 25: Shuntování v dispečerském řídicím systému

Pro správnou funkci každé automatiky musí být zajištěny blokovací podmínky, aby nemohlo docházet k nepříznivým poruchovým stavům, nebo za účelem vyloučení nežádoucích chybných manipulací. Vzhledem k jednoduchosti provedení automatiky připínání odporu nejsou ani složité její blokovací podmínky:

- Vždy lze zapnut pouze jeden vypínač (jedna fáze).
- Musí být zajištěny všechny podmínky sepnutí.
- Zpětné hlášení vypínač zapnut automaticky zablokuje zapnutí obou dalších vypínačů.
- Když vypne ochrana je zařízení zablokováno proti novému zapnutí.
- Odblokování se musí provést kvitovacím povelu.

Je-li automatika instalována na dvojité systém přípojníc pomocí odpojovačů, nastaví se také blokovací podmínky těchto odpojovačů tak, aby nedošlo k sepnutí odpojovačů při zapnutém vypínači shuntu nebo k nežádoucímu propojení přípojníc, popř. k dalším nepovoleným manipulacím.

### 5.1.5. Investiční náklady shuntování

Celkové investiční náklady záleží na vybavenosti elektrické stanice, do které se předpokládá automatiku instalovat, případně i na vybudování nové kobky nebo rozšíření VN rozvaděče. Cena samotného zařízení MAT zahrnující skříň se silovou částí, výkonový rezistor, měření proudu, RTU a místní ovládání se pohybuje kolem 1,2 mil. Kč. Pro úplnost uvádím náklady na samotné podobné zařízení od tuzemského výrobce (blíže popsané v kapitole 5.8.) ve výši cca 1 mil. Kč.

Podstatnou část nákladů budou také tvořit náklady na zprovoznění zařízení, jeho montáž a začlenění do dispečerského řídicího systému obzvláště u pilotních projektů. Odhad celkových investičních nákladů včetně projektové dokumentace tedy činí přibližně 2,4 mil. Kč.

Pokud by se jednalo o instalaci shuntování do transformovny, která přechází z odporově uzemněného uzlu transformátoru na provoz se zhášecí tlumivkou a systémem shuntování, pouze náklady za všechna nezbytná zařízení dosáhnou 4 mil. Kč, což může mít vliv na rentabilitu investic.



### 5.1.6. Vliv shuntování na činnost dispečera

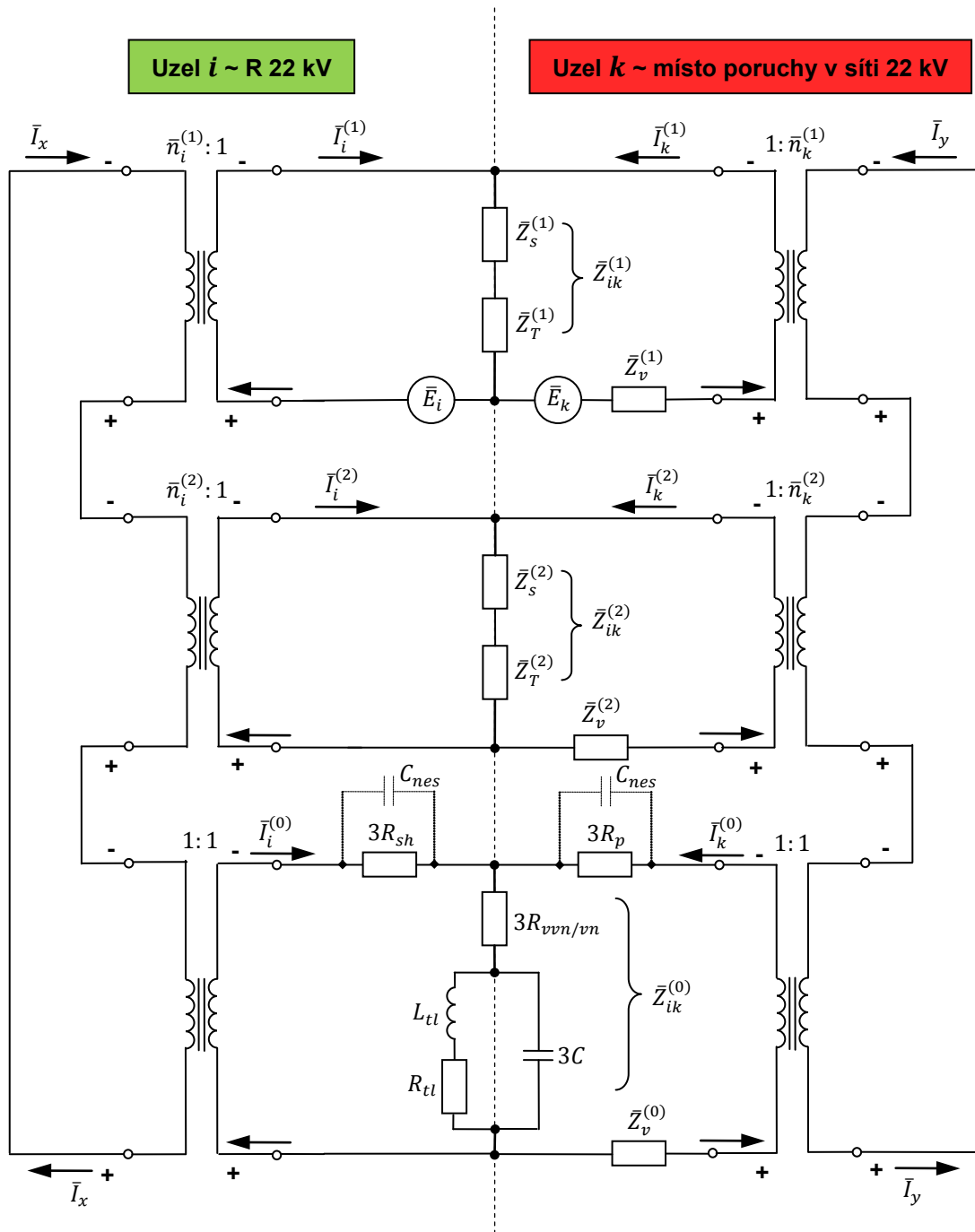
Automatiku připojení shuntu, její instalaci a funkci jsem již podrobně popsal, avšak neuvedl jsem její praktické dopady na činnost dispečera. Ten musí na toto zařízení brát ohled při lokalizaci místa poruchy klasickou metodou. Řídicí systém signalizuje zemní spojení a v zápětí dojde k připnutí sekundárního odporu k tlumivce, což uměle zvýší poruchový proud a detekuje postižený vývod. Teprve poté se aktivuje automatika připojení shuntu, podrobněji viz kapitola 5.5.4. Pokud vzniklo zemní spojení na venkovním vedení a není jiná možnost určení jeho místa, musí dispečer provádět nezbytné manipulace dálkově ovládanými úsekovými odpínači v síti VN, přičemž každou manipulaci doprovází vypnutí vypínače shuntování. V případě neúspěšné manipulace automatika opět přizemní fázi a dispečer po další manipulaci znovu vypíná. Z toho vyplývá zvýšení pracovní doby vymanipulování místa poruchy klasickou metodou, a tedy i prodloužení doby do odpojení postiženého úseku. V čistě kabelových sítích vybavených indikátory průchodu poruchového proudu ve všech spínacích a transformačních stanicích tato nevýhoda odpadá.

Nastane-li k odpojení rezistoru shuntu jeho tepelnou ochranou, opětné zapnutí je blokováno kvitovacím povelom, který lze provést pouze místně po kontrole zařízení. Při všech dalších manipulacích na postiženém vývodu již automatika nezapůsobí. Z tohoto vyplývá praktické riziko nutnosti vypnutí celého vývodu se zemním spojením, pokud provoz dané sítě se zemním spojením spoléhá na funkčnost shuntování.

## 5.2. Náhradní schéma shuntování

Teoretická odvození simultánních poruch v předchozích kapitolách nezahrnovala některé důležité parametry výrazně ovlivňující velikost poruchového proudu, např. odpor poruchy nebo odpor uzemnění (viz kapitola 4.2.8). Odpor uzemnění transformovny VVN/VN jsem již zahrnul do ověřovacího výpočtu v kapitole 4.3.1. Nyní aplikuji všechny teoretické předpoklady do jednoho náhradního schématu, které bude co nejvíce odpovídat reálnému ustálenému stavu sítě během zemního spojení se shuntem v postižené fázi. Oproti předchozím předpokladům v ověřovacím výpočtu upravím náhradní schéma pro metodu shuntování takto:

- ❖ Neexistuje první větev vedení, protože uzlem  $i$  je rozvodna 22 kV. Sousedná, zpětná a nulová impedance vedení 1 se rovná nule a do schématu není zařazena.
- ❖ Doplněn činný odpor poruchy  $R_p$  [ $\Omega$ ] – tento odpor výrazně ovlivní nulovou složku proudu v uzlu poruchy ( $k$ ).
- ❖ Doplněn činný odpor shuntu  $R_{sh}$  [ $\Omega$ ] – tento odpor výrazně ovlivní nulovou složku proudu v rozvodně 22 kV (uzel  $i$ ).
- ❖ Doplněna kapacitní nesymetrie  $C_{nes}$  [nF] – kapacitní nesymetrii zde uvádím pouze pro ilustraci, protože ovlivňuje obě místa zemního spojení stejnou měrou, a proto nemá vliv na výsledky následujících analýz shuntování. Důležitou roli však zaujme v kapitolách ověření podmínek automatického připojení shuntu.
- ❖ Doplněno uzemnění napájecí transformovny VVN/VN  $R_{vvn\_vn}$  [ $\Omega$ ] – činný odpor, který ovlivňuje nulovou složku proudu.



Obrázek 26: Náhradní schéma shuntování

Činné odpory poruchy, shuntu a uzemnění zohledňují v náhradním schématu nulové složkové soustavy třikrát. Indukčnost tlumivky tvoří s kapacitou sítě paralelní rezonanční obvod, kde činný odpor tlumivky zajišťuje činnou složku zbytkového proudu a může tedy představovat nejen rezistanci tlumivky, ale také činnou složku zbytkového proudu způsobenou svodovými odpory. Právě svodové odpory ve schématu zavedeny nejsou, důvodem je předchozí úvaha a také jejich velikost, která se udává pro sítě s kvalitními izolačními vlastnostmi 20 až 50 krát (dle [2]) větší než kapacitní reaktance vedení.

Nutno podotknout, že byla v části schématu nulové složkové soustavy zanedbána náhradní nulová impedance nadřazené sítě a dále nulová impedance transformátoru, která by se pro distribuční transformátor VVN/VN s vinutími zapojenými  $Y_n y_n$  d uplatnila.

Náhradní nulová impedance nadřazené sítě by měla být ve schématu zapojena v sérii s odporem uzemnění, jehož velikost jsem zvolil mnohem vyšší, než jsou reálné hodnoty, což komentuji dále. Takže její vynechání nezpůsobí chybu. Navíc i její velikost je velmi nízká<sup>10</sup>:

$$Z_s^{(0)} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{3}{I_{k1}''} - \frac{2}{I_{k3}''} \right) \quad (5.2.1)$$

Nulová impedance transformátoru by se uplatnila v náhradním schématu v sérii s parametry indukčnosti a činného odporu zhášecí tlumivky, tj. způsobovala by mírné rozladění rezonančního obvodu. To však v simulacích dále zohledňuji a de facto zahrnuji tuto impedanci v parametrech zhášecí tlumivky. Opět jejím vynecháním nevznikne v simulacích metodická chyba.

Propojení vstupních a výstupních svorek složkových dvojbranů z principu metody shuntování vyplývá sériové, tzn. pro dvě zemní poruchy ve shodné fázi. Předpokladem poruchy v referenční fázi  $a$  mají dle vysvětlené teorie převody ideálních transformátorů poměr 1:1. Napájení v obou místech předpokládám souměrné. Příčné složky v náhradním schématu ovlivňují napěťové a proudové poměry v obou místech poruch.

### 5.3. Simulace zemních spojení s shuntováním

Pro ověření účinnosti metody shuntování při různých provozních stavech provádím v následujících kapitolách simulace změn parametrů v navrženém fyzikálním modelu, přičemž sleduji fázory aktivních veličin. Programy *m-file* ze všech simulací dokládám příloze č. 5. V každé kapitole uvedu pouze název programu a výsledné průběhy, které okomentuji.

Síť, která byla podrobena výpočtům simultánních poruch, má tyto výchozí parametry:

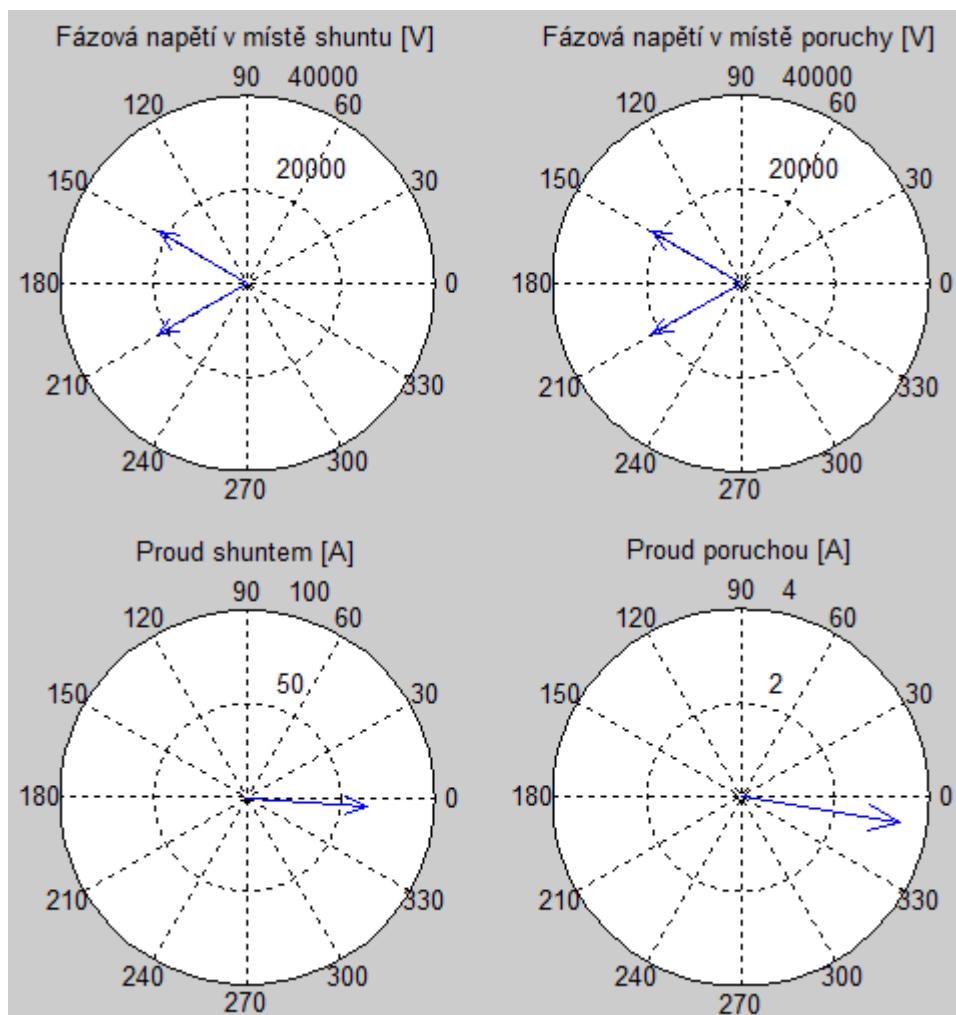
- $\bar{Z}_s^{(1)} = \bar{Z}_s^{(2)} = 0,0278 + 0,278*j$  (odpovídá  $I_{k3\ 110kV}'' = 10$  kA);
- Transformátor 110/22 kV:  $\bar{Z}_T^{(1)} = \bar{Z}_T^{(2)} = 0,138 + 2,324*j$ ;
- Vývod venkovního vedení VN s poruchou má tyto parametry:
  - $R_1 = 0,245 \Omega/\text{km}$ ;  $R_0 = 0,525 \Omega/\text{km}$ ;
  - $L_1 = 0,92$  mH/km;  $L_0 = 5,34$  mH/km;
- Zadaná velikost kapacitní oblasti sítě VN (kapacitou 3C): 670 A;
- Činný odpor uzemnění napájecí transformovny  $R_{VVNVN} = 2 \Omega$ <sup>11</sup>;
- Činný odpor shuntu dle předchozí kapitoly  $R_{sh} = 11 \Omega$ ;
- Činný odpor poruchy  $R_p = 200 \Omega$ ;

<sup>10</sup> Například pro síť se zkratovými poměry na straně VVN  $I_{k3}'' = 7$  kA a  $I_{k1}'' = 9$  kA vychází přepočtená hodnota na stranu 22 kV  $Z_s^{(0)} = 0,13 \Omega$ .

<sup>11</sup> Autor si je vědom extrémně vysoké této hodnoty, ale volí jí záměrně, neboť vysoký odpor uzemnění zhoršuje podmínky za použití metody shuntování. Reálná hodnota uzemnění transformovny bývá jednotky až desítky mΩ, což by v simulacích snížilo poruchový proud v místě zemního spojení v maximech až o přibližně 20 A. Hodnota uzemnění 2 Ω je nevyšší přípustné uzemnění trafostanice VN/NN se společným uzemněním trafostanice a PEN vodiče, kde lze očekávat největší riziko dotykových napětí za použití metody shuntování. Část analýzy vypočítané s hodnotou uzemnění 5 mΩ lze nalézt v autorově publikaci [10], viz Přehled publikací a jiných aktivit v rámci Dr. studia.

Do náhradního schématu shuntování na obrázku 26 jsem také zahrnul zášecí tlumivku (neideální s  $R_{II}$ ) tvořící paralelní rezonanční obvod s kapacitou sítě. Ve většině následujících výpočtů ji nastavuji o 2 % podladěnou.

Výchozí výpočet při těchto základních parametrech ukazují následující fázorové diagramy. Úplný zdrojový kód označuji v příloze č. 5 pod názvem funkce *Shuntovani*.



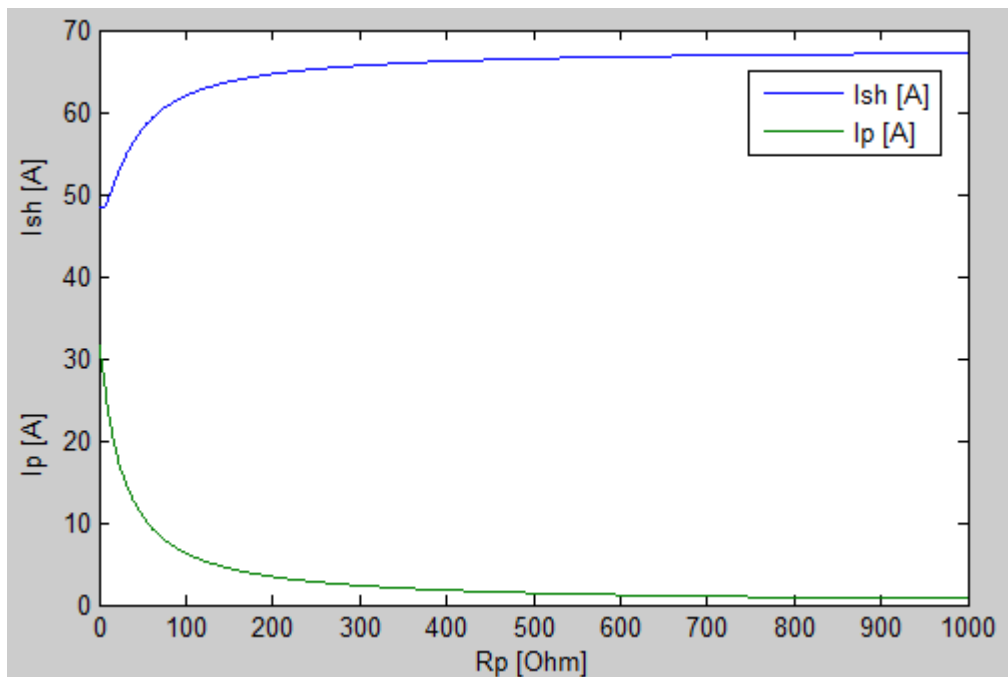
Obrázek 27: Zemní spojení s připojeným shuntem v transformovně

Výsledné fázory aktivních veličin v obou místech se zemním spojení odpovídají známým teoretickým předpokladům. Napětí zdravých fází vzrostla na sružená (proti zemi). V postižené fázi jsou napětí nulová, resp. rovna součinu poruchového proudu a odporu poruchy. Protože tato hodnota pro obě místa zemního spojení je velmi malá, ve fázorech se to v zobrazeném měřítku neprojeví. Zajímavější se ukazuje situace s poruchovými proudy. Celkový residuální proud (nevykompenzovaný tlumivkou) se pro předpokládané parametry sítě rozdělil mezi dvě místa zemního spojení tak, že v místě skutečného zemního spojení protékají pouze necelé 4 A a obvodem shuntu přibližně 65 A. Dále z fázorů proudů lze vidět efekt mírného podladění tlumivky, který se více projevuje v místě poruchy. První reprezentativní výpočet ukazuje příznivý vliv metody shuntování.

V dalších úvahách se soustředím právě na poruchový proud v obou místech zemního spojení. Parametry prvků náhradního schématu, které budu měnit oproti výše uvedeným výchozím, vždy uvedu v příslušné kapitole.

### 5.3.1. Závislost poruchových proudů na odporu poruchy

Následující obrázek ukazuje absolutní hodnotu poruchového proudu a proudu tekoucího obvodem shuntu při změně odporu poruchy od 0  $\Omega$  (kovová porucha) do 1 k $\Omega$  (např. strom ve fázi venkovního vedení). Zde vychází, že s rostoucím odporem poruchy roste účinnost metody přizemnění postižené fáze. Při kovové poruše protéká v místě zemního spojení poruchový proud cca 30 A, který se razantně snižuje s rostoucím odporem poruchy a de facto přechází do obvodu shuntu. Při odporech poruchy od 200  $\Omega$  (např. fáze na konzoli betonového sloupu) je již přizemnění postižené fáze efektivní na 90 % a v modelovaném případě protékají místem poruchy jen 4 A, viz také předchozí výpočet. Nutno podotknout, že většina zemních spojení ve venkovních sítích je odporových, protože například vodič venkovního vedení spadlý na zem představuje odpor poruchy kolem 100  $\Omega$ .



Graf 10: Absolutní hodnoty poruchových proudů při změně odporu poruchy

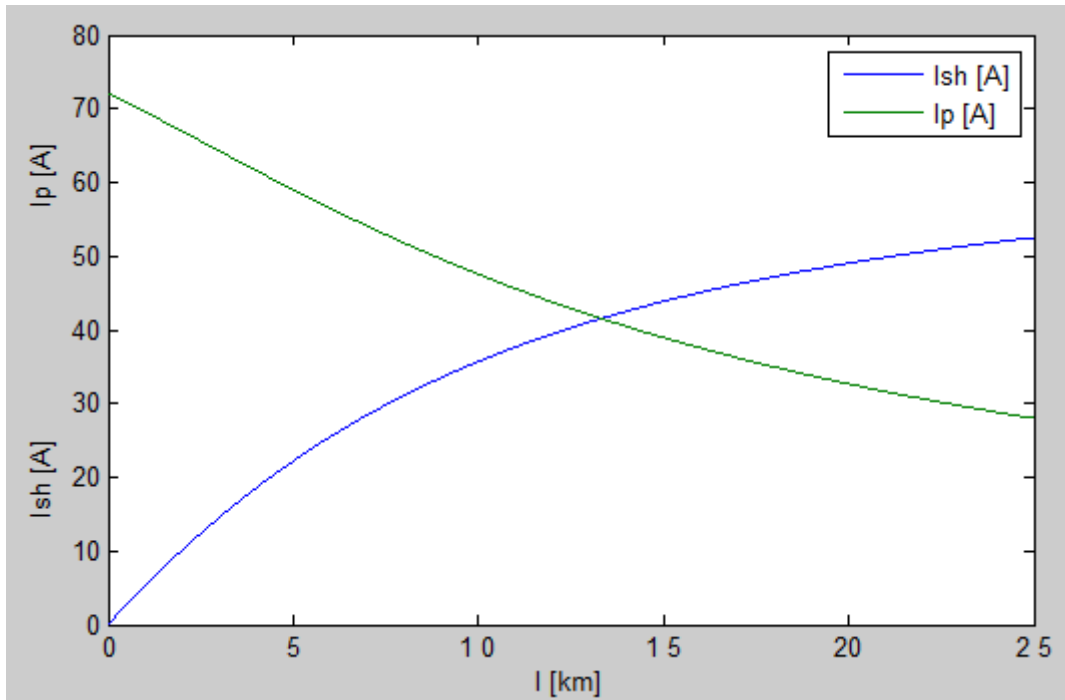
Zdrojový kód tohoto testu má v příloze č. 5 označení *Shuntovani\_Rp*.

### 5.3.2. Vzdálenost zemního spojení od transformovny

Obdobným způsobem lze vynést charakteristiky poruchových proudů v závislosti na délce vedení. Pro tento test volím kovovou poruchu jakožto nejhorší možný poruchový stav vzhledem k účinnosti metody shuntování, což vysvětluji dále.

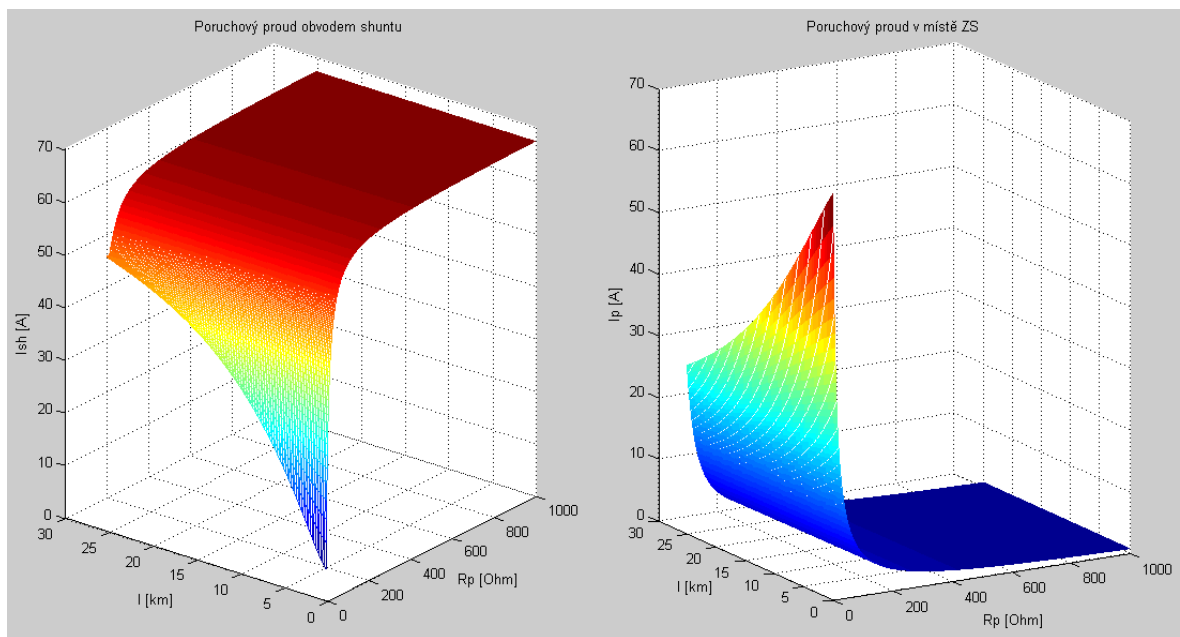
V této simulaci proud poruchou při zvyšující se její vzdálenosti od napájecí transformovny klesá a naopak proud shuntem roste. Nejvyšší proud v místě poruchy překračuje 70 A

a po 25 kilometrech klesne na necelých 30 A. Oproti tomu proud ZS v transformovně naroste z nuly na 53 A.



Graf 11: Rozdělení proudů v závislosti na vzdálenosti poruchy od napájecí transformovny I.

Musím poznamenat, že při odporu poruchy větším než 200  $\Omega$  vychází charakteristiky velikostí poruchových proudů na vzdálenosti poruchy od napájecí transformovny téměř nezávislé, viz následující 3D diagramy, které zohledňují také změnu odporu poruchy. Vlevo vynáším vždy proud protékající obvodem shuntu a vpravo poruchový proud v místě zemního spojení.



Graf 12: Rozdělení proudů v závislosti na vzdálenosti poruchy od napájecí transformovny II.

Proud obvodem shuntu na grafu 12 roste se vzdáleností poruchy od napájecí transformovny rychleji při nízkohmových poruchách než při poruše s odporem  $200\ \Omega$  a více, kde na vzdálenosti již téměř nezávisí a má maximální velikost.

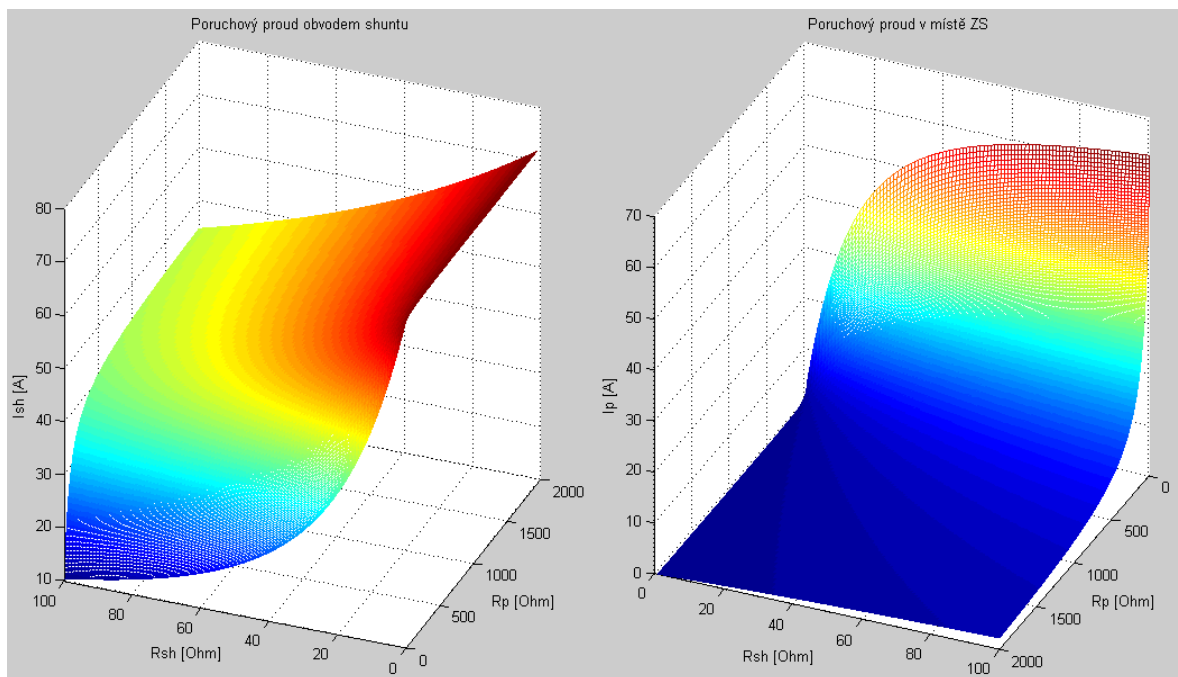
Obdobně graf vpravo upozorňuje na nižší účinnost shuntování během nízkohmových poruch v blízkosti napájecí transformovny, tj. špička diagramu, kde se dramaticky zvýší proud v místě poruchy.

Tyto simulace značím pod názvy funkcí *Shuntovani\_zmena\_I* a *Shuntovani\_zmena\_I\_Rp*.

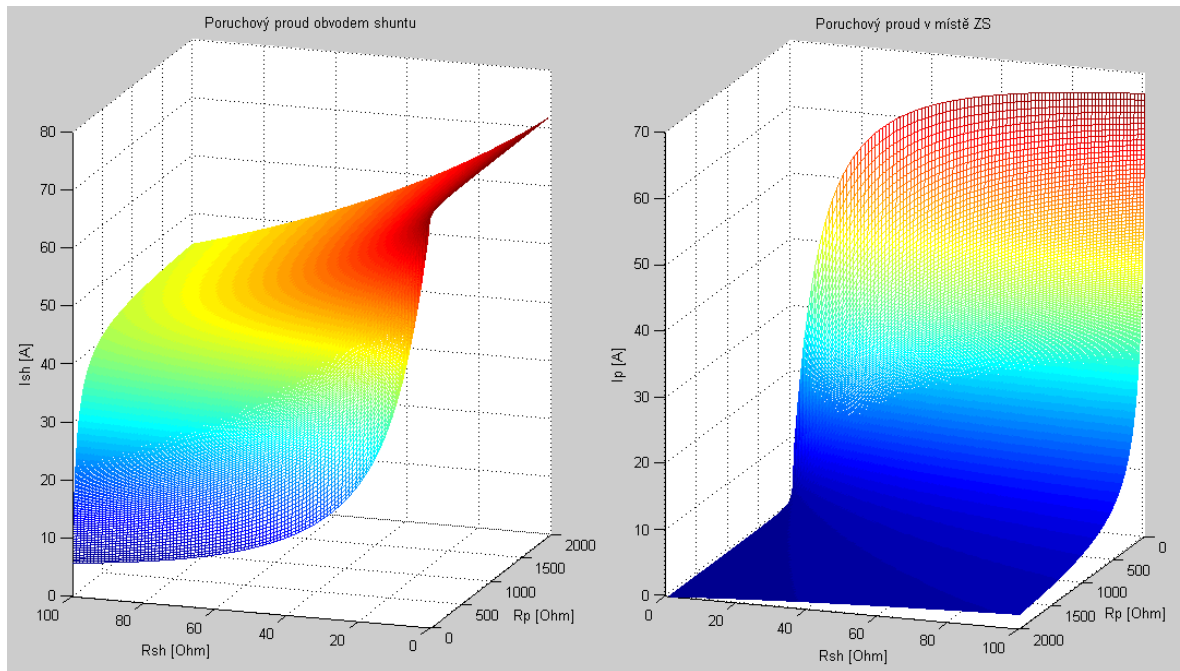
### 5.3.3. Zjištění vhodné velikosti odporu shuntu

V dosud prováděných výpočtech jsem předpokládal odpor shuntu  $11\ \Omega$ , což odpovídá zařízení, které dodává německý výrobce MAT. Nyní ověřím vhodnost této hodnoty v závislosti na odporu poruchy, který v předchozích případech výrazně ovlivňoval proudové poměry mezi místem skutečného zemního spojení a umělého zemního spojení v transformovně.

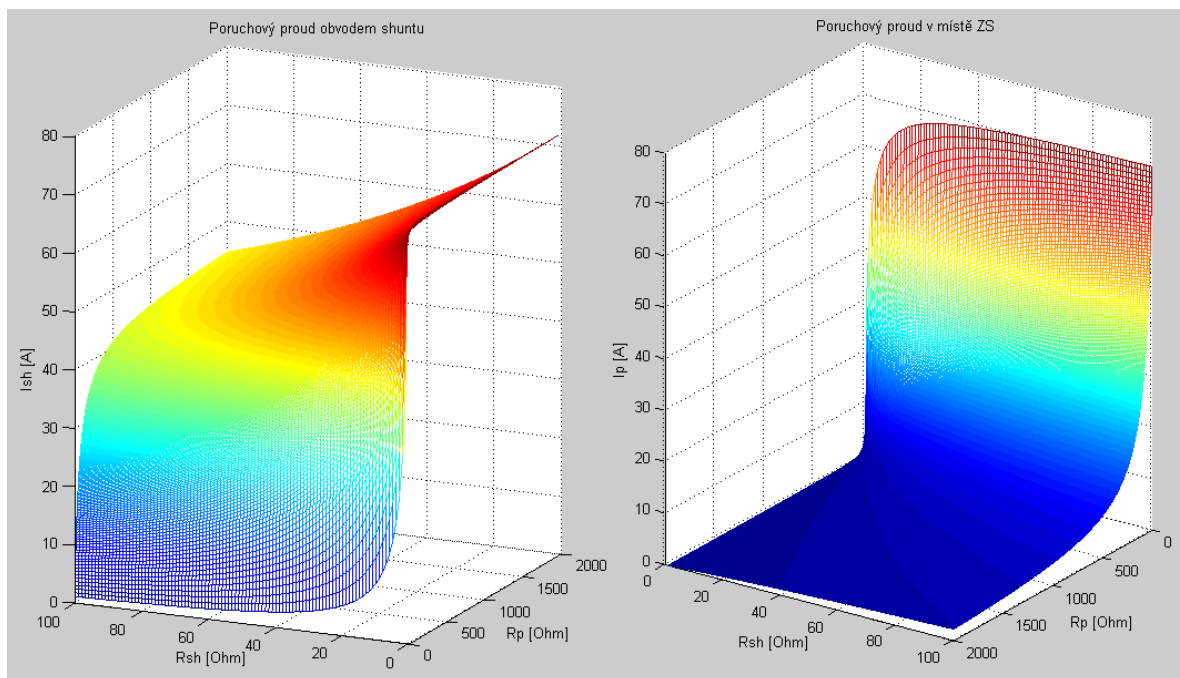
V následujících diagramech sleduji velikosti proudů poruchy a obvodem shuntu při současné změně odporu shuntu v rozmezí  $0$  až  $100\ \Omega$  a odporu poruchy v rozmezí  $0$  až  $2000\ \Omega$ . To provedu pro tři místa poruchy vzdálené  $20$ ,  $10$  a  $1$  km od napájecí transformovny. Zdrojový kód má název *Shuntovani\_Rp\_Rsh*.



Graf 13: Změna  $R_p$  a  $R_{sh}$ , vzdálenost ZS od napájecí TR 20 km



Graf 14: Změna  $R_p$  a  $R_{sh}$ , vzdálenost ZS od napájecí TR 10 km



Graf 15: Změna  $R_p$  a  $R_{sh}$ , vzdálenost ZS od napájecí TR 1 km

Průběhy proudů shuntem a zemním spojením mají opačný charakter ve smyslu dělení zbytkového proudu mezi tato dvě místa. Na všech diagramech je patrný nárůst poruchového proudu v místě zemního spojení se zvyšujícím se odporem shuntu a zároveň vlivem snížení odporu poruchy. Z těchto simulací dále usuzují, že účinnost metody přizemnění postižené fáze ovlivňují oba testované parametry a to při všech zkoumaných vzdálenostech poruchy od napájecí transformovny. Obecně nejhorším poruchovým stavem se ukazuje nulový odpor poruchy a zároveň vysoká rezistance shuntu při poruše v blízkosti napájecí transformovny. Čím blíže se vyskytuje



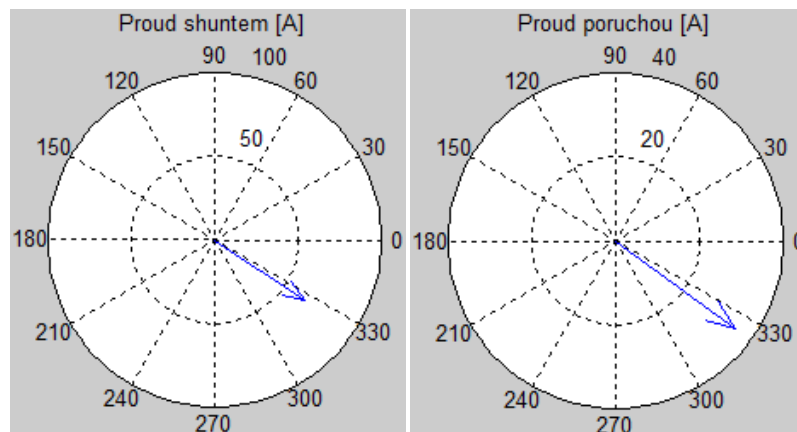
zemní spojení napájecí transformovně, tím se příznivý efekt shuntování snižuje, zejména v případě nízkohmové poruchy, což je v souladu s výsledky předchozích kapitol.

Porovnáním všech šesti diagramů mezi sebou lze konstatovat, že mají téměř stejné maximální hodnoty, do kterých ovšem graduji nejrychleji při nejmenší vzdálenosti zemního spojení od napájecí transformovny.

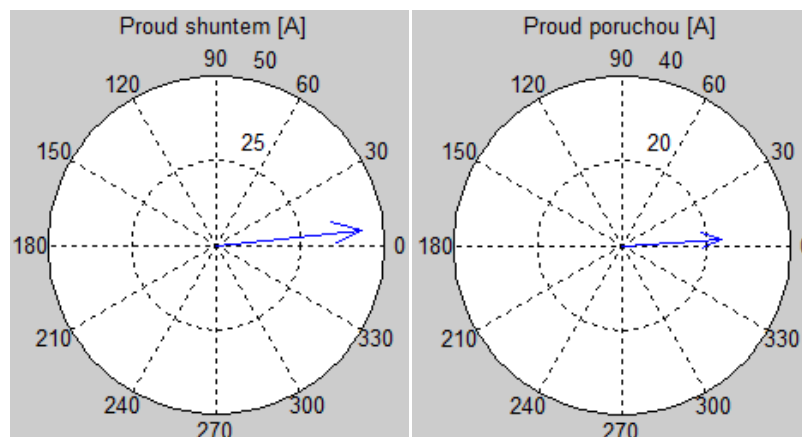
Pokud se blíže zaměřím na ideální velikost rezistoru shuntu, z grafu 13 vyplývá jeho hodnota do  $20 \Omega$ , kde pásmo poruchových proudů v místě ZS se jeví poměrně úzké i během nízkých odporů poruch. V grafu 15 však už tato hodnota nestačí a vhodnou velikostí rezistoru shuntu při kovových poruchách v blízkosti napájecí transformovny se ukazuje rezistance do  $10 \Omega$ , aby byl poruchový proud bezpečně sveden do obvodu shuntu.

### 5.3.4. Rozladění zhášecí tlumivky

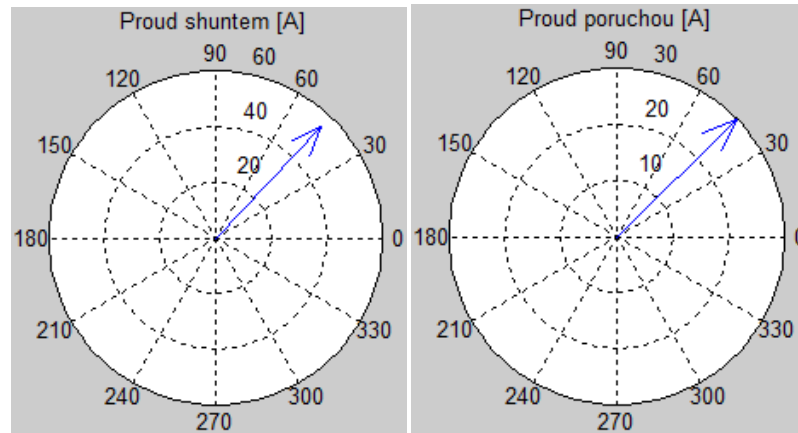
Nyní provedu pokus pro případ nízkohmové ( $20 \Omega$ ) poruchy ve vzdálenosti 1 km a rozladěnou zhášecí tlumivku. Nejprve modeluji podladění o 10 % a poté tlumivku přeladím znovu o 10 %. Sleduji fázory poruchových proudů. Rozladění 10 % odpovídá maximální přípustitelné hodnotě, která je tolerovatelná z hlediska přepětových jevů apod. Zde používám upravený program *Shuntovani* na řádku výpočtu indukčnosti zhášecí tlumivky.



a) Podladěno o 10 %



b) Vykompenzováno



c) Přeladěno o 10 %

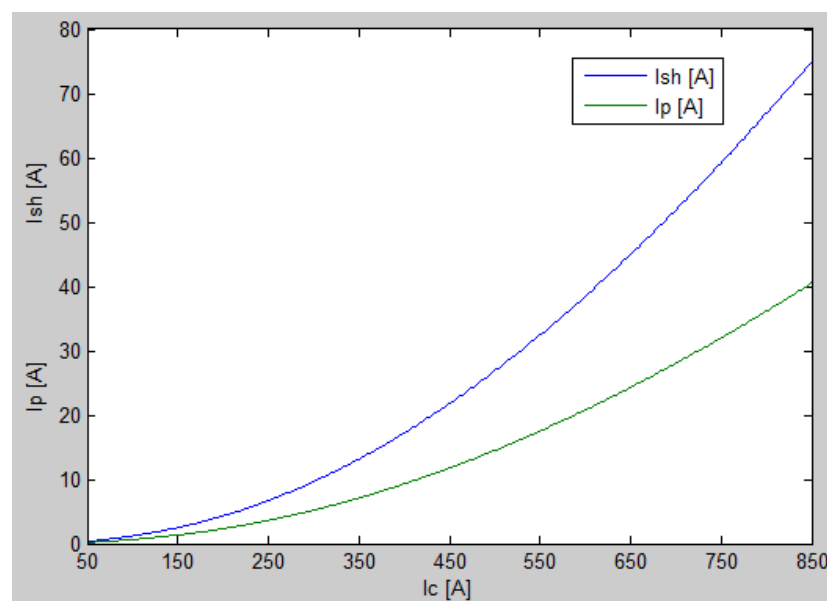
Obrázek 28: Fázory poruchových proudů podladěná, vykompenzovaná a přeladěná tlumivka

Z fázorových diagramů vyplývá, že oproti dvojnásobnému zemnímu spojení během vykompenzovaného stavu v případě podladění tlumivky fázory poruchových proudů mají kapacitní charakter a v obou místech vzrostla jejich velikost. V místě zemního spojení poruchový proud dosahuje takřka 35 A, tj. o 10 A více než ve vykompenzovaném stavu. Obvodem shuntu protéká oproti vykompenzovanému stavu o 25 A více.

Během překompenzovaného stavu mají poruchové proudy induktivní charakter a jejich velikost pochopitelně opět vzrostla, a to v místě zemního spojení o 5 A a obvodem shuntu o 15 A. Vzhledem k metodě shuntování se pak jeví efekt přeladění příznivěji než podladění.

### 5.3.5. Vliv velikosti kapacitní oblasti

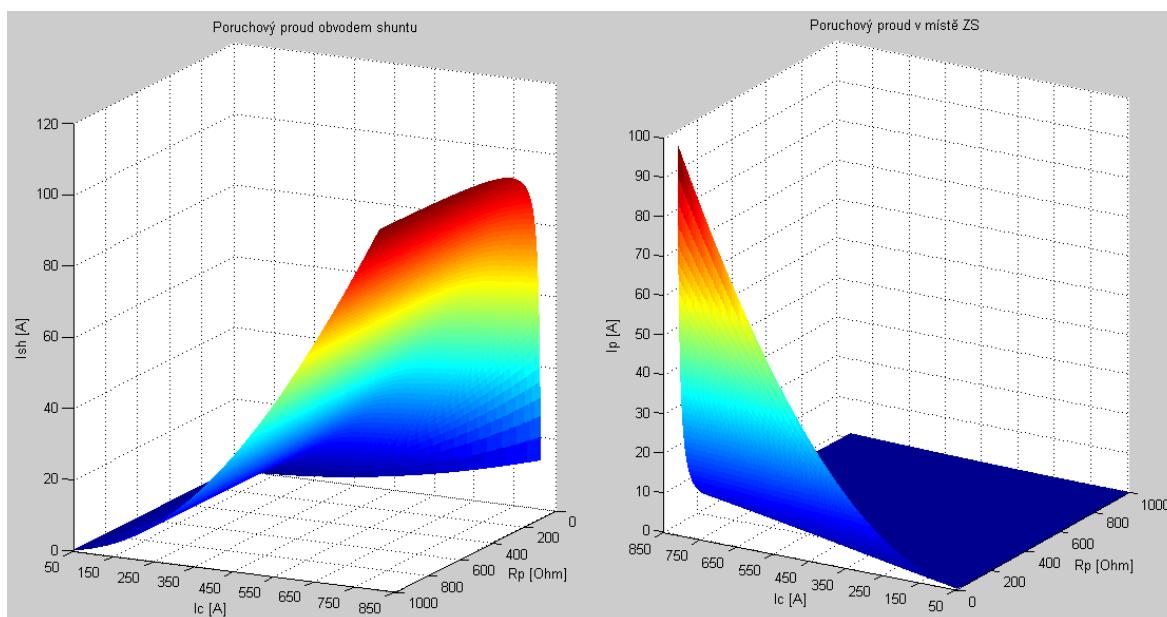
Nyní budu měnit rozsah kapacitní oblasti v rozmezí 50 až 850 A a sledovat poruchové proudy, přičemž tlumivku opět předpokládám mírně podladěnou o 2 %,  $R_p = 20 \Omega$ ,  $R_{sh} = 11 \Omega$ ,  $l = 1 \text{ km}$ . Další parametry výpočtu uvádím v příloze č. 5 s názvem funkce *Shuntovani\_C1*.



Graf 16: Závislost poruchových proudů na velikosti kapacitní oblasti

Výsledné průběhy poruchových proudů v závislosti na změně velikosti kapacitní oblasti ukazují příznivý vliv shuntování i v sítích s velmi vysokými kapacitními proudy. Se zvyšujícím se kapacitním rozsahem sítě roste proud obvodem shuntu a také proud v místě zemního spojení. Tato úměra zobrazená na grafu 16 platí ovšem při velmi malých odporech poruchy (simulace pro  $R_p = 20 \Omega$ ). Podotýkám, že i takto malý odpor poruchy a velikost kapacitní oblasti 850 A nezpůsobí v místě zemního spojení nárůst proudu nad dovolenou hodnotu 60 A.

Následující diagramy ukazují proudové poměry během změny velikosti kapacitního proudu sítě a zároveň odporu poruchy, program *Shuntovani\_C1\_Rp*.



Graf 17: Poruchové proudy při změně velikosti kapacitní oblasti a odporu poruchy

V případě nízkohmové poruchy (do  $20 \Omega$ , ale hlavně když  $R_p < R_{sh}$  a porucha je v blízkosti napájecí transformovny) poruchový proud v místě zemního spojení dosahuje vysokých hodnot. Dle výsledků simulací vychází pro tento extrémní případ v maximu téměř 100 A. Obvodem shuntu v tomto případě neprotéká téměř nic. Se zvyšujícím se odporem poruchy proud v místě zemního spojení prudce klesá a to i pro vysoký kapacitní proud sítě. Do odporu poruchy cca  $100 \Omega$  platí přímá úměra, čím menší je kapacitní proud sítě, tím při menším odporu poruchy je metoda přizemnění postižené fáze účinná. Při odporech poruch  $200 \Omega$  a více metoda shuntování výrazně sníží residuální proud v místě zemního spojení v celém simulovaném kapacitním rozsahu sítě.

### 5.3.6. Simulace zatížení na vedení s poruchou

Simulace zatížení se ve výpočtech chodu sítě počítá z úbytku napětí způsobeného průchodem proudu zátěže. Stejný princip použijí i pro simulace vlivu zatížení vedení, na kterém vznikne dvojnásobné zemní spojení. Tento výpočet však nikdy nemůže zcela přesně kopírovat realitu, protože nepředpokládá, že by proud zátěže procházel zemní cestou, ale řeší pouze zhoršení napěťových podmínek při poruše, a tedy nárůst poruchových proudů.

V následujících simulacích zadávám stejnou velikost kapacitní oblasti jako v předchozích případech (670 A). Vzdálenost zemního spojení od napájecí transformovny předpokládám 20 km a na tomto vedení za místem zemního spojení chci měnit velikost zátěže. Tu budu reprezentovat změnou napětí v místě zemního spojení, tj.  $\bar{E}_k$ . Velikost tohoto napětí a úhel mezi napětími  $\bar{E}_i$  a  $\bar{E}_k$  vypočítám postupem dle literatury [3]:

Proud zátěže na konci vedení vyjádřím takto:

$$\bar{I}_z = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} \cdot \bar{E}_k^*} \quad (5.3.1)$$

Mezi napětím na začátku a na konci vedení VN platí:

$$\bar{E}_{if} = \bar{E}_{kf} + \bar{Z} \cdot \bar{I}_z \quad (5.3.2)$$

Kde  $\bar{Z} = R + jX$  je obecně impedance vedení mezi jeho začátkem a koncem. Nyní vynásobím rovnici  $\sqrt{3}$  a napětí přejdou na sdružená. Protože potřebuji znát pro velikost a úhel napětí na konci vedení  $\bar{E}_k$ , napětí na začátku  $\bar{E}_i$  položím do reálné osy, tj.  $\bar{E}_i = E_i$ . Napětí na konci vedení pak vyjádřím v komplexním tvaru jako:  $\bar{E}_k = C + jD$ . Takže vztah mezi napětími bude mít následující podobu:

$$\bar{E}_i = C + jD + (R + jX) \cdot \frac{P - jQ}{C - jD} \quad (5.3.3)$$

Po odstranění zlomku řeším komplexní rovnici:

$$E_i \cdot (C - jD) = C^2 + D^2 + (R + jX) \cdot (P - jQ) \quad (5.3.4)$$

Rozložením na reálnou a imaginární část dostanu dvě rovnice:

$$E_i \cdot C - C^2 - D^2 - RP - XQ = 0 \quad (5.3.5)$$

$$-E_i \cdot D - XP + RQ = 0 \quad (5.3.6)$$

Z druhé rovnice lze přímo vypočítat velikost imaginární složky  $D$ :

$$D = \frac{-XP + RQ}{E_i} \quad (5.3.7)$$

Tu dosadím do kvadratické rovnice a vypočtu její kořeny. Velikost sdruženého napětí na konci vedení získám jednoduše:

$$E_k = \sqrt{C^2 + D^2} \quad (5.3.8)$$

A konečně úhel mezi napětími  $\bar{E}_i$  a  $\bar{E}_k$ :

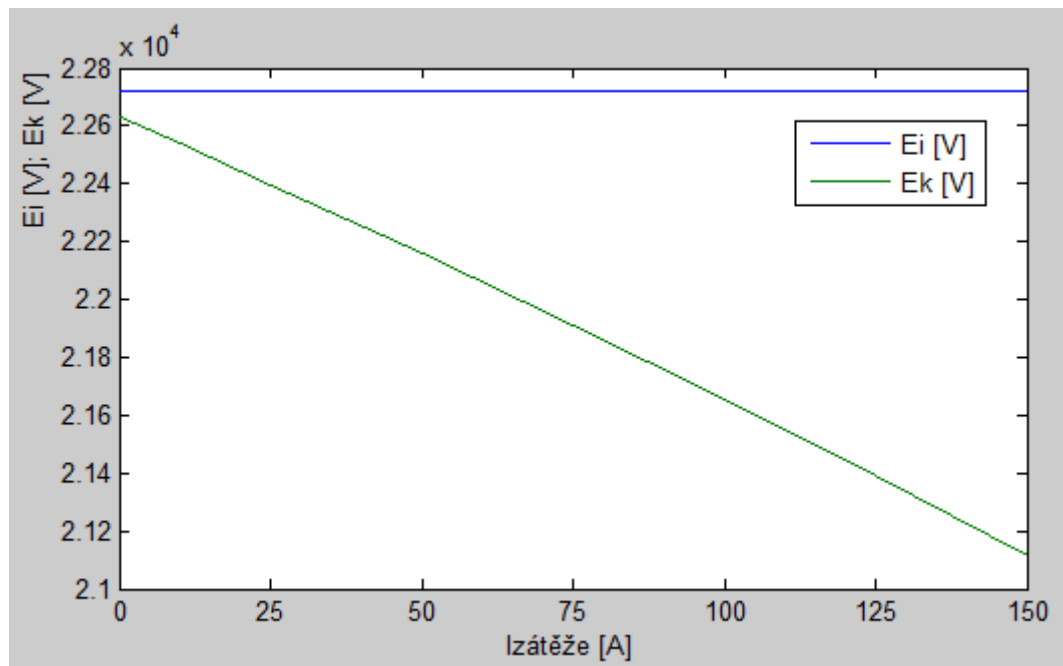
$$\tan \vartheta = \frac{D}{C} \quad (5.3.9)$$

Vypočtené výsledky jsem shrnul v následující tabulce 6. Zátěž předpokládám induktivního charakteru s účínkem  $\cos \varphi = 0,95$  a odebíraný proud v rozsahu 0 – 150 A. Napětí na začátku vedení jsem stanovil jako napětí na přípojnicí VN v napájecí transformovně s typickou velikostí  $E_i = 22,8$  kV a vzdálenost spotřeby od zdroje napájení (stejně jako vzdálenost zemního spojení) 20 km.

$I_z$ [A]	0	10	25	50	75	100	125	150
$P$ [kW]	0	362	905	1810	2715	3620	4525	5430
$Q$ [kVAr]	0	119	297	595	892	1190	1487	1784
$E_{if}$ [V]	$22\,800 / \sqrt{3}$							
$E_{kf}$ [V]	$22\,800 / \sqrt{3}$	13 101	13 006	12 843	12 675	12 501	12 321	12 135
$\vartheta$ [°]	0	-0,17	-0,42	-0,85	-1,30	-1,75	-2,22	-2,71

Tabulka 6: Vypočtená napětí na konci vedení při změně zátěže

Průběh velikostí napětí v obou řešených uzlech ukazuje následující graf:

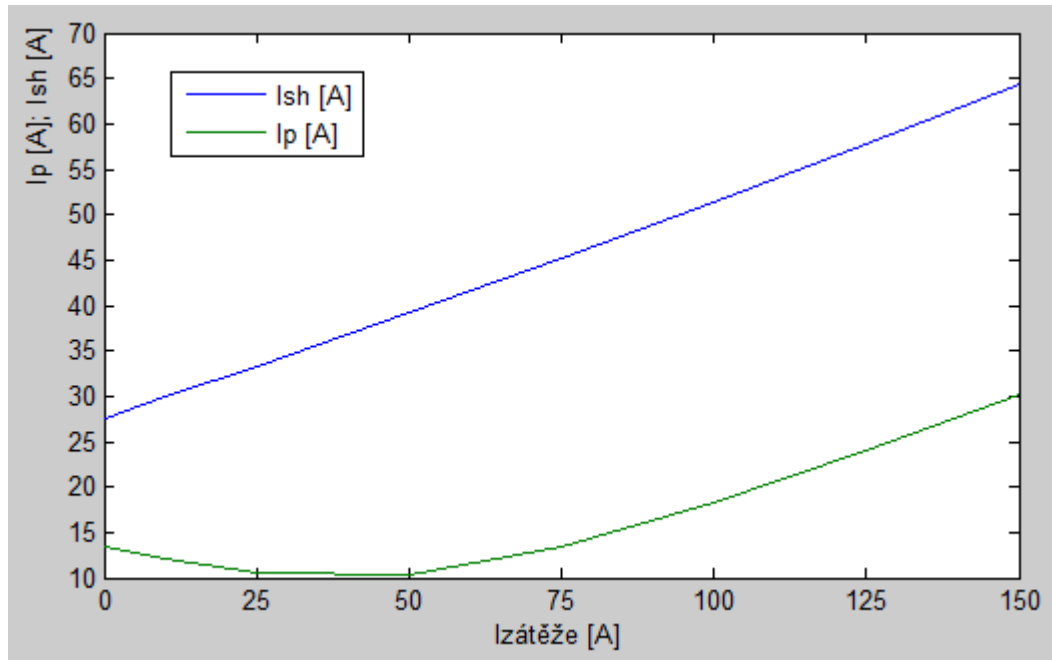


Graf 18: Velikosti napětí na začátku a na konci vedení při změně zátěže

Na první pohled je zřejmé, že napětí na přípojnici v rozvodně VN si drží stále konstantní hodnotu 22,8 kV, zajištěnou pomocí hladinového regulátoru transformátoru VVN/VN. Napětí na konci vedení se pochopitelně snižuje s rostoucí zátěží.

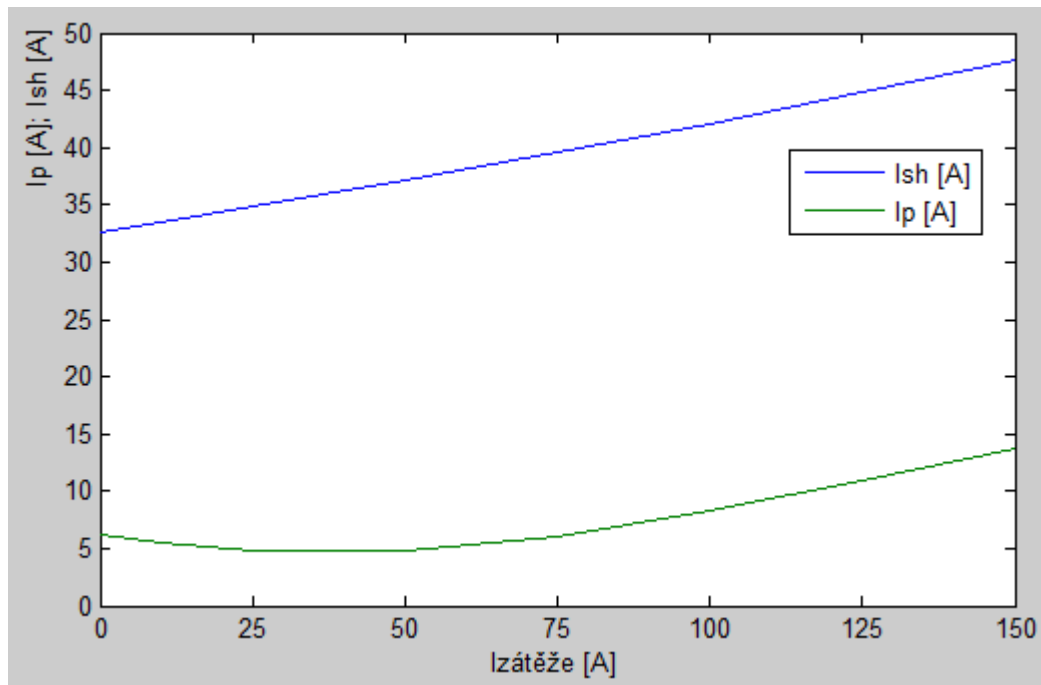
Při výpočtech zemního spojení s připojeným shuntem v transformovně bude opět do výsledků výrazně vstupovat vliv odporu poruchy, který bude ovlivňovat velikosti poruchových proudů. Z tohoto důvodu provedu tři simulace pro hodnoty odporů poruchy  $R_p = 10, 50, 100 \Omega$ , které vždy změním v programu označeném v příloze č. 5 jako *Shuntovani\_dU*.

Na první simulaci vlivu zátěže (graf 19) lze vidět, že během téměř kovového zemního spojení s odporem poruchy pouze  $R_p = 10 \Omega$  se projevuje také velká závislost obou proudů na velikosti zátěže. Zatímco proud procházející shuntem se při rostoucí zátěži stále zvyšuje, proud v místě zemního spojení mírně klesá ze stavu naprázdno až do hodnoty zátěže přibližně 2 MVA, a poté také roste se zvyšující se zátěží. Mírný pokles je způsoben poměrem mezi impedancí vedení k místu zemního spojení a činným odporem poruchy. To částečně vyplývá i z dalších grafů, kde se při rostoucím odporu poruchy tento pokles snižuje, čímž se potlačuje vliv impedance vedení k místu poruchy.



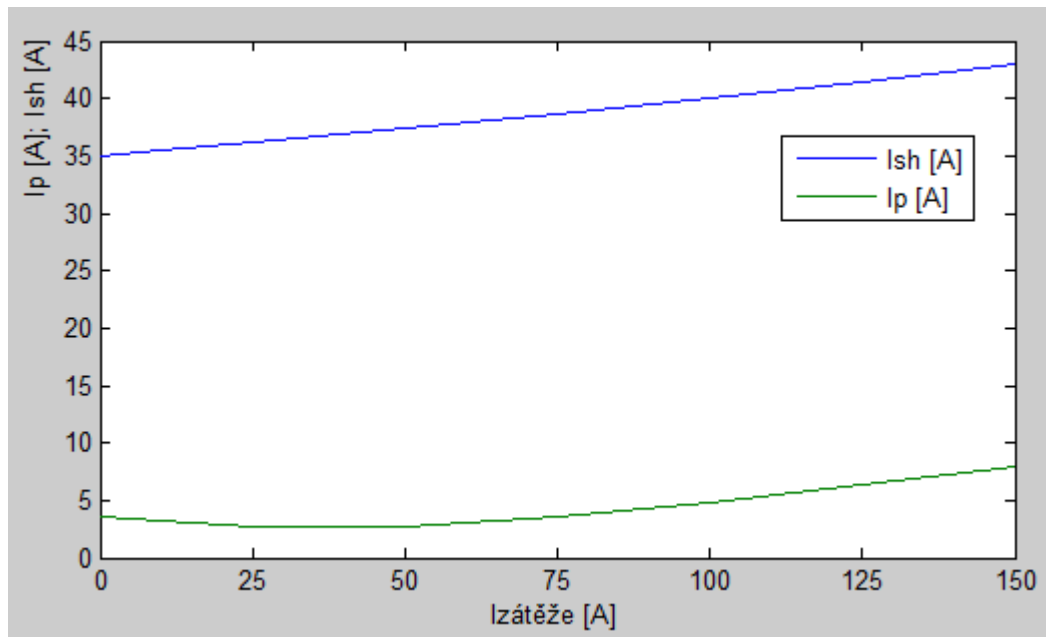
Graf 19: Závislost velikostí poruchových proudů na změně zátěže,  $R_p = 10 \Omega$

V případě odporu poruchy  $50 \Omega$  mají charakteristiky podobný průběh, ale výsledné velikosti proudů vychází v každém případě zátěže nižší. Také jejich závislost na změně zátěže poklesla, a proto jsou dosahovány menší hodnoty poruchových proudů při zvýšené zátěži na vývodu se zemním spojením.



Graf 20: Závislost velikostí poruchových proudů na změně zátěže,  $R_p = 50 \Omega$

Stále velmi nízký odpor zemního spojení  $100 \Omega$  (graf 21) způsobí, že se proud v místě zemního spojení změní se zátěží (0 – 6 MVA) jen o 5 A a obvodem shuntu vzroste pouze o 13 A.



Graf 21: Závislost velikostí poruchových proudů na změně zátěže,  $R_p = 100 \Omega$

Obecně se výrazněji změna zátěže odráží ve velikosti proudu procházejícím shuntem, než na proudu zemního spojení v jeho místě. Tato závislost se snižuje s rostoucím odporem poruchy, a tedy pro běžné zemní spojení na venkovním vedení s odporem poruchy  $200 \Omega$  a více budou poruchové proudy na velikosti zátěže téměř nezávislé. Potvrzuje se však také negativní vlastnost shuntování a to vedení větší části proudu zátěže rezistorem shuntu během nízkohmových zemních spojení.

#### 5.4. Porovnání simulací s výsledky měření

V distribuční síti E.ON Distribuce, a.s. je aktuálně nainstalována jedna automatika přizemnění postižené fáze v rozvodně R 22 kV Medlánky. Transformovna Medlánky napájí rozsáhlou část kabelové sítě města Brna a také mimoměstskou venkovní síť. Vyznačuje se tedy vysokým kapacitním proudem a rizikem provozu této sítě se zemním spojením v mimořádném provozním stavu, popsaném v kapitole 1.4., což bylo důvodem pro instalaci shuntování.

Ve spolupráci s pracovníky E.ON Česká republika, s.r.o. prováděla VUT v Brně řadu experimentálních měření uměle vyvolaných zemních spojení. Záznamy z měření jsou shrnuty v [27]. V této části porovnám výsledky svých simulací s průběhy efektivních hodnot naměřeného proudu poruchou a obvodem shuntu během experimentálních zemních spojení v mimoměstské síti obce Jinačovice, kterých jsem se účastnil v roce 2011.





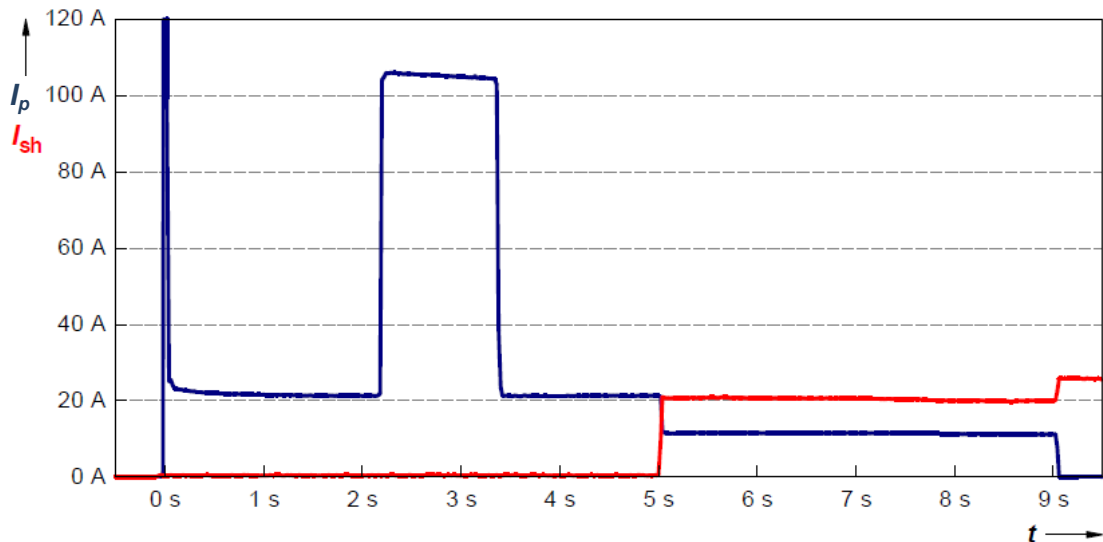
Obrázek 29: Experimentální zemní spojení s přizemněním postižené fáze, foto autor

V mimoměstské síti byla provedena řada experimentů a pro porovnání volím následující parametry testů.

#### 5.4.1. Kapacitní oblast 819 A, nízkohmové ZS

Výsledek z tohoto měření ukazuje následující graf 22. Nejprve dojde k výraznému nárůstu proudu v čase 2,2 sekundy připojením sekundárního odporníku k tlumivce, dále po 5 sekundách od vzniku zemního spojení se automaticky připne odpor shuntu, který sníží zbytkový proud v místě zemního spojení z 20 A na 10 A.





Graf 22: Průběh efektivních hodnot proudu poruchou  $I_p$  a proudu obvodem shuntu  $I_{sh}$  [27]

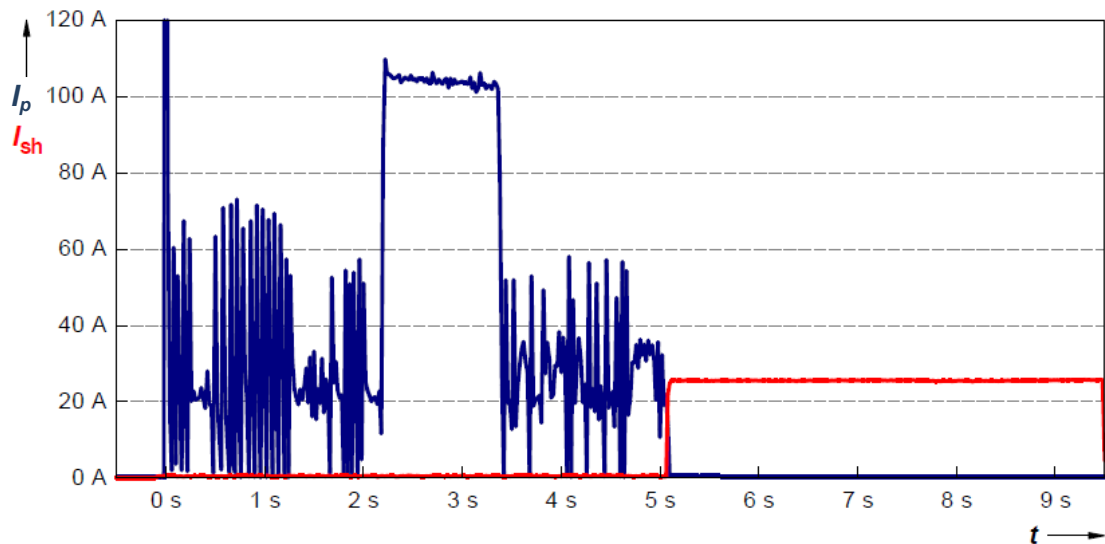
Pokud tento průběh porovnám s mým výpočtem v grafu 16, popř. 17, dostávám shodný charakter obou průběhů, tj. omezení zbytkového proudu. Velikostně se liší o 28 Ampér (simulace:  $R_p = 20 \Omega$ ,  $I_p = 39$  A; měření:  $I_p = 11$  A), což vzniklo neurčitostí odporu poruchy při experimentálním zemním spojení, diferencí mezi odporem uzemňovací soustavy nastaveným v modelu a v reálných podmínkách a v neposlední řadě rozdílnou vzdáleností poruchy od napájecí transformovny.

Chyba vzdáleností se významně projeví právě v případě nízkoohmové poruchy významná (viz kapitola 5.3.2). Ve výpočtech uvedených grafů 16 a 17 předpokládám vzdálenost zemního spojení 1 km a praktické experimenty se prováděly ve vzdálenosti přibližně 10 km (po vedení) od napájecí transformovny Medláanky. Chybu vzdáleností se pokusím vyloučit za použití grafu 11 tak, že zjistím rozdíl mezi poruchovým proudem ve vzdálenosti 1 km a 10 km, který činí 22 A (platí pro  $I_c = 670$  A, pro 819 A lze očekávat více).

Odečtením chyby vzdáleností se mezi měřením a simulací dostanu po opětovném porovnání rozdílné velikosti proudů už jen v řádech jednotek Ampér. I při výčtu všech nepřesností konstatuji uspokojivou shodu simulace s reálným měřením.

#### 5.4.2. Kapacitní oblast 819 A, obloukové ZS

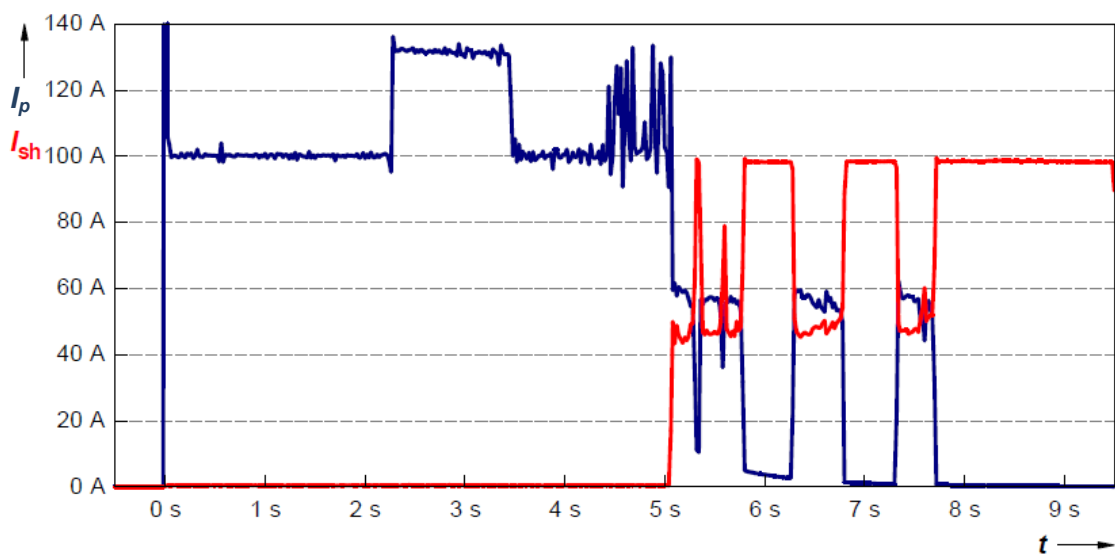
Ve stejné síti jako v předchozím případě byla zkoušena oblouková porucha, kde oblouk vznikl na poškozeném kabelu. Výsledky z tohoto experimentu nejdou přesněji porovnat s provedenými simulacemi, protože odpor oblouku není znám, nicméně charakter proudů opět potvrzuje teoretické závěry. Důležitým ověřením teoretických výpočtů je také oboustranná shoda, že během odporových zemních spojení roste účinnost přizemnění postižené fáze. To potvrzují průběhy efektivních hodnot proudů na následujícím obrázku, který ukazuje v tomto případě pokles proudu v místě poruchy na nulu, čímž samozřejmě dojde k uhašení oblouku.



Graf 23: Průběh efektivních hodnot proudu poruchou  $I_p$  a proudu obvodem shuntu  $I_{sh}$  [27]

### 5.4.3. Kapacitní oblast 819 A, obloukové ZS, rozladěná tlumivka

Test při významně podladěné tlumivce (o 10 %) a obloukovém zemním spojení sice nelze velikostně porovnat s výsledky teoretických analýz, nicméně uvádím ho do obsahu této práce kvůli jeho průběhu.



Graf 24: Průběh efektivních hodnot proudu poruchou  $I_p$  a proudu obvodem shuntu  $I_{sh}$  [27]

Opět v čase 5 sekund se připojí rezistor shuntu, ale kvůli vysoké energii elektrického oblouku není téměř okamžitě uhašen jako v předchozím případě a dochází k jeho znovuzápalům. Právě tyto průběhy v čase 5 až 8 sekund ukazují „inverzní“<sup>12</sup> průběh proudů místem zemního spojení a obvodem shuntu, což potvrzuje správnost obdobných charakteristik v kapitolách 5.3., například grafy 10 až 15.

<sup>12</sup> Myšleno opačný charakter nikoliv v matematickém významu inverzní funkce.

## 5.5. Ověření podmínek automatického připojení shuntu

V kapitole 5.1.3. popisují funkci automatiky připojení odporu shuntu. K automatickému sepnutí vypínače a připojení rezistoru dojde po splnění všech nastavených podmínek. Nyní se zaměřím, zda jsou tyto podmínky dostatečné a zda by mohlo dojít za určitých předpokladů k chybnému vyhodnocení a připojení odporu shuntu například do nepostižené fáze. Protože automatika připojí odpor přímo k přípojnici, není třeba se zabývat detekcí porušeného vývodu. Samotná detekce vzniku zemního spojení zaujímá samostatnou kapitolu mimo rámec této práce, a proto budu při dalších úvahách předpokládat, že zemní směrové ochrany vyhodnotí vznik zemního spojení wattmetrickou metodou spolehlivě. Popis jejich správného nastavení lze nalézt například v [25]. Samotná automatika připojení shuntu MAT pracuje autonomně bez návaznosti na činnost zemních ochranných nebo regulátorů tlumivky.

### 5.5.1. Podmínka podpětí postižené fáze

Na všech fázích se měří napětí a postižená fáze je vyhodnocena ta, která má podpětí minimálně 80 % fázového napětí, přičemž jen jedna fáze musí splnit tuto podmínku. Během ideálního (učebnicového) zemního spojení má postižená fáze napětí nulové a napětí na zdravých fázích vzroste na sdruženou hodnotu proti zemi. Ovšem s odporem poruchy se známý fázový diagram zemního spojení mění a na postižené fázi vzniká napětí úměrné součinu poruchového proudu a odporu poruchy<sup>13</sup>. Impedance vedení k místu poruchy se zanedbávají, což je opodstatněné, protože pokud bych je zohledňoval, musel bych odečítat úbytek napětí na vodiči způsobený průchodem poruchového proudu (popř. i proudu zátěže), a tedy předpokládat závislost vzdálenosti zemního spojení od napájecí transformovny. Jelikož zemní spojení může vzniknout kdekoli v síti VN, není vhodné toto zahrnovat do ověřování správnosti podmínek automatického připojení odporu shuntu.

Výchozí vztah pro výpočet poruchového proudu v kompenzované síti VN:

$$I_{por} = U_f \frac{\frac{1}{R_p} + j\omega C_{nes}}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{tl}} + \frac{3}{R_C} + j \cdot \left(3\omega C + \omega C_{nes} - \frac{1}{\omega L_{tl}}\right)} \cdot \left[\frac{1}{R_{tl}} + \frac{3}{R_C} + j \cdot \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L_{tl}}\right)\right] \quad (5.5.1)$$

První část vztahu (fázovým napětím vynásobený zlomek) určuje napětí uzlu transformátoru proti zemi. Vynásobením tohoto napětí příslušnou admitancí získám poruchový proud. Ze vztahu je zřejmé, že velikost poruchového proudu výrazně závisí kromě odporu poruchy také na vyladěnosti tlumivky a dále na kapacitní nesymetrii sítě. Svod sítě a činný odpor tlumivky se mění dle rozsahu napájené VN sítě.

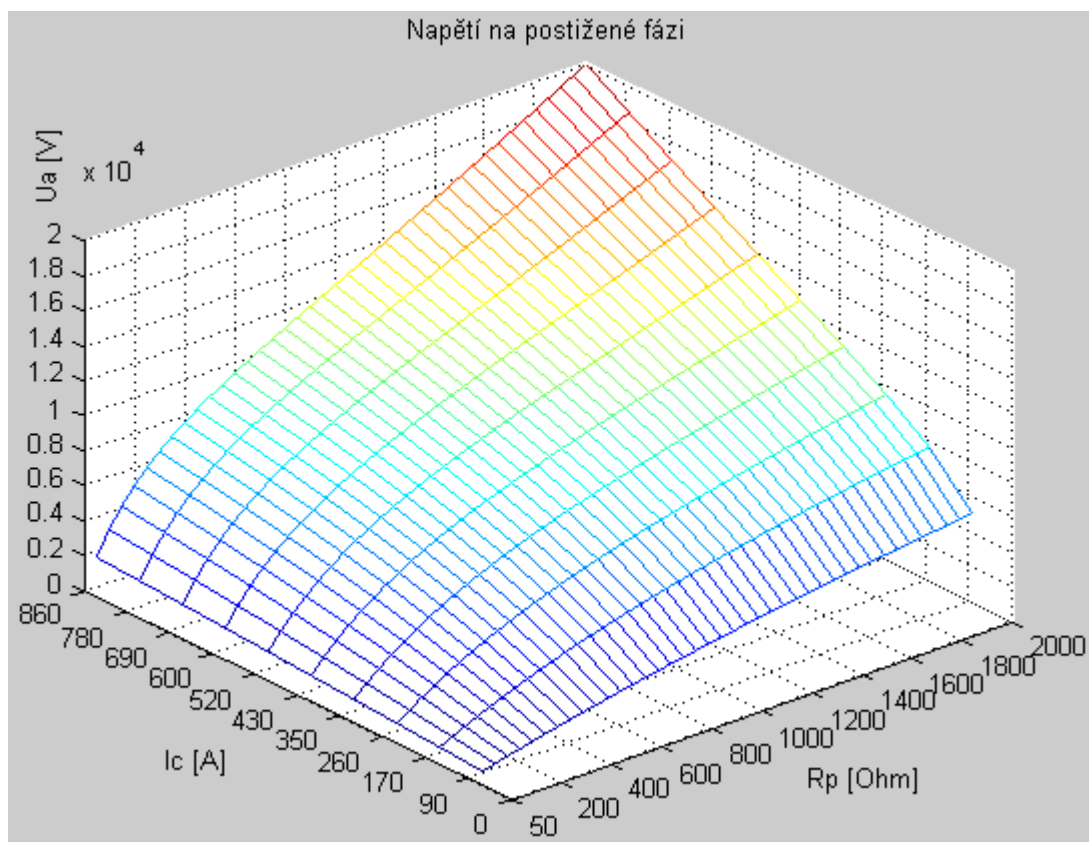
Z teoretických výpočtů kapacit jednotlivých fází proti zemi je známo, že kapacitní nesymetrie se nejvíce projeví v prostřední fázi na konzoli venkovního vedení VN s rovinným uspořádáním vodičů, výrazně méně pak při použití konzol typu delta nebo pařát. Běžný rozdíl kapacit proti zemi mezi prostřední a krajními fázemi, které mají kapacitu shodnou, činí u rovinné konzole 0,6 nF/km

<sup>13</sup> Tj. jeden z předpokladů pro odvození vztahů pomocí souměrných složkových soustav, kde se pro jednofázové zemní poruchy předpokládá napětí na postižené fázi rovno součinu impedance poruchy a poruchového proudu a dále proudy v ostatních fázích rovny nule.

a v případě uspořádání do trojúhelníka (tj. obecně typy konzol delta i pařát) přibližně 0,15 nF/km. Výraznější nesymetrie však nastane také během některých zemních spojení, například přetržený vodič spadlý na zem.

Pokud použiji výše uvedený vztah pro výpočet poruchového proudu a zároveň budu měnit odpor poruchy a velikost kapacitní oblasti za stálého předpokladu tlumivky podladěné o 2 %, získám diagram, ze kterého mohu usoudit velikosti napětí v postižené fázi. Zdrojový kód uvádím v příloze č. 5 pod názvem funkce *Napeti\_Rp\_C*. Kapacitní nesymetrii zvolím pro síť s výraznou kapacitní nesymetrií, tj. 1 %.

Nutno podotknout, že kapacitní nesymetrie v těchto výpočtech z principu náhradního schématu složkových soustav a z toho odvozeného vztahu (5.5.1) vyjadřuje kapacitní nesymetrii v postižené fázi, což je nutnou zjednodušující podmínkou.



Graf 25: Velikost napětí na postižené fázi při změně  $R_p$  a  $I_c$

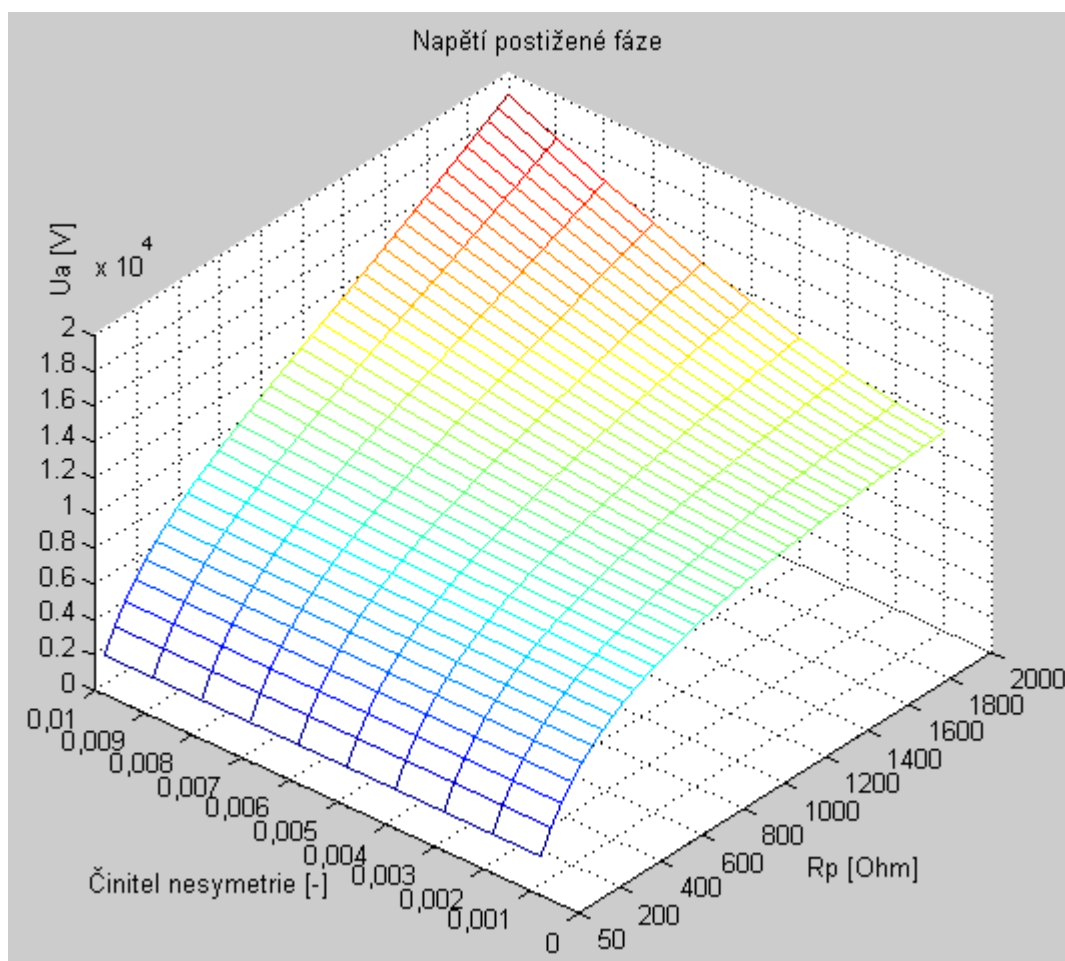
Z vypočteného grafu vyplývá, že velikost napětí na postižené fázi výrazně roste s rostoucím odporem poruchy. Nárůst se ukazuje intenzivnější při vyšších kapacitách sítě. V extrémních velikostech kapacity sítě a zároveň při vysokém odporu poruchy ( $I_c > 430$  A a  $R_p > 1$  k $\Omega$ ) napětí na postižené fázi přesáhne fázovou hodnotu proti zemi.

Zaměřím-li se na podmínku připojení rezistoru shuntu do fáze s podpětím nižším než 0,8  $U_f$  (tj. číselně 10 161 V), problém s vyhodnocením postižené fáze teoreticky vznikne již od kapacitního proudu 300 A a při odporu poruchy 2 k $\Omega$ . Z druhé strany potom odpor poruchy 600  $\Omega$  (a vyšší)

při velikosti kapacitní oblasti 860 A způsobí nežádoucí nárůst napětí nad stanovenou rozhodovací úroveň.

Z důvodu rezonance mezi správně naladěnou tlumivkou a kapacitou sítě ovlivňují tyto veličiny průběh velikosti napětí postižené fáze málo a to jen vlivem podladěné tlumivky. Zvýšené napětí způsobuje zejména kapacitní nesymetrie postižené fáze, která v extrémech tvoří s ostatními prvky náhradního schématu sériový rezonační RLC obvod. Tento jednoduchý fyzikální princip vysvětluje, že lze na postižené fázi naměřit vyšší napětí než fázové.

V simulovaném příkladu se zvyšovala kapacita sítě, a tím pádem rostla také kapacitní nesymetrie a její vliv na velikost napětí postižené fáze. V praxi může dojít ke zvýšenému napětí na postižené fázi i při menším kapacitním rozsahu sítě ale vyšší kapacitní nesymetrii. Z tohoto důvodu jsem dále vynesl závislosti při konstantní kapacitě sítě (800 A) a měnil pouze kapacitní nesymetrii pomocí činitele nesymetrie<sup>14</sup>, jehož velikost měním v rozmezí od 0,1 do 1 % (program *Napeti\_Rp\_Cnes*).



Graf 26: Velikost napětí na postižené fázi při změně  $R_p$  a  $C_{nes}$

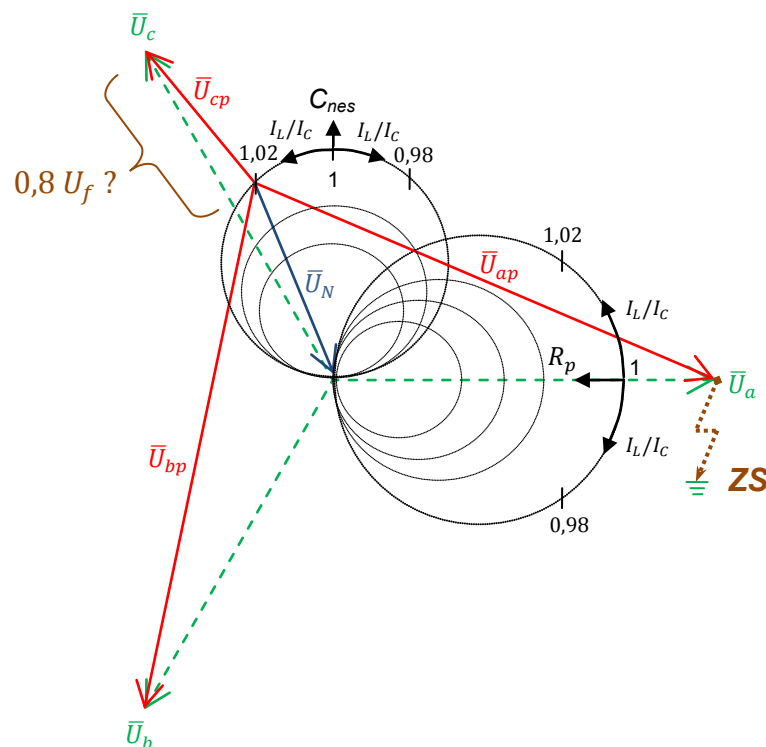
Velikost kapacitního proudu pokládám jisté míry za irelevantní, neboť ho kompenzuje vyladěná tlumivka na 98 %. Výsledný průběh se podobá předchozímu grafu 25. Ze 3D diagramu grafu 26

<sup>14</sup> Činitel nesymetrie vyjadřuje poměrnou velikost nesymetrie a je možné ho vyjádřit jako  $\varepsilon = C_{nes} / 3C$ .

vyvozuji vyšší vliv kapacitní nesymetrie na napětí postižené fáze při vyšších odporech poruchy (nad 1 k $\Omega$ ). Při takto velké kapacitní oblasti nepůjde vyhodnotit podmínku postižené fáze již od zemních spojení s odpory 700  $\Omega$  a více v síti s nesymetrií 0,8 %.

### 5.5.2. Nežádoucí přizemnění zdravé fáze

Z výsledků v předchozí kapitole mimo jiné vyplývá, že při velké kapacitní nesymetrii a velkém odporu poruchy dosahuje napětí na postižené fázi vyšší než fázové. Tyto výsledky vysvětluje fázorový diagram na obrázku níže, který popisuje vliv kapacitní a odporové (tj. odpor poruchy) nesymetrie během zemního spojení fáze  $a$ . Odporovou a kapacitní nesymetrii reprezentují samostatné kružnice, po kterých se pohybuje nový střed sítě posunutý o úroveň napětí  $\bar{U}_N$ . Posunutí středu fázorů po kružnicích způsobuje změna naladění zhášecí tlumivky.



Obrázek 30: Fázorový diagram odporové a kapacitní nesymetrie během ZS

Z ilustrativního fázorového diagramu lze dále vyvodit, že při tomto stavu kapacitní nesymetrie napětí na jedné ze zdravých fází bude nižší než fázové ( $\bar{U}_{cp}$ ) a na zbylých fázích ( $\bar{U}_{ap}$ ,  $\bar{U}_{bp}$ ) dosáhne vyšší než fázovou hodnotu. Pokud by napětí na zdravé fázi pokleslo až pod hranici 80 %  $U_f$ , mohla by automatika vyhodnotit chybně a přizemnit zdravou fázi.

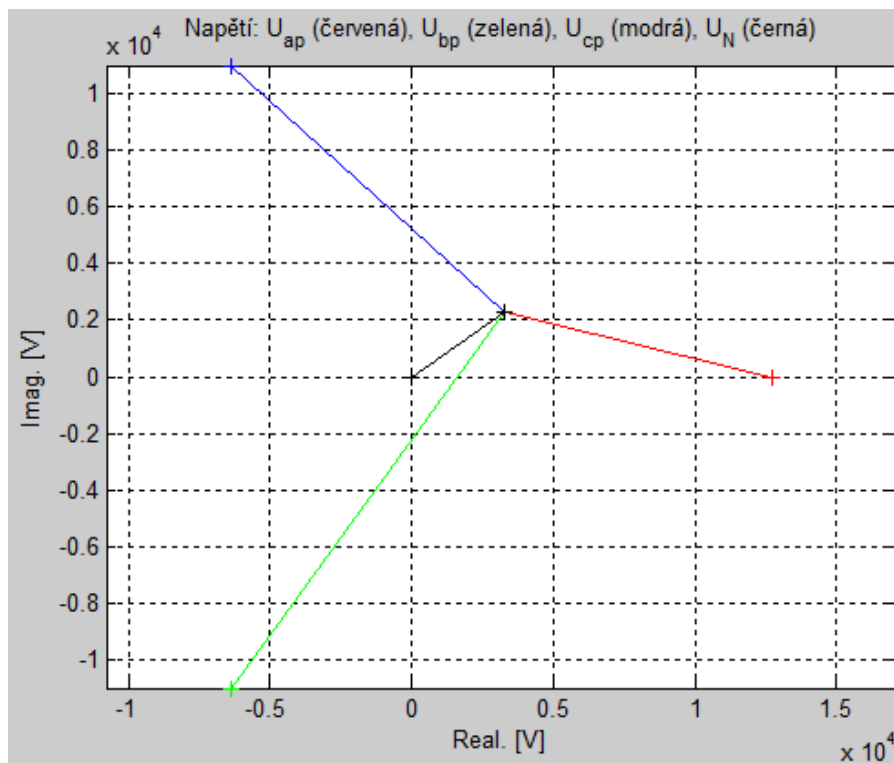
Naopak vysoká odporová nesymetrie způsobí přibližně stejnou velikost napětí  $\bar{U}_{ap}$  a  $\bar{U}_{bp}$  (popř.  $\bar{U}_{cp}$  v závislosti na přeladěné nebo podladěné tlumivce) blízkí se fázové hodnotě a napětí  $\bar{U}_{cp}$  (popř.  $\bar{U}_{bp}$ ) bude mít mírně vyšší než fázovou hodnotu. Když se opět zaměřím na úvodní podmínku automatického připojení odporu shuntu k fázi s podpětím 80 %  $U_f$ , tuto podmínku v popisovaném případě evidentně nesplní ani jedna fáze.

Tedy vzhledem k vyhodnocení a připojení nepostižené fáze je více nepříznivá kapacitní než odporová nesymetrie, avšak současně odporová nesymetrie s kapacitní způsobí přizemnění zdravé fáze při nižších velikostech kapacitní nesymetrie. Tyto teoretické předpoklady ověřím výpočtem, kde předpokládám nejhorší případ současného vlivu kapacitní i odporové nesymetrie.

Fázory poruchových napětí vyjádřím jednoduše:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ap} &= \bar{E}_a - \bar{U}_N \\ \bar{U}_{bp} &= \bar{E}_b - \bar{U}_N = \bar{a}^2 \bar{E}_a - \bar{U}_N \\ \bar{U}_{cp} &= \bar{E}_c - \bar{U}_N = \bar{a} \bar{E}_a - \bar{U}_N\end{aligned}\tag{5.5.2}$$

Vyšetřovaná síť má velikost kapacitní oblasti 800 A, činitel nesymetrie:  $\varepsilon = 0,012$  a odporovou nesymetrii  $R_p = 1500 \Omega$ . Dále budu rozlaďovat tlumivku, jako bych se pohyboval po kružnicích ilustrovaných na obrázku 30 a sleduji, zda dojde k dodržení podmínky podpětí 10 161 V, popř. které fáze se tato podmínka týká. Simulační program přikládám s názvem funkce *Nesymetrie\_faz\_diag*.

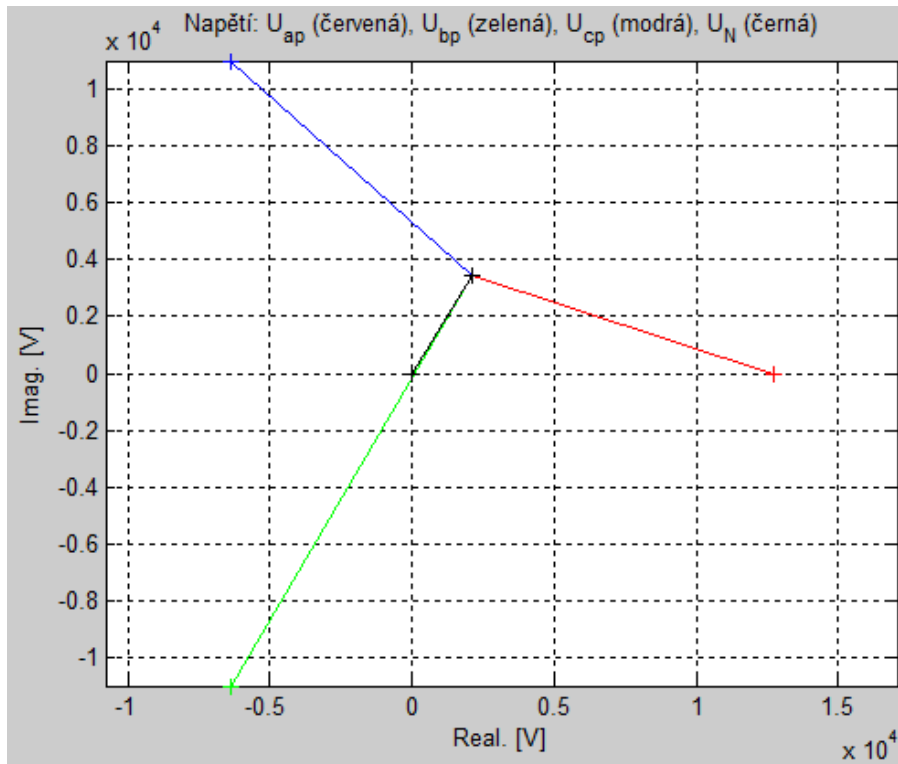


Graf 27: Fázorový diagram VN sítě s ZS,  $\varepsilon = 0,012$ ,  $R_p = 1500 \Omega$ , vyladěná tlumivka

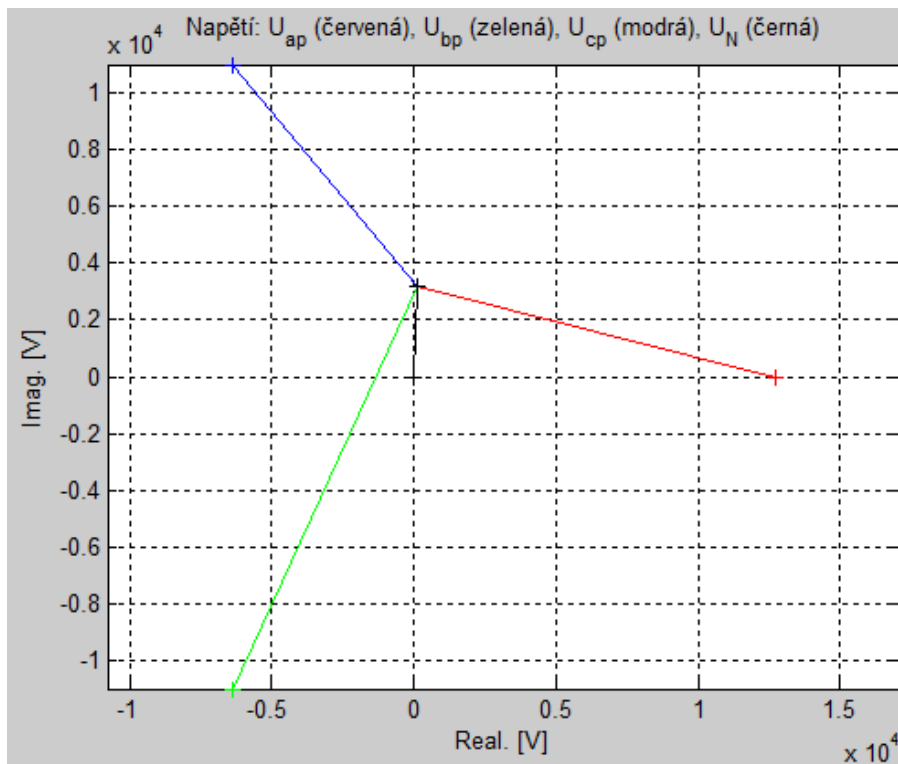
První fázorový diagram platí při vyladěné tlumivce a ukazuje vychýlení fázorů napětí ze středu o napětí uzlu proti zemi, přičemž dosažené efektivní hodnoty napětí jsou  $U_{ap} = 9\,681 \text{ V}$ ,  $U_{bp} = 16\,427 \text{ V}$ ,  $U_{cp} = 12\,994 \text{ V}$  a  $U_N = 4\,017 \text{ V}$ . Za těchto předpokladů se vyhodnotí a následně přizemní postižená fáze  $a$ .

Z ilustrativního fázorového diagramu na obrázku 30 vyplývá méně příznivý stav s ohledem na velikost napětí v postižené fázi přeladěná zhášecí tlumivka. Tento stav vznikne prakticky snadno, jelikož ladění tlumivky během zemního spojení je zablokováno. Další fázorový diagram

yní respektuje přeladěnou tlumivku o 2 %. Výsledné efektivní hodnoty napětí  $U_{ap} = 11\,113\text{ V}$ ,  $U_{bp} = 16\,776\text{ V}$ ,  $U_{cp} = 11\,354\text{ V}$ ,  $U_N = 4\,076\text{ V}$  již vychází tak, že podmínku podpětí nesplní ani jedna fáze a automatika nezareaguje.



Graf 28: Fázorový diagram VN sítě s ZS,  $\varepsilon = 0,012$ ,  $R_p = 1500\ \Omega$ , 2 % přeladěno



Graf 29: Fázorový diagram VN sítě s ZS,  $\varepsilon = 0,012$ ,  $R_p = 1500\ \Omega$ , 5 % přeladěno



Ještě větší přeladění tlumivky (nyní o 5 %) vede dle výše uvedeného fázorového diagramu k efektivním hodnotám napětí  $U_{ap} = 12\,995$  V,  $U_{bp} = 15\,585$  V,  $U_{cp} = 10\,135$  V,  $U_N = 3\,188$  V. Je zřejmé, že v tomto případě nastane k přizemnění nepostižené fáze *c*. Jelikož platí teoreticky zobrazené kružnice, další přeladování bude situaci mírně zlepšovat a napětí fáze *c* pomalu poroste.

Z výše prezentovaných fázorových diagramů usuzuji, že nejvíce nepříznivý (v mém případě ZS ve fázi *a*) je pokles napětí ve fázi *c*, kde současným vlivem odporové a kapacitní nesymetrie a přeladěné tlumivky poklesne napětí pod úroveň napětí postižené fáze.

### 5.5.3. Podmínka dostatečného napětí uzlu transformátoru

Pouhé posuzování, zda nedošlo k zemnímu spojení na základě velikosti napětí uzlu transformátoru, se v minulosti ukázalo jako nespolehlivé, protože k nárůstu tohoto napětí dochází i při jiných dějích v síti. Jedná se například o zemní spojení na jiném místě sítě, zemní zkratky v napájecí síti VVN nebo extrémní kapacitní nesymetrie vedoucí k velkému nulovému napětí. [25]

Zemní směrové ochrany vyhodnocují ještě činnou složku poruchového proudu. Řešená automatika MAT toto neumožňuje a společně s podpětovou podmínkou sleduje jen velikost napětí uzlu transformátoru proti zemi. Odstranit tuto nevýhodu by bylo reálné, pokud by automatika do své logiky zahrnovala vstup z řídicího systému s informací o vzniku zemního spojení detekovaného zemními ochranami a dále už jen řešila k jaké fázi připnout rezistor. To ovšem zařízení německého výrobce nemá.

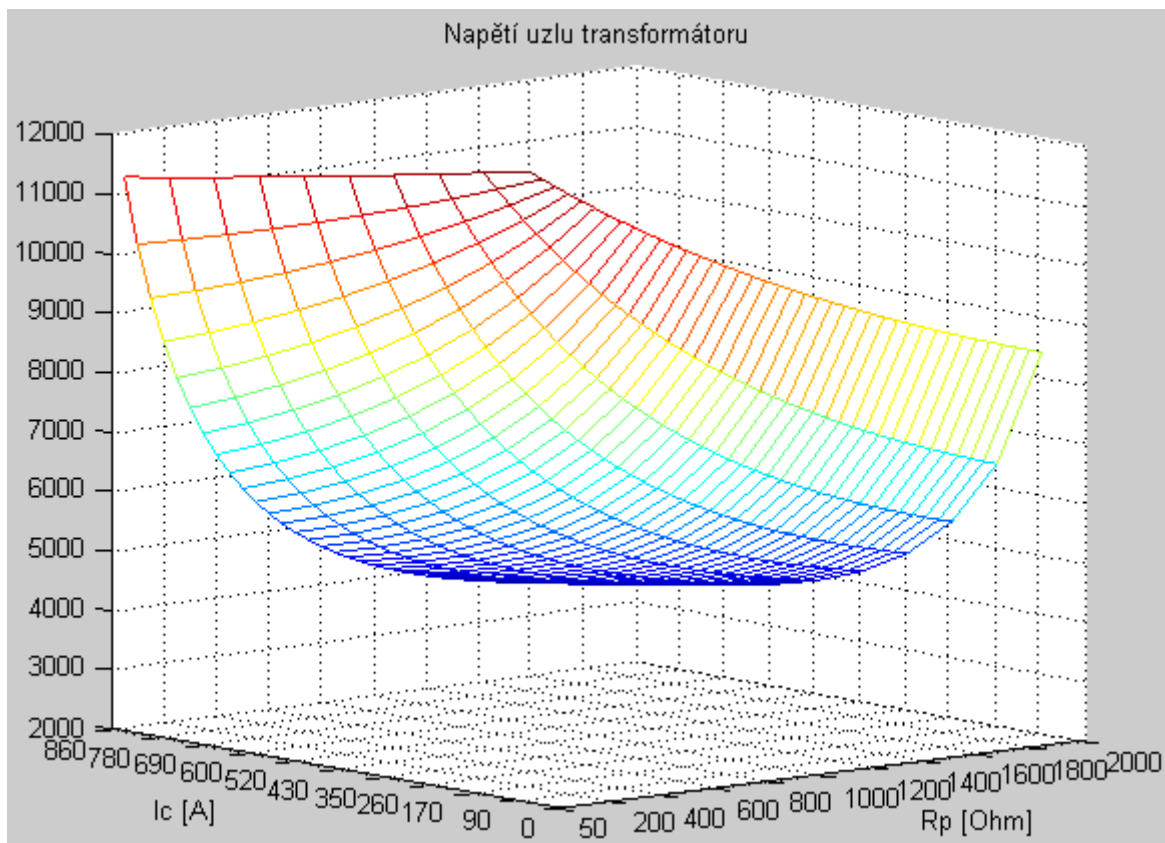
Obdobně jako v kapitole 5.5.1 vynesu grafy napětí uzlu transformátoru, které naopak s rostoucím napětím na postižené fázi klesá. Tato závislost je důležitá (ale nedokonalá) z hlediska indikace stavu vzniku zemního spojení. Automatika připojení shuntu uvádí ve svém technickém popisu možnost nastavení na 30 % nebo 50 %  $U_f$ . Vhodné nastavení této hodnoty se jeví na nižší mez, protože už norma [1] udávala vznik zemního spojení při napětí uzlu vyšší než 33 %  $U_f$ . V praxi se ale dnes pro signalizaci stavu zemního spojení běžně nastavuje hodnota nižší v rozmezí 15 – 25 %  $U_f$  a to vždy s ohledem na přirozenou kapacitní nesymetrii konkrétní sítě.

Změnou grafického výstupu v již uvedených zdrojových kódech *Napeti\_Rp\_C* a *Napeti\_Rp\_Cnes* dostanu simulace velikosti napětí uzlu transformátoru. Graf níže ilustruje opačnou závislost než napětí na postižené fázi, a tedy s rostoucím odporem poruchy a zároveň rostoucí kapacitní oblastí (popř. kapacitní nesymetrií) klesá napětí uzlu transformátoru proti zemi.

Podmínku 30 % z fázového napětí (3,8 kV) je obtížné splnit od odporu poruchy 1400  $\Omega$  v síti s kapacitním rozsahem vyšším než 600 A při současně vysokém činiteli nesymetrie ( $\epsilon = 0,01$ ).

Nastavením podmínky na 50 %  $U_f$  (6,4 kV) by nebylo dostatečné napětí uzlu transformátoru proti zemi při odporu poruchy vyšším než 400  $\Omega$  a zároveň kapacitním proudem sítě 860 A nebo při kapacitním proudem vyšším než 170 A a zároveň odporu poruchy 2 k $\Omega$ . Opět se jedná o výrazně nesymetrickou síť s nesymetrií 1 %.

Z výše uvedeného vyvozují dílčí závěr pro praktické nastavení automatiky. Pokud budeme chtít, aby automatika reagovala pouze při zemních spojeních v sítích s vyššími kapacitními proudy a nižšími odpory poruch, které se ukázaly v předchozí analýze jako problematictější, přepneme podmínku do polohy 50 %  $U_f$ .



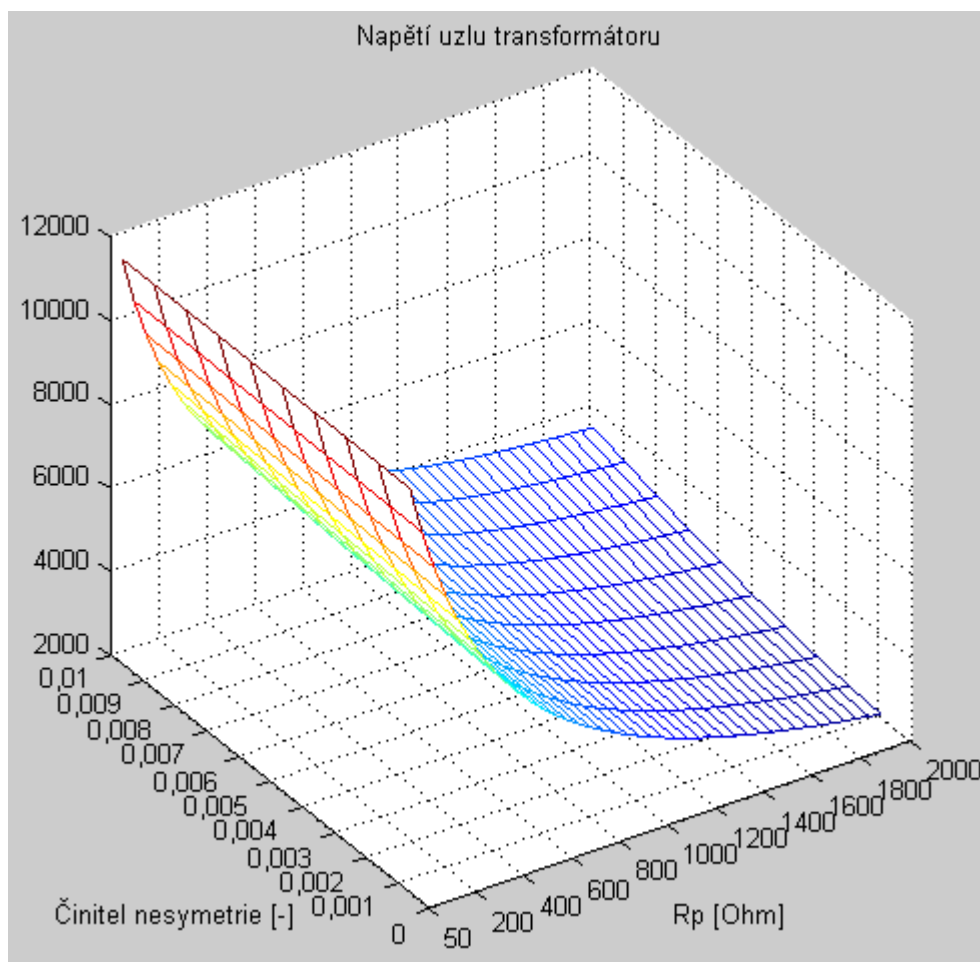
Graf 30: Velikost napětí uzlu transformátoru při změně  $R_p$  a  $I_c$

Další graf ukazuje závislost napětí uzlu transformátoru při konstantní velikosti kapacity sítě (800 A) na změně nesymetrie v rozmezí 0,1 – 1 % a odporu poruchy 50 – 2000  $\Omega$ .

Napětí uzlu v grafu 31 výrazně ovlivňuje odpor poruchy, jehož maximální testovaná velikost 2 k $\Omega$  sníží napětí uzlu pod vyhodnocovanou mez a to v celém rozsahu kapacitní nesymetrie. Vliv kapacitní nesymetrie napětí uzlu mírně zvyšuje a dle výsledků nejvyšší činitel nesymetrie snižuje detekovatelnou poruchu na poruchu s odporem 1,6 k $\Omega$ , kdy má uzel transformátoru ještě dostatečné napětí proti zemi.

Zajímavým poznatkem se ukazuje vliv rostoucí kapacitní nesymetrie, který se projevuje na napětí uzlu transformátoru více při vysokohmových poruchách. Naopak při nízkohmových poruchách napětí uzlu na kapacitní nesymetrii téměř nezávisí a dosahuje hodnot fázového napětí.

Závěrem musím poznamenat, že rozsáhlé kapacitní oblasti jsou sítě, kde převažuje kabelové vedení, které se naopak vyznačuje velmi malou přirozenou kapacitní nesymetrií. Mimo jiné to také vede k nutnosti použití proudové injektáže během ladění zhášecích tlumivek v těchto sítích.



Graf 31: Velikost napětí uzlu transformátoru při změně při změně  $R_p$  a  $C_{nes}$

#### 5.5.4. Podmínka časového zpoždění

Poslední podmínkou automatického připnutí odporu shuntu je trvání všech předchozích podmínek po určitou dobu. Toto zpoždění lze libovolně nastavit, a proto se nyní zaměřím na jeho ideální volbu. Jelikož shuntování má omezit zbytkový proud v místě zemního spojení a snížit nebezpečí vysokých dotykových napětí na neživých částech, zaměřím se v této úvaze hlavně na časovou proměnnost dovolených dotykových napětí.

Nejprve vynesu graf dovolených dotykových napětí tak, jak je ukládá platná norma [24], a doplním ho o nastavení a působení zemních ochran včetně detekce vývodu s poruchou. Tyto časové prodlevy jsou také proměnné, obvykle se nastavuje doba pro zánik přechodných poruch 0,5 – 2 sekundy podle zkušeností s poruchami v konkrétní síti. Poté následuje připnutí sekundárního odporníku k tlumivce pro umělé navýšení činné složky poruchového proudu. Detekce vývodu a spínací pochod (připnutí a odepnutí odporníku) zabere přibližně 1,2 sekundy. Celý tento proces tak obvykle trvá 2,2 s. V kapitole 5.4. si lze povšimnout, že byl časový interval na samozhášení přechodných poruch ještě o sekundu delší.

Aktuální nastavení pokusného zařízení shuntování v distribuční síti E.ON Distribuce, a.s. zahrnuje podmínku časového zpoždění 5 s.

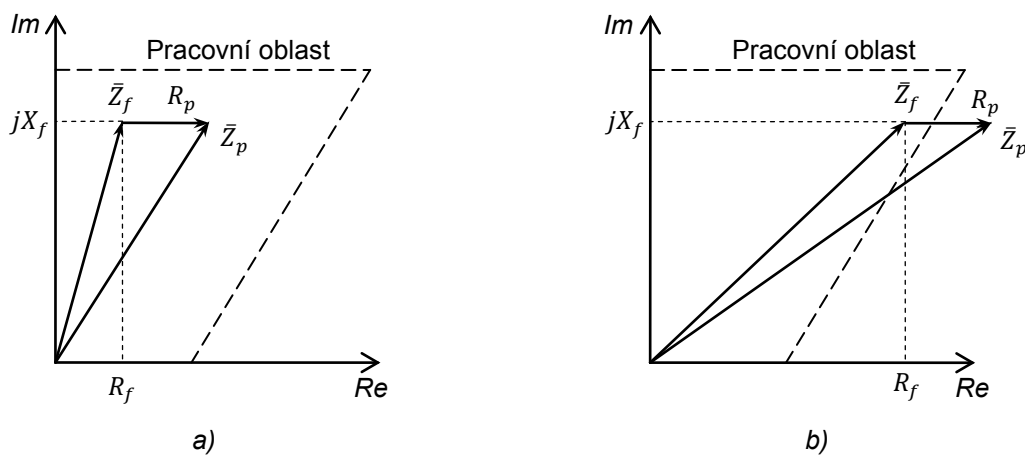


## 5.6. Vyhledání místa ZS pomocí přizemnění nepostižené fáze

Jako doplňující funkce automatiky shuntování se uvádí vyhledání místa zemního spojení pomocí přizemnění zdravé fáze. Jedná se tedy o dvojité zemní spojení již v této práci teoreticky zpracované a verifikované s normou ČSN EN 60909-3 v kapitolách 4.3.1. a 4.3.2. Analyzovaná funkce má vyhodnotit vzdálenost zemního spojení od napájecí transformovny. Nyní ověřím, za jakých okolností tato funkcionalita vyhodnotí správně a zhodnotím její výhody a nevýhody.

### 5.6.1. Činnost distančních ochran v sítích VN

Činnost distančních ochran zajišťuje vyhodnocení imaginární složky poruchové impedance, podle které určují vzdálenost poruchy. Nastavená pracovní oblast se dnes volí ve tvaru lichoběžníku, což je výhodné vzhledem k vyhodnocení odporových poruch.



Obrázek 31: Impedanční charakteristiky distanční ochrany [14]

a) Správné zapůsobení; b) Chybné zapůsobení (resp. nezapůsobení)

Reaktance poruchy se získá z měření proudu a napětí v místě distanční ochrany:

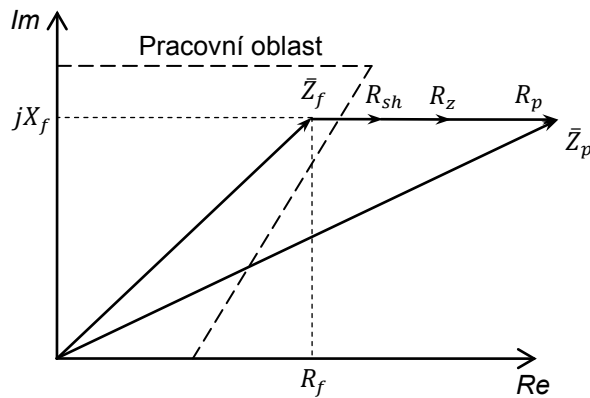
$$X_f = \frac{|\bar{U}_f|}{|\bar{I}_f|} \cdot \sin \varphi_f \quad (5.6.1)$$

Vzdálenost poruchy je pak už jednoduchý podíl změřené a nastavené reaktance konkrétního vedení v  $\Omega/\text{km}$ .

$$l_{km} = \frac{X_f}{X_{nast}} \quad (5.6.2)$$

Obrázek 31 demonstruje, jak významně se na vyhodnocení projeví poměr  $R/X$  vedení a dále činný odpor poruchy. Zatímco u vedení VVN s poměrem podélných parametrů vedení  $R/X$  přibližně 0,1 zůstane výsledná impedance včetně činného odporu reprezentující poruchu (popř. oblouk) v nastavené pracovní oblasti, případ a), v síti s venkovním vedením VN a poměrem  $R/X$  prakticky v rozmezí 0,5 – 0,9 ochrana nemusí zapůsobit v případě odporové poruchy obrázek b).

Fázor poruchové impedance v pracovní oblasti dále ovlivňují typické parametry kompenzované sítě VN, tedy bez přímo uzemněného uzlu a absence zemního lana.



Obrázek 32: Impedanční charakteristika distanční ochrany během přizemnění zdravé fáze

Po přizemnění nepostižené fáze se poruchový proud uzavře zemí s prakticky předem nedefinovatelnou celkovou rezistancí a dále samozřejmě rezistorem shuntu. Z obrázku 32 konstatuji, že tyto činné odpory nemají vliv na přesnost vyhodnocení vzdálenosti místa poruchy, ale především zvyšují riziko nezapůsobení distanční ochrany. Samozřejmě v řešeném režimu ochrany prakticky „lokátor“ by mohlo dojít k vyhodnocení události v další zóně.

### 5.6.2. Nastavení velikosti reaktance

Teoreticky vyjdu ze vztahu výpočtu poruchového proudu dvou simultánních dvojitých zemních spojení pro jednostranně napájené radiální vedení citované z normy v kapitole 4.3.2. Jak jsem již uvedl, distanční ochrana vyhodnocuje imaginární část poruchové impedance, a tedy pokud aplikuji vztah z předmětné normy a provedu úpravu:

$$X_f = \text{Im}\{6\bar{Z}_{(1)d} + 2\bar{Z}_{(1)f} + \bar{Z}_{(0)f}\} \quad (5.6.3)$$

$$X_f = \text{Im}\{6j(X_{t(1)} + X_{s(1)}) + 2(R_{v(1)} + jX_{v(1)}) + (R_{v(0)} + jX_{v(0)} + R_p + R_{sh} + R_z)\} \quad (5.6.4)$$

$$X_f = 6X_{t(1)} + 6X_{s(1)} + 2X_{v(1)} + X_{v(0)} \quad (5.6.5)$$

Pak  $X_{nast} = X_f$  za předpokladu, že reaktance vedení sousledné  $X_{v(1)}$  a nulové  $X_{v(0)}$  složky bude hodnota konkrétního vývodu v  $\Omega/\text{km}$ .

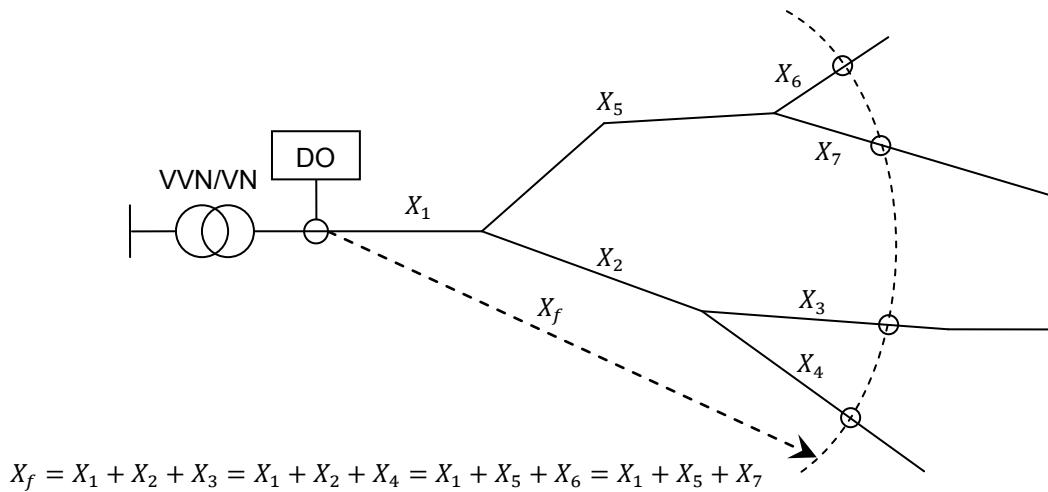
### 5.6.3. Zhodnocení určení vzdálenosti zemního spojení

Funkčnost závisí především na nastavení pracovní oblasti distanční ochrany, která by měla mít pro tento účel dostatečné rezervy ve směru činné složky poruchové impedance. Během vysokohmových zemních spojení lze předpokládat problém se zapůsobením distanční ochrany.

Nastavená hodnota reaktance musí obsahovat násobky reaktancí transformátoru a nadřazené sítě. Sítě VN se vyznačují mnohem vyšší rozmanitostí průřezů (kmenová vedení, odbočky, přípojky) než sítě VVN. Reaktance se tedy v trase vedení často mění a tím samozřejmě klesne přesnost určení vzdálenosti.

Zásadní nevýhodou je po přizemnění nepostižené fáze veliký nárůst proudu s hodnotami stovky Ampér v závislosti na odporu poruchy, uzemnění a vzdálenosti od místa napájení, viz výpočet v kapitole 4.3.1. Záměrně vyvolaný průchod nadměrného proudu ohrožuje základní funkce shuntování redukovat dotyková napětí, ochránit zařízení před vysokým residuálním proudem a zabránit tak vzniku další poruchy. Ve většině případů takto detekovaných poruch by došlo k vypnutí vývodu nadproudými ochranami.

Závěrem, v typicky radiálně řazené VN síti zjištěná vzdálenost zemního spojení od napájecí transformovny (distanční ochrany) není jasnou informací o místě poruchy, viz následující obrázek.



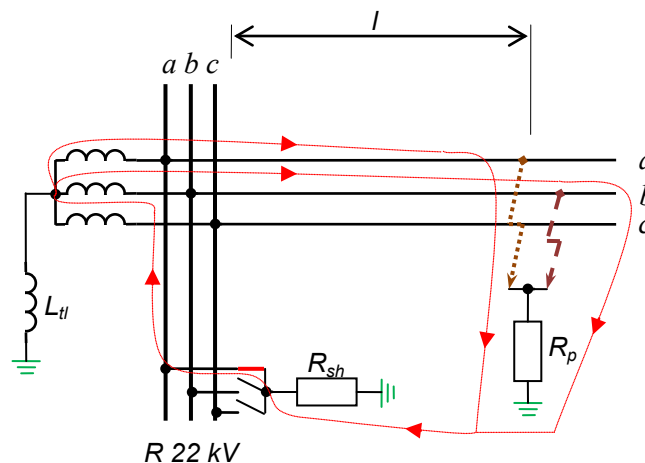
Obrázek 33: Vzdálenost ZS podle vyhodnocené reaktance [14]

## 5.7. Vícenásobné poruchy při aktivním shuntování

Připojením odporu shuntu během zemního spojení vznikne dvojnásobné zemní spojení, přičemž zdravé fáze celé VN sítě stále namáhá sdružené napětím proti zemi. Je na místě mít obavu, že pokud budeme tuto síť po delší dobu provozovat, nastane další porucha na některé ze zdravých fází.

### 5.7.1. Dvojnásobné a dvojitě zemní spojení

Nyní zjednodušeně předpokládám další slabý článek v síti v místě prvotního zemního spojení. Výpočtem jsem již ověřil omezení zbytkového proudu zemního spojení v jeho místě, avšak porušení izolační schopnosti kabelového vedení pravděpodobně poruší také izolaci zdravých fází, které poté nemusí odolat sdruženému napětí a další fáze se spojí se zemí. Z tohoto důvodu nyní provedu výpočet všech těchto simultánních poruch, tj. dvojnásobné a dvojitě zemní spojení.

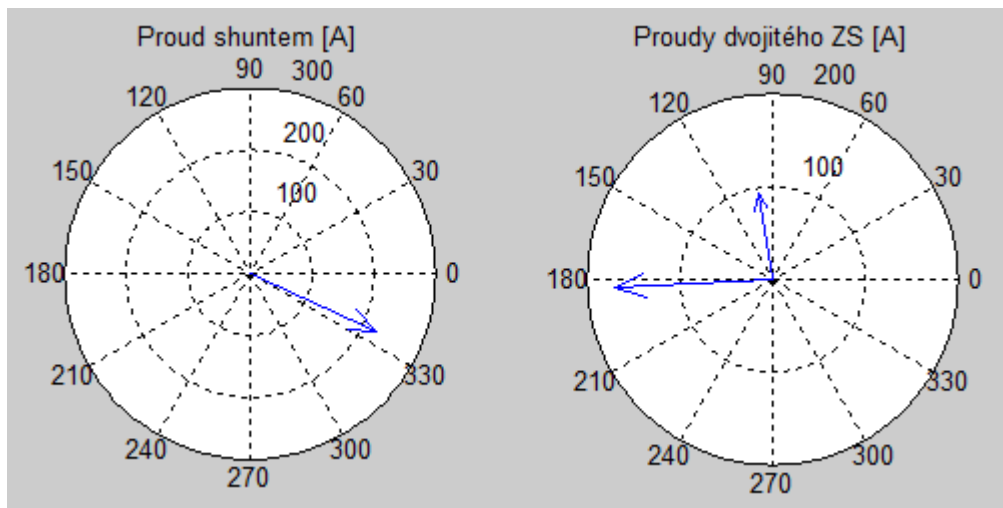


Obrázek 34: Dvojnásobné a dvojitě zemní spojení

Dle obrázku 34 prvotní ZS nastalo ve fázi  $a$  v místě poruchy plus následné připojení shuntu do stejné fáze ( $a$ ). Nakonec se v místě prvotní poruchy přizemnila ještě fáze  $b$ .

Z toho vyplývá, že musím pro výpočet takto definovaných poruch použít teorii simultánních poruch s hybridní sériově paralelní charakteristickou maticí dle kapitoly 4.2.7.

Zdrojový kód k výpočtu tohoto stavu přikládám v příloze č. 5 pod názvem *Shuntovani\_H*. Důležitým předpokladem je správné nastavení převodů oddělovacích transformátorů  $\bar{n}_i^{(l)}$  a  $\bar{n}_k^{(l)}$ , kde  $l = 1, 2, 0$ . Protože nyní uvažuji poruchy v kabelové síti, budu předpokládat jejich odpor pouze  $30 \Omega$ . Další parametry výpočtu lze vyčíst ze zdrojového kódu.



Obrázek 35: Dvojnásobné a dvojitě ZS

Vektorovým součtem proudů v místě dvojitého zemního spojení získám přibližně proud procházející shuntem s opačnou polaritou, což vysvětluje obrázek 34. Proud zhášecí tlumivky se při tomto poruchovém stavu projeví jen velmi málo.

S přidanou zemní poruchou ve fázi  $b$  výrazně vzroste (proti dvojnásobnému zemnímu spojení fáze  $a$ ) proud shuntem v transformovně v tomto případě až na 220 A. Proudy v místě dvojitého zemního spojení (ve fázích  $a$  a  $b$ ) dosahují hodnot 100 A a 180 A.

Tento poruchový stav mohou zaznamenat nadproudé ochrany a postižený vývod by byl vypnut. Samozřejmě pak musí dojít i k vypnutí vypínače shuntování. Pokud nezapůsobí nadproudé ochrany, tepelný model shuntu ho automaticky odpojí v čase dle grafu 9 v kapitole 5.1.3. a pravděpodobně (v závislosti na odporu obou poruch) dojde k následnému zapůsobení nadproudých ochran vývodu.



## 5.8. Shuntování reaktorem – systém SGR

Za účelem úplné analýzy metody shuntování uvádím tuzemského výrobce obdobného zařízení jako testovaný systém MAT. Označení SGR pochází od společnosti EGE, spol. s r.o.. Úkolem však není vybrat a doporučit vhodný systém pro další aplikaci, ale rešeršním způsobem na základě dosavadních poznatků prověřit možnosti také tohoto zařízení a případně stanovit jeho výhody a nevýhody.

Systém SGR má jako základní prvek, který odlehčuje místo zemního spojení od poruchového proudu, reaktor s reaktancí  $6 \Omega$ . Tento reaktor výrobce doporučuje v suchém provedení, ale lze objednat v případě požadavků na úsporu místa v rozvodně VN s olejovým chlazením v menších rozměrech. Také Ohmickou hodnotu reaktoru vyrobí zhotovitel na objednávku. To se zdá výhodné zejména k výsledkům analýz z kapitol 5.3., kde nižší hodnota odporu shuntu zvyšovala účinnost omezení poruchového proudu. Zároveň však je třeba k volbě reaktance přistupovat obezřetně vzhledem k proudům zátěže, protože při malých impedancích (obecně) shuntu by mohlo dojít k nežádoucímu průchodu proudu zátěže zemí místo vedením. Zjednodušeně pak tedy záleží na impedanci délky vývodu k nejvzdálenější distribuční trafostanici, která musí být vždy nižší, než součet impedance shuntu a uzemnění. Samozřejmě velmi závisí na velikosti odporu poruchy, jak jsem dokázal v kapitole 5.3.6. Vzhledem k velmi proměnlivé velikosti odporu každé poruchy a k různé impedanci uzemnění ve VN sítích navrhuji velikosti reaktance reaktoru nebo odporu rezistoru v pilotních projektech ponechat dle doporučení jejich výrobce.

Tím, že systém SGR nevyužívá jako tlumící prvek rezistor, roste jeho tepelná odolnost při průchodu poruchového proudu. Zařízení má zkratovou odolnost 3,7 kA po dobu průchodu proudu 2 s. Trvale vydrží reaktor průchod proudu 150 A.

K přizemnění slouží tři odpínače a jednopólový vypínač. Odpínače i vypínač mají dobu spínacího pochodu 0,1 s, tj. celkem zajistí přizemnění reaktoru v čase 0,2 s. Pro ochranu reaktoru je měřen proud, který prochází obvodem. Instalace systému tří odpínačů a jednoho vypínače není problematické zhotovit také do zapouzdřeného rozvaděče VN, ale musí být zajištěno oddělené místo pro přirozeně chlazený reaktor.

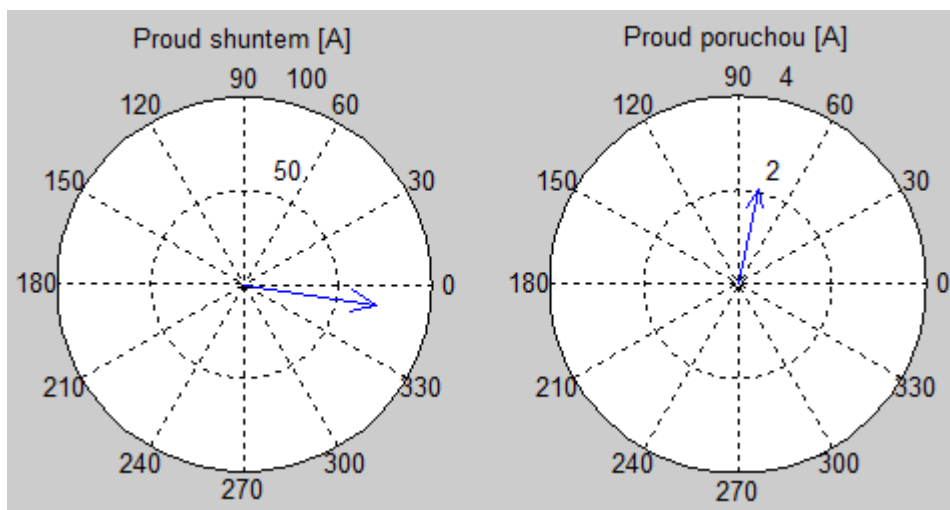
		Výkonový prvek	Zkratová odolnost	Průchod proudu trvale	Spínací zařízení	Doba k připnutí	Podmínky sepnutí
Zařízení	MAT	Rezistor $R_{sh} = 11,5 \Omega$	2 kA, $t_k = 1s$	70 A (17 minut), 25 A (1 hodina)	3 x jednopólový vypínač (vakuový)	$t_d < 0,5 s$	$U_p < 0,8 U_f$ $U_0 > 0,3 U_f$ $t_s = 5 s$
	SGR	Reaktor $X_{sh} = 6 \Omega$	3,7 kA, $t_k = 2 s$	150 A	3 x odpínač + jednopólový vypínač (vakuový)	$t_d = 0,2 s$	Neveřejná informace

Tabulka 7: Podstatné parametry systému SGR a MAT

Podmínky automatického připojení reaktoru do postižené fáze se liší od zařízení německého výrobce. Bohužel nejsou veřejné, ale obecně se snaží odstranit některé nedostatky, které jsem analyzoval v kapitolách 5.5. V tabulce 7 shrnuji podstatné parametry poskytnuté oběma výrobci. Náklady na pořízení obou zařízení uvádím v kapitole 5.1.5.

Z tabulky 7 plyne výhoda reaktoru v jeho tepelné odolnosti průchodem proudem. Náklady na výrobu takto odolného rezistoru by několikanásobně překonaly náklady na reaktor. Na druhou stranu musím ovšem poznamenat, že rezistor je fyzikálně lepším prvkem, protože jednak tlumí přechodné děje během zemního spojení a dále nemá frekvenční závislost impedance. Jelikož reaktor vykazuje větší reaktanci pro vyšší harmonické poruchového proudu, které zemní spojení doprovází, budou u zařízení SGR proudy vyšších harmonických procházet spíše místem zemního spojení.

Zavedením reaktoru a jeho reaktance do náhradního schématu shuntování, tj. pouhou náhradou  $R_{sh}$  za  $X_{sh}$  ve výchozím programu *Shuntovani* v příloze č. 5, vypočítám poměry během shuntování s reaktorem v síti se stejnými parametry jako při testování rezistoru shuntu, což ukazuje následující diagram.



Obrázek 36: Fázory poruchových proudů při shuntování reaktorem

Porovnáním tohoto diagramu s výchozím fázorovým diagramem v kapitole 5.3. na obrázku 27 zjistím, že během shuntování reaktorem se téměř neliší velikost ani fáze proudu procházející shuntem. Proud procházející místem zemního spojení je sice o přibližně 1,5 A nižší, jenomže výrazně induktivní, a to i v případě podladěné tlumivky o 2 %. Při podladění o 10 % má poruchový proud úhel stále ještě úhel 45° (induktivní), velikost 3 A a reaktorem shuntu už prochází 100 A (úhel 45° kapacitní). Fázory obou poruchových proudů jsou tedy vždy mezi sebou fázově posunuty o 90°. Prokazuje se nevýhoda reaktoru v navyšování imaginární složky poruchového proudu, což by mohlo mít důsledky na zhášení obloukových poruch v jejich místě. Nutno dodat, že k příznivému omezení poruchového proudu nastane, a tedy oblouk uhasne tímto efektem, jak ukazují prováděné zkoušky tohoto zařízení.

## 5.9. Zhodnocení metody shuntování

Shrnutím všech předchozích simulací vyzdvihnu několik dílčích závěrů. V první řadě musím poznamenat, že ani v jednom případě se simulacemi nepotvrdilo negativní zvýšení poruchového proudu v místě zemního spojení vlivem připojení shuntu, jak uvádí některé studie. Nejvíce nepříznivým stavem k účinnosti automatiky přizemnění postižené fáze byla kovová porucha v blízkosti napájecí transformovny, při které přizemnění postižené fáze nijak neovlivnilo výsledný poruchový proud v místě zemního spojení. Obecně při odporech poruchy  $20 \Omega$  a vzdálenosti poruchy 20 km má metoda již 50 % účinnost a odpor poruchy vyšší než  $30 \Omega$  zajistí téměř nezávislost poruchových proudů na vzdálenosti poruchy od napájecí transformovny.

Velikost výkonového rezistoru shuntu  $11 \Omega$  se ukázala jako vhodná, protože zajišťuje omezování poruchového proudu během nízkoohmových zemních spojení v blízkosti napájecí transformovny. Pozitivního výsledku shuntování se dosahuje také s předpokladem rozladěné zhášecí tlumivky o 10 % a zemních spojení vzdálených 1 km od napájecí transformovny a odporu poruchy  $20 \Omega$ .

Kladné výsledky přizemnění postižené fáze jsem ověřil v sítích s vysokými kapacitními proudy. K tomu je ale zapotřebí podotknout, že výkonový rezistor shuntu zařízení MAT není prakticky dostatečně odolný na trvalý průchod vypočítaného zbytkového proudu větších kapacitních celků a dobu provozu takového zemního spojení výrazně zkracuje ochrana jeho přehřátí.

Proud zátěže má větší tendenci protékat obvodem shuntu než místem zemního spojení. S rostoucím odporem poruchy klesá závislost obou poruchových proudů na zatížení. Od poruch s odporem  $100 \Omega$  a více vychází zanedbatelné ovlivňování poruchových proudů běžnou zátěží. Vliv velikosti rezistoru shuntu na nežádoucí průchod pracovního proudu zátěže nebyl simulován, protože to zvolená metoda neumožňuje, nicméně všechny dílčí výsledky poukazují na to, že obava z průchodu pracovního proudu jedné fáze (postižené) zemní cestou namísto vedením je oprávněná. Nelze tedy snižovat odpor nebo reaktanci shuntu na minimální hodnoty, i když účinnost přizemnění postižené fáze při nejnižších hodnotách by byla maximální.

Podmínky pro automatické připojení odporu shuntu MAT se na první pohled jeví jako vhodně nastavené, ale garance stoprocentní správnosti zareagování dostát nemohou. Teoreticky jsem vymežil případy, kdy automatika shuntování MAT vzhledem k nastaveným podmínkám sepnutí nemusí zareagovat na zemní spojení nebo dokonce přizemní zdravou fázi. V simulovaných stavech nesymetrické sítě ( $\varepsilon = 0,01$ ) by nedošlo k automatickému přizemnění žádné fáze během zemního spojení s parametry  $R_p > 2 \text{ k}\Omega$  a  $I_c > 300 \text{ A}$  nebo  $R_p > 600 \Omega$  a  $I_c > 860 \text{ A}$ . K přizemnění také nenastane za předpokladu nedostatečného napětí uzlu transformátoru proti zemi ve stavu zemního spojení  $R_p > 1400 \Omega$ ,  $I_c > 600 \text{ A}$  a  $\varepsilon = 0,01$ . Změna nastavení podmínky dostatečného napětí uzlu na 50 %  $U_f$  vymezí reakce automatiky na problematičtější zemní spojení s nižšími odpory poruch v sítích s vysokými kapacitními proudy. Automatické přizemnění zdravé fáze jsem vypočetl v síti s kapacitním proudem 800 A, kapacitní nesymetrii 1,2 %, odporem poruchy 1,5 k $\Omega$  a přeladěné tlumivce o 5 %. Praktické ověření funkčnosti podmínek však dosud nemohlo být vyhodnoceno z důvodu nízkého výskytu zemních spojení v síti napájené z TR Medlánky.

V sítích s vysokými kapacitními proudy navrhuji snížit časové zpoždění k přizemnění postižené fáze na minimum, ovšem s respektováním doby zániku přechodných zemních spojení v konkrétní síti a doby lokalizace postiženého vývodu. Jako vhodné časové zpoždění se jeví tři sekundy. Obdobně by se v těchto sítích měla zkracovat doba připojení odporníku ke zhášecí tlumivce.

Funkcionalitu přizemnění zdravé fáze pro lokalizaci místa poruchy, resp. její vzdálenosti od elektrické stanice, nedoporučuji využívat vzhledem k vypočítaným vysokým poruchovým proudům během dvojitého zemního spojení a neurčitosti výsledku zareagování distanční ochrany, popř. praktické aplikaci v radiálně řazené síti.

Další jednofázová zemní porucha, která nastane během shuntování, s velkou pravděpodobností (v závislosti na jejím odporu) zvýší proud nad vyhodnocovanou mez nadproudými ochranami nebo tepelným modelem shuntu.

Metoda shuntování s reaktorem se vyznačuje vyšší odolností vůči průchodu poruchového proudu, jenomže reaktor s induktivní složkou předává tuto složku do místa zemního spojení, což může být nevýhodou, pokud nedojde shuntováním k dostatečné redukci poruchového proudu. Další negativa reaktoru vyplývají z jeho fyzikální podstaty, protože méně propouští vyšší harmonické a netlumí přechodné děje. Poněkud spekulativně (avšak s ohledem na výsledky testování vhodné velikosti odporu shuntu v kapitole 5.3.3.) předpokládám, že z výše uvedených důvodů má shuntování reaktorem téměř poloviční hodnotu velikosti impedance než rezistorem, aby bylo dosaženo obdobné účinnosti. Podmínky automatického vyhodnocení a připnutí reaktoru do postižené fáze systému SGR nebyly ověřovány.

Z praktického hlediska není problémem implementace systému shuntování německého i tuzemského výrobce do elektrické stanice a dispečerského řídicího systému. Zásadně je ale nutné mít na paměti vliv tohoto zařízení na proces vymanipulování místa poruchy, dobu, po kterou zařízení je schopno odolávat poruchovému proudu, a v neposlední řadě také mezní dobu provozu zhášecí tlumivky. Ta bývá podle typu jejího chlazení obvykle 2 hodiny, 4 hodiny, nebo se vyrábí speciální 24 hodinové tlumivky. Ty se ovšem v distribučních soustavách vyskytují zřídka. Shuntování s rezistorem má dosti omezenou dobu provozu a není nezbytné kvůli němu měnit zhášecí tlumivku za lépe chlazenou.

Závěrem musím poznamenat, že rozsáhlé kapacitní oblasti budou ze své podstaty vždy náchylnější na vznik následné poruchy, při které průchodem nadproudu dochází k riziku zablokování zařízení shuntování s pouze místním odblokováním. Další příčina nežádoucího nadproudu nastane vlivem rozladěné zhášecí tlumivky, například způsobené poruchou na jiném vývodu, který byl vypnut. U sítí VN s takovým kapacitním proudem, jejichž provoz se zemním spojením se podmíní instalací systému shuntování, se musí poté vypnout celý vývod VN postižený zemním spojením minimálně na dobu zajištění fyzické kontroly a odblokování systému shuntování. Tento extrémní případ ve výsledku zhorší spolehlivost dodávky elektřiny.

## 6. Doporučení k provozování sítí s velkými $I_c$

Pokud mám zodpovědět otázku problematiky vysokých kapacitních proudů, měl bych se nejprve vrátit na začátek této disertační práce a ptát se, zda není lepším přístupem vyhnout se problémům s vysokými kapacitními proudy omezením některé z vyjmenovaných příčin jejich razantního nárůstu. Bez zvýšené kabelizace se jistě rozvoj distribučních soustav v budoucnu neobejde, ale otázkou zůstává, do jaké míry stále navyšovat podíl kabelů ve smíšených sítích změnami řazení sítě nebo přecházet z odporově uzemněného uzlu na provoz se zhášecí tlumivkou.

Provoz čistě kabelové sítě se zhášecí tlumivkou doporučuji posoudit z pohledu investičních nákladů na kompenzaci kapacitních proudů (tlumivky vyšších výkonů, regulátor, odporník, proudová injekce, popř. dodatečné zařízení shuntování) a proti tomu zvážit úsporu za SAIDI vzniklou provozem této sítě se zemním spojením. Zde podle mého názoru lze očekávat za dnešních podmínek nerentabilitu, protože se kabelová síť obecně vyznačuje malým počtem jednopólových poruch (ověřeno v kapitole 3). Musím ovšem podotknout, že se v těchto sítích výrazně snižuje riziko nebezpečných dotykových napětí, protože redukční faktor pláště kabelů snižuje impedanci zemnicí soustavy a dovoluje tedy vysoké zemní proudy. Lze zde mluvit o celkové uzemňovací soustavě a není problém z bezpečnostního hlediska nasadit systém shuntování. Ten v kabelových sítích bude plnit funkci ochrany zařízení před účinky zemních spojení, tj. pokud na jednom kabelovém vedení hoří oblouk, po přizemnění postižené fáze dojde k uhašení tohoto oblouku a sníží se tím riziko poškození izolace ostatních kabelových vedení uložených na stejné lávce či ve stejném kabelovém prostoru nebo jiného blízkého zařízení.

Smíšené sítě se neobejdou bez kompenzace kapacitních zemních proudů. Dalším doporučením je tedy velmi jednoduché opatření nejméně finančně náročné, a to rozumným způsobem udržovat řazení sítě s ohledem na velikost kapacitních proudů a logicky rozdělovat provoz kompenzované sítě nebo sítě s uzlem transformátoru uzemněným přes rezistor. Tam, kde jsou limitní kapacitní proudy, řekněme vyšší, než dokáže vykompenzovat běžná tlumivka 5000 kVAr, se nesnažit o další ukrajování podílu městské kabelové sítě za účelem zvyšování spolehlivosti, protože s tím budou souviset další náklady do distribuční soustavy s nejistou ekonomickou efektivností.

Pakliže nelze dostát výše uvedeného nejjednoduššího pravidla například z důvodu mimořádného řazení sítě popisovaného v kapitole 1.4., dalším finančně méně náročným opatřením se jeví použití přídatného zařízení shuntování. Při této variantě se musí postupovat s opatrností, jak velký kapacitní celek připustit s ohledem na možnost vzniku nebezpečných dotykových napětí, dimenzování samotného zařízení shuntování a jeho spolehlivé funkčnosti, což shrnuji v předchozí kapitole. Z výsledků simulací a s respektováním podmínky maximálního zbytkového proudu 60 A z normy [1] plyne možnost provozovat kapacitní oblasti se systémem přizemnění postižené fáze v rozsahu do 600 A během kovových zemních spojení nebo s předpokladem malého odporu poruchy ( $20 \Omega$ ) až do výše 850 A. Hodnotu však uvádím bez nutného posouzení, zda tato síť vyhoví na dotyková napětí před samotným shuntováním, tj. riziko překročení dovolených

dotkových napětí během připojení odporníku ke zhášecí tlumivce. Střízlivým doporučením je použít přídavné zařízení shuntování u sítí s kapacitním proudem nad 450 A (maximální kapacitní rozsah čistě kabelové sítě dle [1]) a dále neprovozovat kompenzované sítě VN s rozsahem vyšším než 600 A vyjma důsledného prověření kvality uzemnění.

Sítě s kapacitním proudem v rozmezí mezi dosažitelným induktivním proudem běžné zhášecí tlumivky 380 A (5 MVar) a výše uvedeným proudem 450 A, navrhuji řešit prověření bezpečného provozu se zemním spojením mimo doplnění zařízení shuntování. V případě nevyskytujících se rizik instalovat zde shuntování pouze s kladným ekonomickým hodnocením.

Nutno podotknout, že pro výpočet maximální hodnoty kapacitní oblasti za použití shuntování se v nejlepším případě musí provést podobná (zjednodušená) analýza jako v této disertační práci s konkrétními parametry řešené sítě. Dále je třeba zvážit její kapacitní nesymetrii, velikost zatížení vzdálených odběrů vzhledem k impedanci shuntu, nalézt trafostanici nebo jiné místo s obecně nejhorším uzemněním podle návodu v kapitole 2.1., provést zde měření zemní impedance a teprve poté lze stanovit, zda je vhodné tuto síť provozovat se systémem shuntování a popřípadě v jakém kapacitním rozsahu. Samozřejmě připadá v úvahu také varianta vylepšení uzemnění v místech, kde by mohlo vzniknout nebezpečné dotykové napětí. Pokud bude stanovený kapacitní rozsah sítě podmíněn funkčností systému shuntování, přinese tento „nový typ“ provozu sítě se zemním spojením všechna rizika definovaná v předchozí kapitole.

Finančně nejnáročnější variantou řešení problematiky vysokých kapacitních proudů je výstavba nové transformovny. Tu ovšem v tuto chvíli nedoporučuji, protože tento rozvoj distribuční sítě má korespondovat s růstem zatížení soustavy, připojováním nových odběratelů a výrobců elektřiny.

## 7. Závěr

V úvodních kapitolách této práce jsem představil cíle mého výzkumu s důrazem na uvedení příčin analýzy aktuální problematiky. Měření kapacitních proudů v uplynulé dekádě potvrzují jejich plynulý nárůst, který jsem odůvodnil častější kabelizací VN sítí. To jsem také doložil zpracovaným historickým přehledem délek nově vystavěných nebo rekonstruovaných kabelových vedení VN od roku 1990. Zajímavým zjištěním se stal enormní nárůst kapacitních proudů měřených oblastí v uplynulých třech letech, jež byl způsoben množstvím nových přírodních kabelových vedení k obnovitelným zdrojům energie a také snahou provozovatele distribuční soustavy zajistit co nejvyšší kontinuitu a spolehlivost dodávky provozem kompenzovaných sítí VN větších rozsahů. Závěrem úvodní části rešeršním způsobem krátce komentuji dostupné způsoby omezení zbytkového proudu v místě poruchy, kde upozorňuji zejména na diskutovanou metodu shuntování.

S ohledem na provoz kompenzovaných sítí VN během zemního spojení jsem rozpracoval problematiku dovolených dotykových napětí na neživých částech elektrického zařízení. Cílem této kapitoly bylo z pohledu platných norem ukázat důležitost problematiky rozsáhlých kapacitních oblastí a metod omezení zbytkových proudů. Vypočtené grafické závislosti v této kapitole poslouží mimo jiné ke zjištění, zda konkrétní síť se změřenou impedancí uzemnění vyhoví na podmínku dovolených dotykových napětí, a nebo se musí kvůli jejímu kapacitnímu rozsahu zajistit dodatečné zařízení k omezení zbytkových proudů.

Statistikou poruch v distribuční síti VN jsem potvrdil nezbytnost řešeného tématu. Podstatným zjištěním se ukázalo ověření obecně známého tvrzení nejvyššího podílu zemních spojení ve skladbě reálných poruch, které se nejčastěji vyskytují na venkovních vedeních. Tento fakt a uvedené počty zemních poruch na jednotlivých typech zařízení přispívají také k závěrům zdůvodnění instalace zařízení shuntování v čistě kabelových nebo smíšených sítích.

Vzhledem k předmětnému výzkumu omezení zbytkových proudů zemních spojení, jehož důsledkem se má zajistit bezpečný provoz kompenzované sítě VN velkého rozsahu, jsem zaměřil svou analýzu na testování účinnosti metody shuntování, k čemuž bylo nutné vytvořit doposud chybějící teoretický základ.

V teoretické části této práce jsem se nejprve obecněji zaměřil na rozbor dvou simultánních poruch, což se ukázalo dostatečné ke zkoumané problematice. Vycházel jsem ze známé metody souměrných složek aplikované do teorie dvojbranů. Tuto metodiku, napříč odbornými kruhy poměrně neznámou, jsem vyhodnotil jako vhodný nástroj pro řešení násobných poruch. Detailně jsem popsal teoretické řešení dvou simultánních poruch v jakýchkoliv fázích třífázového systému a navrhl ilustrací doplněný postup, který umožňuje jednodušší nastavení základních parametrů výpočtu poruch v odlišných fázích. Náhradní schémata nesymetrických poruchových stavů složená ze složkových T-článků poskytují transparentní řešení dvou simultánních poruch v radiálně řazené síti, a proto jsem je použil pro analýzu metody přizemnění postižené fáze.

Správnost nově navržené metodiky bylo nutné verifikovat s uznávaným dokumentem či postupem. V kapitole 4.3.2. jsem provedl úspěšnou verifikaci nové metodiky s normou ČSN EN 60909-3.

Simulacemi mnoha poruchových stavů, které mohou během shuntování nastat, jsem ověřoval účinnost zařízení shuntování německého výrobce mat - Dr. Becker GmbH. Dále jsem se zabýval jeho praktickou instalací a také správností podmínek vyhodnocení postižené fáze. Všechny výsledky shrnuji v kapitole 5.9. Porovnáním výsledků simulací s měřeními z provedených zkoušek se potvrdila správnost sestaveného náhradního schématu shuntování a navrženého přístupu ověření jeho účinnosti.

Obecně zařízení shuntování ve většině případů zemních spojení sníží zbytkový proud. V extrémním případě nemá shuntování žádný efekt na omezení zbytkového proudu. Při zhodnocení této metody však upozorňuji také na zásadní nevýhody dané konstrukcí, tj. maximálním oteplením rezistoru a teoreticky vypočítanými stavy, kdy podle mého názoru nedojde k přizemnění postižené fáze. Těmto negativům by mohlo předejít zařízení tuzemského výrobce, jehož stinné stránky jsem závěrem disertační práce také komentoval.

Závěrem celé práce doporučuji provozovatelům distribučních soustav způsoby provozu sítí s vysokými kapacitními proudy v závislosti na jejich provedení. Mimo jiné jsem navrhl inovativní hranice kapacitních proudů 380 A, 450 A a 600 A, dle kterých předpokládám zvážení budoucí instalace zařízení shuntování. Důraz ale kladu na bezpečnost, a tedy provoz sítí s vysokými kapacitními proudy a jejich kompenzací lze připustit až po důkladném přezkoumání kvality uzemnění rizikových míst.



## 7.1. Resumé

Na základě výsledků teoretické analýzy v této disertační práci a zároveň praktických měření doporučuji se ubírat v pilotních projektech směrem instalací pokusných zařízení shuntování do sítí s velkou kapacitní nesymetrií a častým výskytem zemních spojení za účelem sledování funkčnosti podmínek zjištění postižené fáze.

Zdali je skutečně nutná instalace tohoto zařízení do rozvodny VN, navrhuji posoudit konkrétně k provedení a stavu hodnocené sítě, jak blíže uvádím v kapitole 6. Mimo jiné poukazuji na to, že pohled se má směřovat také k technicko-ekonomickému posouzení instalace shuntování vzhledem k četnostem poruch a době jejich trvání v konkrétní VN síti. Zvážením výsledků z provedené statistiky poruch, kde na kabelech bylo zjištěno jen 10 % z celkového množství zemních spojení, vede ke skepsi použití shuntování v čistě kabelových sítích. Ovšem ve smíšených sítích se jeho význam v některých případech stává opodstatněný. Z pohledu metody shuntování za předpokladu budoucího vyloučení zjištěných podstatných nedostatků existuje perspektiva jeho dalších instalací v sítích VN s vyššími kapacitními proudy.

Jelikož jsem v disertační práci podrobně analyzoval aktuálně diskutovanou metodu zajištění bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu během zemního spojení, zhodnotil její účinnost, definoval možnosti použití, upozornil na rizika a závěrem doporučil provozovatelům distribučních soustav, jak přistupovat k problematice vysokých kapacitních proudů, byly podle mého názoru stanovené cíle splněny.

## **7.2. Resume**

Based on the results of theoretical analysis in this thesis and also practical measurements, I recommend to focus the installation of test shunt resistor (or reactor) equipment to the network with a high internal unbalanced of phase susceptances and frequent occurrence of earth faults for the purpose to monitor the functionality of conditions to detect the affected phase.

I also recommend to consider, whether it is really necessary to install this equipment in substation specifically to the character and condition of assessed network, as I presented in detail in Chapter 6. Moreover, I remark that the focus should be directed to the technical-economic assessment of installation due to the failure rates and their duration in the particular MV network. The results of the faults statistics lead to skepticism about using shunt equipment only in cable MV networks because there were found just 10% of the total earth faults. However, its importance becomes well verified in some cases of the networks with overhead lines. From my point of view there is the prospect for other installations of shunt equipment in the MV networks with higher capacitive currents assuming the future exclusion of the identified significant weaknesses.

In my opinion, the targets of my PhD thesis have been complied because I have analyzed in detail the currently discussed method to ensure the safe operation of middle voltage compensated networks with earth fault, assessed its efficiency, defined application possibilities, highlighted the risks and finally recommended to distribution companies the approach to the issue of high capacitive currents.

### 7.3. Přínosy disertační práce

Přínosy disertační práce lze rozdělit do dvou sfér: přínosy pro vědu a pro praktickou elektroenergetiku.

Co se týče vědního oboru elektroenergetiky, významný přínos spatřuji ve vytvoření nové experimentální metodiky, jejíž aplikace nebyla dosud provedena. Podrobné teoretické vysvětlení a popis tuto metodiku přiblíží pro její robustnost také jiným výpočtům než v této disertační práci, což doporučuji k dalšímu výzkumu. Jako další přínos teoretické části vyzdvihnu rozšíření obecné teorie dvojbranů a její lokalizaci na české poměry distribučních sítí VN s kompenzací kapacitních proudů. Zpracované statistické údaje o reálných poruchách, popř. nárůstu podílu kabelových sítí konkrétního distributora budou užitečné vědeckým pracovníkům při řešení obdobné problematiky.

Na poli praktické elektroenergetiky předpokládám zásadní přínos ve vyřešení otázky účinnosti metody přizemnění postižené fáze, neboť teoretická nejednoznačnost nedovolovala rozšířit pokusná nasazení tohoto zařízení a jeho zavedení do podnikových norem. Podstatnými aktivy pro provozovatele distribučních soustav je řada doporučení pro budoucí uplatnění metody shuntování a zhodnocení bilance výhod a nevýhod. V neposlední řadě zmíním navržené inovativní meze kapacitních oblastí vzhledem k volbě instalace zařízení shuntování.

Vědeckým i praktickým účelům poslouží vytvořené náhradní schéma shuntování verifikovanou metodou, jehož správnost také podpořily výsledky z praktických měření. Užitečné jsou doložené programy MATLAB, pomocí kterých může zainteresovaný řešitel jednoduchou úpravou parametrů analyzovat konkrétní síť, kde zamýšlí instalovat systém shuntování.

## 8. Doporučení k dalšímu výzkumu

Doporučuji pokračovat v analýze metody přizemnění postižené fáze a zabývat se otázkami, na které poukázala tato disertační práce. Jedná se například o výpočty stavu přizemnění postižené fáze během připojení sekundárního odporníku ke zhášecí tlumivce, provedení detailnějšího prověření systému SGR nebo výpočtů neprověřených typů poruch při aktivním shuntování. V neposlední řadě by bylo zajímavé řešit problém přetrženého vodiče na VN straně distribučního transformátoru, kdy existuje obava z nežádoucího průchodu proudu zátěže zemní cestou. Zároveň problematika přetrženého vodiče souvisí s podmínkami detekce postižené fáze, neboť se intenzivněji projeví kapacitní nesymetrie. Budoucí výzkum shuntování doporučuji také rozšířit o transienční děje použitím vhodného simulačního software.

V navržené experimentální metodice řešení dvou simultánních poruch pomocí teorie dvojbranů by bylo užitečné dále pokračovat rozbořem simultánních poruch v n-uzlové síti. Tento přístup se sice ukázal jako nevhodný k zaměření této práce, avšak v jiných aplikacích může být velmi účinným nástrojem, protože vychází z impedanční matice celé sítě. Nabízí se tedy příležitost výpočty simultánních poruch po jejich bližším prozkoumání doplnit do výpočetních programů zabývajících se ustálenými chody sítě, popř. výpočty zkratů, jejichž uplatnění by se poměrně jednoduchou úpravou rozšířilo o nadstavbu řešení dvou simultánních, příčných, podélných, jednofázových i vícefázových poruch.

## 9. Použitá literatura

- [1] NORMA ČSN 33 3070. *Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. 1981.
- [2] PROCHÁZKA, K. *Vybrané problémy provozu distribučních sítí VN*. Příručka pro provozní pracovníky. 1992.
- [3] MERTLOVÁ, J., HEJTMÁNKOVÁ, P., TAJTL, T. *Teorie přenosu a rozvodu*. FEL ZČU v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-307-8.
- [4] MERTLOVÁ, J., NOHÁČOVÁ, L. *Elektrické stanice a vedení*. FEL ZČU v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7
- [5] JALEC, M. *Limity rozšiřování VN sítí vzhledem na zemné kapacitné prúdy a dotykové napätia*. Sborník konference CIRED 2010. Tábor, 2010. ISBN 978-80-254-8519-4.
- [6] KAŠPÍREK, M., VOGEL, M. *Kabelové a venkovní vedení: Technicko-ekonomické zhodnocení variant výstavby a obnovy distribuční sítě NN*. Sborník konference CIRED 2010. Tábor, 2010. ISBN 978-80-254-8519-4.
- [7] HLACH, J. *Výpadky dodávky způsobené pojistkami VN*. Sborník konference CIRED 2010. Tábor, 2010. ISBN 978-80-254-8519-4.
- [8] ŽÁK, F., HANŽLÍK, T. *Ladění zhášecích tlumivek*. Sborník konference CIRED 2004. Tábor, 2004.
- [9] ZÁKON 458/2000 Sb. „o podmínkách podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)“
- [10] NASSER, D. T. *Power System Modelling and Fault Analysis*. Elsevier Ltd. 2008. ISBN-13: 978-0-7506-8074-5
- [11] Collective of authors. *Power System Protection Vol 1 – Principles and Components*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1995. ISBN 0 85296 834 5.
- [12] TZIOUVARAS, D. *Analysis of Complex Power System Faults and Operating Conditions*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2008. TP6327-01.
- [13] SAADAT, H. *Power System Analysis*. McGraw-Hill, 1999. ISBN 0-07-012235-0.
- [14] NOHÁČOVÁ, L., TESAŘOVÁ, M., a kol. *Problematika zemního spojení a jeho kompenzace*. Výzkumná zpráva Katedry elektroenergetiky a ekologie. FEL ZČU v Plzni, 2011.
- [15] ANDERSON, M., P. *Analysis of Simultaneous Faults by Two-Port Network Theory*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 90, No 5, pp. 2199–2205, 1971.
- [16] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Pravidla provozování distribučních soustav*. Příloha č. 2., Praha, 2011.

- [17] CIMBOLINEC, I., SÝKORA, T., ŠVEC, J., MÜLLER, Z. *Použitelnost metody přizemnění postižené fáze (shuntingu) při zemních spojeních v kompenzovaných sítích VN*. Příspěvek z konference CIRED 2009. Tábor, 2009. ISBN 978-80-254-5635-4.
- [18] TOPOLÁNEK, D., TOMAN, P., ORSÁGOVÁ, J. *Zhodnocení funkce automatiky přizemnění postižené fáze během nízkohomového zemního spojení vzhledem k nebezpečnému dotykovému napětí*. Příspěvek z konference CIRED 2011. Tábor, 2011. ISBN 978-80-905014-0-9.
- [19] KAŠPÍREK, M., JIŘIČKA, J. *Nesymetrie v distribučních sítích*. Příspěvek z konference CIRED 2010. Tábor, 2010. ISBN 978-80-254-8519-4.
- [20] Norma ČSN EN 60909-3 ed. 2: *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 3: Proudý během dvou nesoumírných současných jednofázových zkratů a příspěvky zkratových proudů tekoucích zemí*. 2010.
- [21] mat Dr. Becker GmbH. *Manual and technical data sheets Phase earthing*.
- [22] DVOŘÁK J., STARÝ P. *Ošetření místa zemního spojení a lokalizace poruchy v sítích 22 kV zařízením MAT Becker*. Interní zpráva E.ON Česká republika, s.r.o.. 2007.
- [23] *Zadání stavby – Brno Medlánky: eliminace zemních spojení*. Interní dokument E.ON Česká republika, s.r.o.. 2008.
- [24] Norma ČSN EN 50522: *Uzemňování elektrických instalací AC nad 1 kV*. 2011.
- [25] Votruba, S. *Kontrola nastavení ochran vedení 22 kV na základě rozboru poruchového záznamu ochran*. Bakalářská práce. ZČU v Plzni, 2007.
- [26] NOHÁČOVÁ, L., ŽÁK, F., MERTLOVÁ, J. *Eliminace vlivu nesymetrie příčných parametrů*. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013. ISBN 978-80-248-2988-3.
- [27] TOMAN, P., TOPOLÁNEK, D., a kol. *Posouzení vlivu přizemňování postižené fáze na bezpečnost sítí NN a vlivu velkých kapacit sítí VN na velikost dotykových napětí na společném uzemnění trafostanic*. Souhrnná zpráva z experimentálního měření 2010/2011. Brno, 2011.
- [28] PROCHÁZKA, K. *Vliv napěťových a proudových poměrů na provoz a projektování zařízení kompenzovaných sítí vn*. Sborník referátů vydaných ke konferenci Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vn. Český Krumlov: Dům techniky ČVTS České Budějovice, 1972.

## Přehled publikací a jiných aktivit v rámci Dr. studia

### Konference:

- [1] KOUBA, D. Simplified Assessment of Connectivity of Photovoltaic Power Plants in the Low Voltage Network. In Proceedings of Intensive Programme "Renewable Energy Sources". Pilsen: Department of Electric Power Engineering and Environmental Engineering, Faculty of Electrical Engineering, University of West Bohemia, 2012. pp. 1-5. ISBN 978-80-261-0130-7.
- [2] KOUBA, D. Solution of Simultaneous Faults in the High Voltage Distribution Network. In Proceedings of Conference ELEN 2012. Prague: ČVUT, 2012. pp. 1-12., ISBN 978-80-01-05096-5.
- [3] KAŠPÍREK, M., KOUBA, D., JIŘIČKA, J., MEZERA, D., HROUDNÝ, M., PROCHÁZKA, A. Problems of voltage stabilization in MV and LV distribution grids due to the operation of renewable energy sources. In Proceedings of Conference ELEN 2012. Prague: ČVUT, 2012. pp. 1-27. ISBN 978-80-01-05096-5.
- [4] KOUBA, D. Analýza účinnosti metody shuntování pomocí teorie dvojbranů. In Proceedings 16<sup>th</sup> Conference of the Czech Committee of CIGRE 2012. Tábor, 2012. pp. 1-18. ISBN 978-80-905014-1-6.
- [5] KOUBA, D. Posouzení vlivu residuálního proudu na dotyková napětí. In Elektrotechnika a informatika 2012 - část třetí - Elektroenergetika. Pilsen: University of West Bohemia, 2012. pp. 11-14. ISBN: 978-80-261-0121-5.
- [6] KAŠPÍREK, M., KOUBA, D., JIŘIČKA, J., MEZERA, D., HROUDNÝ, M., PROCHÁZKA, A. Praktické možnosti eliminace vlivu rozptýlené výroby na kvalitu napětí. Odborný seminář EGÚ Praha Engineering, a.s. - Poděbrady 2012 „Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy – 17. ročník“. Poděbrady, 2012.
- [7] KOUBA, D. Middle Voltage Cables and Their Impact on the Safe Operating. In Proceedings of International Masaryk's Conference 2012. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012, pp. 2922-2928. ISBN 978-80-905243-3-0. ETTN 042-12-12017-12-5.
- [8] KAŠPÍREK, M., KOUBA, D., JIŘIČKA, J., MEZERA, D., HROUDNÝ, M., PROCHÁZKA, A. Praktické možnosti eliminace vlivu rozptýlené výroby na kvalitu napětí. X. Konference ERÚ "Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích". Brno, 2012.
- [9] KOUBA, D., NOHÁČOVÁ, L. Solution of Two Simultaneous Faults in the middle voltage distribution network. In Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference on Energy Systems and Technologies. Cairo, Egypt, 2013. pp. 229-235. On-line Proceedings <http://www.afagscientific.com/icest2013/ICEST2013proccont.html>.

- [10] KOUBA, D., PROCHÁZKA, K. The Analysis of Efficiency of Shunt Resistor During a Single-phase Earth Fault Using the Two-port Network Theory. In Proceedings of Conference CIRED 2013. Stockholm, 2013. pp. 1-4. ISBN: 978-1-84919-732-8.
- [11] KOUBA, D., NOHÁČOVÁ, L. Two Simultaneous Faults in Middle Voltage Distribution Network. In Proceedings of the 22<sup>th</sup> International Expert Meeting Power Engineering. Maribor, Slovinsko: Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Maribor, 2013. pp. 1-8.

### **Kapitoly do knih:**

- [12] KOUBA, D. Possibilities of the Connection of Photovoltaic Power Plants in the Low-voltage Network. In Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts III. Prague : BEN - technická literatura, 2012, pp. 57-62. ISBN: 978-80-7300-460-6.

### **Přednášky:**

- [13] KOUBA, D. Připojování výroben elektřiny do distribuční soustavy. Letní energetická akademie E.ON Česká republika, s.r.o., 2010.
- [14] KOUBA, D. Limity pro připojování výroben elektřiny do distribuční soustavy. Letní energetická akademie E.ON Česká republika, s.r.o., 2011.
- [15] KOUBA, D. Provoz velkých kapacitních oblastí – metoda Shuntování. Letní energetická akademie E.ON Česká republika, s.r.o., 2013.

### **Pedagogická činnost:**

Konzultace diplomové práce Ing. Petra Bažaty: „Generování transientního signálu pro účely testování ochrany a indikátorů poruch“, VUT v Brně, 2010.

Konzultant diplomové práce Ing. Zdeněka Hadáčka: „Analýza provozu uzlu sítě 22 kV vzhledem k jednofázovým zemním poruchám“, ZČU v Plzni, 2011.

Vedení diplomové práce Ing. Josefa Hroudý: „Posouzení připojitelnosti nové výrobní elektřiny v Plané nad Lužnicí z pohledu distribuční soustavy 110 kV“, ČVUT Praha, 2012.



## Seznam grafů, obrázků a tabulek

<b>Grafy</b>	<b>strana</b>
Graf 1: Nárůst kapacitního proudu v oblasti E.ON Západ.....	13
Graf 2: Historický vývoj rozvoje a obnovy kabelových vedení VN .....	16
Graf 3: Nárůst kapacitních proudů související s rozvojem OZE .....	17
Graf 4: Závislost maximálního residuálního proudu na rezistivitě půdy.....	24
Graf 5: Závislost residuálního proudu na dotykovém napětí.....	25
Graf 6: Procentuelní rozdělení poruch dle jejich příčiny vzniku .....	28
Graf 7: Procentuelní rozdělení poruch dle jejich detekce .....	29
Graf 8: Počty zemních spojení rozdělené dle místa vzniku .....	29
Graf 9: Provozní charakteristika shuntování MAT [21] .....	63
Graf 10: Absolutní hodnoty poruchových proudů při změně odporu poruchy.....	69
Graf 11: Rozdělení proudů v závislosti na vzdálenosti poruchy od napájecí transformovny I.....	70
Graf 12: Rozdělení proudů v závislosti na vzdálenosti poruchy od napájecí transformovny II.....	70
Graf 13: Změna $R_p$ a $R_{sh}$ , vzdálenost ZS od napájecí TR 20 km.....	71
Graf 14: Změna $R_p$ a $R_{sh}$ , vzdálenost ZS od napájecí TR 10 km.....	72
Graf 15: Změna $R_p$ a $R_{sh}$ , vzdálenost ZS od napájecí TR 1 km.....	72
Graf 16: Závislost poruchových proudů na velikosti kapacitní oblasti .....	74
Graf 17: Poruchové proudy při změně velikosti kapacitní oblasti a odporu poruchy .....	75
Graf 18: Velikosti napětí na začátku a na konci vedení při změně zátěže .....	77
Graf 19: Závislost velikostí poruchových proudů na změně zátěže, $R_p = 10 \Omega$ .....	78
Graf 20: Závislost velikostí poruchových proudů na změně zátěže, $R_p = 50 \Omega$ .....	78
Graf 21: Závislost velikostí poruchových proudů na změně zátěže, $R_p = 100 \Omega$ .....	79
Graf 22: Průběh efektivních hodnot proudu poruchou $I_p$ a proudu obvodem shuntu $I_{sh}$ [27].....	81
Graf 23: Průběh efektivních hodnot proudu poruchou $I_p$ a proudu obvodem shuntu $I_{sh}$ [27].....	82
Graf 24: Průběh efektivních hodnot proudu poruchou $I_p$ a proudu obvodem shuntu $I_{sh}$ [27].....	82
Graf 25: Velikost napětí na postižené fázi při změně $R_p$ a $I_c$ .....	84
Graf 26: Velikost napětí na postižené fázi při změně $R_p$ a $C_{nes}$ .....	85
Graf 27: Fázorový diagram VN sítě s ZS, $\varepsilon = 0,012$ , $R_p = 1500 \Omega$ , vyladěná tlumivka.....	87
Graf 28: Fázorový diagram VN sítě s ZS, $\varepsilon = 0,012$ , $R_p = 1500 \Omega$ , 2 % přeladěno .....	88
Graf 29: Fázorový diagram VN sítě s ZS, $\varepsilon = 0,012$ , $R_p = 1500 \Omega$ , 5 % přeladěno .....	88
Graf 30: Velikost napětí uzlu transformátoru při změně $R_p$ a $I_c$ .....	90
Graf 31: Velikost napětí uzlu transformátoru při změně při změně $R_p$ a $C_{nes}$ .....	91
Graf 32: Časová osa zemního spojení se shuntováním .....	92

<b>Obrázky</b>	<b>strana</b>
Obrázek 1: Principiální schémata metod redukce zbytkového proudu .....	19
Obrázek 2: Schéma pro výpočet dotykového napětí na neživé části .....	22
Obrázek 3: Ilustrace celkové impedance uzemnění ve VN síti.....	23
Obrázek 4: Ilustrace pro výpočet stacionárního proudového pole tyčového zemniče.....	23
Obrázek 5: Náhradní složkové schéma jednofázové zemní poruchy.....	32
Obrázek 6: Náhradní složkové schéma dvoufázové zemní poruchy.....	33
Obrázek 7: Obecný dvojbran .....	34
Obrázek 8: N-uzlová síť se simultánními poruchami .....	36
Obrázek 9: Prvky charakteristické matice z radiální sítě .....	38
Obrázek 10: Pasivní dvojbran obrácený T-článek .....	39
Obrázek 11: Aktivní dvojbran sousledné složkové soustavy .....	40
Obrázek 12: Pasivní dvojbran pro zpětnou a nulovou složkovou soustavu.....	40
Obrázek 13: Třífázový složkový systém.....	41
Obrázek 14: Náhradní schéma simultánních poruch s impedanční maticí.....	43
Obrázek 15: Náhradní schéma simultánních poruch s admitanční maticí.....	46
Obrázek 16: Náhradní schéma simultánních poruch s hybridní maticí .....	49
Obrázek 17: Schéma sítě pro výpočet simultánních poruch.....	53
Obrázek 18: Složkové dvojbrany typu T-článek.....	54
Obrázek 19: Dvojitě zemní spojení .....	55
Obrázek 20: Teoretická interpretace dvojitěho zemního spojení.....	55
Obrázek 21: Dvojnásobné zemní spojení v síti s izolovaným uzlem .....	56
Obrázek 22: Dvojnásobné zemní spojení v kompenzované síti .....	57
Obrázek 23: Jednoduché případy dvojitých ZS dle ČSN EN 60909-3 .....	58
Obrázek 24: Systém mat - Dr. Becker GmbH [21].....	61
Obrázek 25: Shuntování v dispečerském řídicím systému .....	64
Obrázek 26: Náhradní schéma shuntování .....	66
Obrázek 27: Zemní spojení s připojeným shuntem v transformovně .....	68
Obrázek 28: Fázory poruchových proudů podladěná, vykompenzovaná a přeladěná tlumivka .....	74
Obrázek 29: Experimentální zemní spojení s přizemněním postižené fáze, foto autor.....	80
Obrázek 30: Fázorový diagram odporové a kapacitní nesymetrie během ZS.....	86
Obrázek 31: Impedanční charakteristiky distanční ochrany [14] .....	93
Obrázek 32: Impedanční charakteristika distanční ochrany během přizemnění zdravé fáze .....	94
Obrázek 33: Vzdálenost ZS podle vyhodnocené reaktance [14].....	95
Obrázek 34: Dvojnásobné a dvojitě zemní spojení.....	95
Obrázek 35: Dvojnásobné a dvojitě ZS.....	96
Obrázek 36: Fázory poruchových proudů při shuntování reaktorem.....	98

<b>Tabulky</b>	<b>strana</b>
<i>Tabulka 1: Kapacitní proudy kabelů s odlišnými izolačními materiály .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 2: Počty poruch a jejich příčiny.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 3: Počty poruch rozdělené dle jejich detekce.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 4: Převody ideálních transformátorů .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 5: Propojení složkových dvojbranů pro různé typy poruch .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6: Vypočtená napětí na konci vedení při změně zátěže .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 7: Podstatné parametry systému SGR a MAT .....</i>	<i>97</i>

## PŘÍLOHA č. 1: Výpočet v simultánních poruch MATLAB

```
function Porucha
% výpočet simultánních poruch sestavením T-článků
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

% parametry vedení z lit. [3]
l1 = 10;
l2 = 20;
R1 = 0.2454;
R0 = 0.5252;
L1 = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = 50*12.8e-9*(l1+l2); % pro kabel 50*C venk. ved.
% Lt1 = 1/(w*w*C1); % tlumivka naladěná na rezonanci

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1

% porucha ve fázi a, b, c ?
ni1 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; % a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; % a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv1 = R1 + w*L1*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na 22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
%Zn = 3*5 + w*Lt1*1j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm odpor
                        uzemnění + indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1 + Zv1 * l1;
Zkk1 = Zki1 + Zv1 * l2;
Zik0 = Zc; % (Zn*Zc)/(Zn+Zc); pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + Zv0 * l1;
Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l2;

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];
```

```

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)]
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)]

Ui = F * Uisl
Uk = F * Uksl
Ii = F * Iisl
Ik = F * Iksl

% grafický výstup v polárních souřadnicích
subplot (2,2,1)
compass(Ui);
title('Fázová napětí v uzlu i');
subplot (2,2,2)
compass(Uk);
title('Fázová napětí v uzlu k');
subplot (2,2,3)
compass(Ii);
title('Proud poruchy v uzlu i');
subplot (2,2,4)
compass(Ik);
title('Proud poruchy v uzlu k');

```

## PŘÍLOHA č. 2: Výsledek základního výpočtu

l<sub>kap</sub> =  
229.8447

U<sub>isl</sub> =  
1.0e+004 \*

1.0631 - 0.0401i  
-0.1217 - 0.1109i  
-0.9414 + 0.1510i

U<sub>ksl</sub> =  
1.0e+004 \*

1.0293 + 0.1022i  
-0.0792 - 0.2819i  
0.1424 + 0.8702i

U<sub>i</sub> =  
1.0e+004 \*

0.0000 + 0.0000i  
-1.3509 - 0.7995i  
-1.4734 + 1.2525i

U<sub>k</sub> =  
1.0e+004 \*

1.0925 + 0.6905i  
0.0000 + 0.0000i  
-0.6653 + 1.9200i

l<sub>i</sub> =  
1.0e+002 \*

5.3178 - 5.3258i  
0.0000 - 0.0000i  
0.0000 - 0.0000i

l<sub>k</sub> =  
1.0e+002 \*

0  
-5.9605 + 4.3295i  
0.0000 - 0.0000i

## PŘÍLOHA č. 3: Porovnání výpočtu s normou

```
function Porucha_kontrola
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

% parametry vedení z lit. [3]
l1 = 10;
l2 = 20;
R1 = 0.2454;
R0 = 0.5252;
L1 = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = 50*3.6e-9*(l1+l2);
Ltl = 1/(w*w*C1); % tlumivka naladěná na rezonanci

% porucha ve fázi a, b, c ?
nil = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = a*a; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = a; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv1 = R1 + w*L1*j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na 22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*j;
Zn = 15+w*Ltl*j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm odpor uzemnění +
indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*j);

%kontrola výpočtu s normou ČSN EN 60909-3 ed. 2
Z1d = Zt1+Zs1;
Z1g = Zv1 * l1;
Z1h = Zv1 * l2;
Z0g = Zv0 * l1;
Z0h = Zv0 * l2;
Ikee = (3*1*22000) / ((6*Z1d) + 2*(Z1g+Z1h) + Z0g + Z0h); %výpočet
simultánních poruch dle normy, c=1 pro Ikee_min, c=1.1 pro Ikee_max
Ikee_min = abs (Ikee)

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1 + Zv1 * l1;
Zkk1 = Zki1 + Zv1 * l2;
Zik0 = (Zn*Zc)/(Zn+Zc); % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + Zv0 * l1;
Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l2;
```

```

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0*j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0*j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)]
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)]

Ui = F * Uisl
Uk = F * Uksl
Ii = F * Iisl
Ik = F * Iksl
Iiabs = abs (Ii)
Ikabs = abs (Ik)

% grafický výstup v polárních souřadnicích
subplot (2,2,1)
compass(Ui);
title('Fázová napětí v uzlu i');
subplot (2,2,2)
compass(Uk);
title('Fázová napětí v uzlu k');
subplot (2,2,3)
compass(Ii);
title('Proud poruchy v uzlu i');
subplot (2,2,4)
compass(Ik);
title('Proud poruchy v uzlu k');

```



## PŘÍLOHA č. 4: Výsledek ověřovacího výpočtu

l<sub>kee\_min</sub> =  
741.3139

U<sub>isl</sub> =  
1.0e+004 \*  
1.0713 - 0.0497i  
-0.1173 - 0.1257i  
-0.9540 + 0.1753i

U<sub>ksl</sub> =  
1.0e+004 \*  
1.0422 + 0.1099i  
-0.0880 - 0.2852i  
0.1349 + 0.8911i

U<sub>i</sub> =  
1.0e+004 \*  
-0.0000 - 0.0000i  
-1.3652 - 0.7663i  
-1.4968 + 1.2923i

U<sub>k</sub> =  
1.0e+004 \*  
1.0891 + 0.7159i  
-0.0000 + 0.0000i  
-0.6843 + 1.9575i

l<sub>i</sub> =  
1.0e+002 \*  
5.7418 - 4.6984i  
0 - 0.0000i  
0 - 0.0000i

l<sub>k</sub> =  
1.0e+002 \*  
0  
-5.7340 + 4.6932i  
0.0000 - 0.0000i

l<sub>iabs</sub> =  
741.9083  
0.0000  
0.0000

l<sub>kabs</sub> =  
0  
740.9789  
0.0000

## PŘÍLOHA č. 5: Simulace shuntování m-files

```
function Shuntovani
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku, uzel i
% připojený shunt, uzel k porucha
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = 20;      % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
lv = 550;    % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = 300;    % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
Rl = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Rsh = 11;    %Xsh = 6*j; Shuntování reaktorem SGR
Rp = 200;
Rz_vvn_vn = 2; %0.005; reálné uzemnění transformovny
Ll = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50*C venk. ved.
%Cnes zanedbano - nemá funkci na tento výpočet shuntování
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2%,
                    0.9 pro podladění o 10%; 1.1 pro přeladění o 10%
Rtl = 3*2; %3*1; dle velikosti ztrát na komp. tlumivce (6% nebo 3%)

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1

% porucha ve fázi a, b, c ?
ni1 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Ztl = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = Rl + w*Ll*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA,přepočteno na 22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Ztl = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Ztl+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1;
Zkk1 = Zki1 + Zv * l;
Zik0 = ((Ztl*Zc)/(Ztl+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;
Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l + 3*Rp;
```

```

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0*j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0*j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)];
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = F * Iisl;
Ik = F * Iksl;

% grafický výstup v polárních souřadnicích
subplot (2,2,1)
compass(Ui);
title('Fázová napětí v místě shuntu [V]');
subplot (2,2,2)
compass(Uk);
title('Fázová napětí v místě poruchy [V]');
subplot (2,2,3)
compass(Ii);
title('Proud shuntem [A]');
subplot (2,2,4)
compass(Ik);
title('Proud poruchou [A]');

```

```

function Shuntovani_Rp
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku, uzel i
% připojený shunt, uzel k s poruchou
% testování na změnu Rp
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

for q = 1:1:1000;

% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = 20; % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
lv = 550; % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = 300; % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
Rl = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Rsh = 11;
Rp = q;
Rz_vvn_vn = 2;
Ll = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50°C venk. ved.
%Cnes = ; zanedbano
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2 %
Rtl = 6;

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1

% porucha ve fázi a, b, c ?
ni1 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = Rl + w*Ll*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na
22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Ztl = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm činný odpor
tlumivky + indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1;
Zkk1 = Zki1 + Zv * 1;
Zik0 = ((Zt1*Zc)/(Zt1+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;

```

```

Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l + 3*Rp;

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0*j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0*j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)];
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = (F * Iisl);
Ik = (F * Iksl);
Q(q) = q;
Iiq(q) = abs (Ii(1));
Ikq(q) = abs (Ik(1));
Uiq(q) = abs (Ui(2));
Ukq(q) = abs (Uk(2));
end;

plot(Q,Iiq,Q,Ikq)
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('Ip [A]          Ish [A]');

```

```

function Shuntovani_zmena_1
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku, uzel i
% připojený shunt, uzel k porucha
% testování na změnu vzdálenosti poruchy od napájecí TR při odporu
poruchy 0 Ohm
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

x=0;

for q = 0.01:0.01:25;
x=x+1;
% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = q; % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
lv = 550; % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = 300; % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
Rl = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Rsh = 11;
Rp = 0;
Rz_vvn_vn = 2;
Ll = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50*C venk. ved.
%Cnes = ; zanedbano
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2 %
Rtl = 6;

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1

% porucha ve fázi a, b, c ?
nil = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Ztl = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = Rl + w*Ll*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na
22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Ztl = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm činný odpor
tlumivky + indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Ztl+Zs1;
Zkil = Zik1;
Ziil = Zik1;
Zkk1 = Zkil + Zv * 1;
Zik0 = ((Ztl*Zc)/(Ztl+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu

```

```

Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;
Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l + 3*Rp;

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0*j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0*j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)];
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = (F * Iisl);
Ik = (F * Iksl);
Q(x) = x;
Iiq(x) = abs (Ii(1));
Ikq(x) = abs (Ik(1));
Uiq(x) = abs (Ui(2));
Ukq(x) = abs (Uk(2));
end;

plot(Q,Iiq,Q,Ikq)
xlabel('l [km]');
ylabel('Ish [A]           Ip [A]');

```

```

function Shuntovani_zmena_l_Rp
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku, uzel i
% připojený shunt, uzel k porucha
% testování na změnu délky vedení a změnu odporu poruchy
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

x=0;
lv = 550; % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = 300; % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
Rl = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Rsh = 11;
Rz_vvn_vn = 2;
Ll = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50°C venk. ved.
%Cnes = ; zanedbano
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2 %
Rtl = 6;

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1

for q = 0:0.2:25;
x=x+1;
for r = 1:1:1000;

% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = q; % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
Rp = r;

% porucha ve fázi a, b, c ?
nil = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = Rl + w*Ll*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na
22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Ztl = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm činný odpor
tlumivky + indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1;
Zkk1 = Zki1 + Zv * 1;

```



```

Zik0 = ((Zt1*Zc)/(Zt1+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;
Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l + 3*Rp;

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0*j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0*j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)];
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = (F * Iisl);
Ik = (F * Iksl);

Iiq (x,r) = abs (Ii(1));
Ikq (x,r) = abs (Ik(1));

end;
end;

subplot(1,2,1)
mesh (Iiq)
title('Poruchový proud obvodem shuntu');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('l [km]');
zlabel('Ish [A]');

subplot(1,2,2)
mesh (Ikq)
title('Poruchový proud v místě ZS');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('l [km]');
zlabel('Ip [A]');

```

```

function Shuntovani_Rp_Rsh
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku
% testování na změnu Rp při změně Rsh
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = 1; % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
lv = 550; % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = 300; % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
Rl = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Ll = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50*C venk. ved.
%Cnes = ; zanedbano
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2 %
Rtl = 6;
Rz_vvn_vn = 2;

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1;

% porucha ve fázi a, b, c ?
ni1 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = Rl + w*Ll*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na
22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Ztl = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm činný odpor
tlumivky + indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*1j);

for r = 1:1:100;
for q = 1:1:2000;
Rsh = r;
Rp = q;

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1;
Zkk1 = Zki1 + Zv * 1;
Zik0 = ((Ztl*Zc)/(Ztl+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;
Zkk0 = Zki0 + Zv0 * 1 + 3*Rp;

```

```

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0*j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0*j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)];
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = (F * Iisl);
Ik = (F * Iksl);
Iiq (r,q) = abs (Ii(1));
Ikq (r,q) = abs (Ik(1));
end;
end;

subplot (1,2,1)
mesh (Iiq)
title('Poruchový proud obvodem shuntu');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('Rsh [Ohm]');
zlabel('Ish [A]');
subplot (1,2,2)
mesh (Ikq)
title('Poruchový proud v místě ZS');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('Rsh [Ohm]');
zlabel('Ip [A]');

```

```

function Shuntovani_C1
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku, uzel i
% připojený shunt, uzel k porucha
% testování na změnu Rp
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

for q = 1:1:400;

% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = 1; % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
lv = 550; % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = q; % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
Rl = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Rsh = 11;
Rp = 20;
Rz_vvn_vn = 2;
Ll = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50°C venk. ved.
%Cnes = ; zanedbano
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2 %
Rtl = 6;

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1

% porucha ve fázi a, b, c ?
ni1 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = Rl + w*Ll*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na
22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Ztl = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm činný odpor
tlumivky + indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1;
Zkk1 = Zki1 + Zv * 1;
Zik0 = ((Zt1*Zc)/(Zt1+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;

```

```

Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l + 3*Rp;

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0*j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0*j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)];
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = (F * Iisl);
Ik = (F * Iksl);
Q(q) = q;
Iiq(q) = abs(Ii(1));
Ikq(q) = abs(Ik(1));
Uiq(q) = abs(Ui(2));
Ukq(q) = abs(Uk(2));
end;

%subplot(1,2,1)
plot(Q,Iiq,Q,Ikq)
xlabel('Ic [A]');
ylabel('Ip [A]');
Ish [A]';

```

```

function Shuntovani_C1_a_Rp
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku, uzel i
% připojený shunt, uzel k porucha
% testování na změnu délky vedení a změnu odporu poruchy
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

for q = 1:1:380;
for r = 1:1:1000;
lv = 550; % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = q; % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
R1 = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Rsh = 11;
Rz_vvn_vn = 2;
L1 = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50*C venk. ved.
%Cnes = ; zanedbano
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2 %
Rtl = 6;

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1

% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = 1; % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
Rp = r;

% porucha ve fázi a, b, c ?
ni1 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = R1 + w*L1*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na
22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Zt1 = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm činný odpor
tlumivky + indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1;
Zkk1 = Zki1 + Zv * l;
Zik0 = ((Zt1*Zc)/(Zt1+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;

```

```

Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l + 3*Rp;

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22000/sqrt(3))+0*j)); (nk1*((22000/sqrt(3)) + 0*j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)];
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = (F * Iisl);
Ik = (F * Iksl);

Iiq (q,r) = abs (Ii(1));
Ikq (q,r) = abs (Ik(1));

end;
end;

subplot(1,2,1)
mesh (Iiq)
title('Poruchový proud obvodem shuntu');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('Ic [A]');
zlabel('Ish [A]');

subplot(1,2,2)
mesh (Ikq)
title('Poruchový proud v místě ZS');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('Ic [A]');
zlabel('Ip [A]');

```

```

function Shuntovani_dU
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku, uzel i
% připojený shunt, uzel k porucha
% testování na změnu Uk
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = 20; % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
lv = 550; % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = 300; % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
Rl = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Rsh = 11;
Rp = 100;
Rz_vvn_vn = 2;
Ll = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50°C venk. ved.
%Cnes = ; zanedbano
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2 %
Rtl = 3*1;

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1

% porucha ve fázi a, b, c ?
ni1 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = 1; %a*a; % pro poruchu ve fázi b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = 1; %a; % pro poruchu ve fázi b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = Rl + w*Ll*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na
22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Ztl = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu, 5 Ohm činný odpor
tlumivky + indukčnost tlumivky
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1;
Zkk1 = Zki1 + Zv * l;
Zik0 = ((Zt1*Zc)/(Zt1+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;
Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l + 3*Rp;

```



```

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 ((ni1/nk1)*Zik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

Z2 = [Zii1 ((ni2/nk2)*Zik1);
      ((nk2/ni2)*Zki1) Zkk1];

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

% změna napětí v uzlu k způsobená zátěží
Ukf = [(13164+0*j) (13101-38*j) (13005-96*j) (12841-191*j) (12671-287*j)
      (12495-382*j) (12312-478*j) (12121-573*j)];

for q = 1:1:8;
% výpočet simultánních poruch
E = [(ni1*((22800/sqrt(3))+0*j)); (nk1*(Ukf(q)))]';
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;

Iisl = IxIy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Iksl = IxIy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Uy1 = E-Z1*IxIy;
Ux2Uy2 = -Z2*IxIy;
Ux0Uy0 = -Z0*IxIy;
Uisl = [Ux1Uy1(1)*(1/ni1); Ux2Uy2(1)*(1/ni2); Ux0Uy0(1)];
Uksl = [Ux1Uy1(2)*(1/nk1); Ux2Uy2(2)*(1/nk2); Ux0Uy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = (F * Iisl);
Ik = (F * Iksl);

Iiq (q) = abs (Ii(1));
Ikq (q) = abs (Ik(1));
Uiq (q) = abs (Ui(2));
Ukq (q) = abs (Uk(2));
end;
Iq = [0 10 25 50 75 100 125 150];

plot(Iq,Iiq,Iq,Ikq)
xlabel('Izátěže [A]');
ylabel('Ip [A]; Ish [A]');

```

```

function Napeti_Rp_C
% výpočet napětí na porušené fázi, popř. napětí Un, změna C a
% Rp

% vstupy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
Uf = 22000/(sqrt(3));

for r = 50:50:500;
    Crez = 40*3.6e-9*r;
    Gc = (w*Crez)/35;    %svod je 30-40x menší než kapacitní susceptance
    Rc = 1/Gc;
    Ikap = 3*Uf*w*Crez
    Rtl = 100*(12701/Ikap); %platí pro paralelní náhradní odpor tlumivky
    Ltl = 0.98*(1/(3*w*w*Crez));
    Cnes = 0.01*3*Crez;    %kapacitní nesymetrie z činitele nesymetrie
                           sítě do 1%

    for q = 50:50:2000;
        Rp = q;
        Un = Uf * ((1/Rp + j*w*Cnes)/(1/Rp + 1/Rtl + 3/Rc + (j*3*w*Crez +
            j*w*Cnes - j*(1/(w*Ltl)))));
        Un_ef(r/50,q/50) = abs (Un);
        Ipor = Un * (1/Rtl + 3/Rc + (j*3*w*Crez - j*(1/(w*Ltl))));
        Ua(r/50,q/50) = abs (Ipor) * Rp;
    end;

end;

mesh (Ua); %Un_ef
title('Napětí na postižené fázi');    %Napětí uzlu transformátoru
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('Ic [A]');
zlabel('Ua [V]');    %Un

```

```

function Napeti_Rp_Cnes
% výpočet napětí na postižené fázi, popř. napětí Un, změna Cnes a
% Rp

% vstupy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
Uf = 22000/(sqrt(3));
Crez = 62*3.6e-9*300;
Ikap = 3*Uf*w*Crez
Ltl = 0.98*(1/(3*w*w*Crez));
Gc = (w*Crez)/35;          %svod je 30-40x menší než kapacitní susceptance
Rc = 1/Gc;
Rtl = 100*(12701/Ikap); %platí pro paralelní náhradní odpor tlumivky

for r = 10:10:100;
    Cnes = 0.0001*3*Crez*r; %kapacitní nesymetrie z činitele
                                nesymetrie sítě do 1%
    for q = 50:50:2000;
        Rp = q;
        Un = Uf * ((1/Rp + j*w*Cnes)/(1/Rp + 1/Rtl + 3/Rc + (j*3*w*Crez +
            j*w*Cnes - j*(1/(w*Ltl)))));
        Un_ef(r/10,q/50) = abs (Un);
        Ipor = Un * (1/Rtl + 3/Rc + (j*3*w*Crez - j*(1/(w*Ltl))));
        Ua(r/10,q/50) = abs (Ipor) * Rp;
    end;
end;

mesh (Ua); %Un_ef
title('Napětí postižené fáze');          %Napětí uzlu transformátoru
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('Činitel nesymetrie [-]');
zlabel('Ua [V]');                        %Un

```

```

function Nesymetrie_faz_diag
% výpočet napětí Un, Ua, Ub, Uc, Rp + Cp nesymetrie
% vstupy
j = sqrt(-1);
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
w = 2*pi*50;
Uf = 22000/(sqrt(3));
C = 371*3.6e-9*50;

Ltl = (1/(3*w*w*C));
Cp = 0.012*3*C;
Ikap = 3*Uf*w*C
Rtl = 100*(12701/Ikap); % platí pro paralelní náhradní odpor tlumivky
Rp = 1500;
Gp = 1/Rp;
G = (w*C)/35; % svod je 30-40x menší než kapacitní susceptance
Bp = j*w*Cp; % přeladění tlumivky
k = 1.05;
Un = Uf * (((Gp+Bp))/(1/Rtl + 3*G + Gp + j*(3*w*C + w*Cp -
(k*(1/(w*Ltl))))));

Ua = (Uf - Un);
Ub = (a*a*Uf - Un);
Uc = (a*Uf - Un);
Ua_ef = abs (Ua)
Ub_ef = abs (Ub)
Uc_ef = abs (Uc)
Un_ef = abs (Un)
Upoz = 0.8 * Uf

% Napeti fáze a
PlotXY=Ua;
PlotX1=[real(Un), Uf];
PlotY1=[imag(Un), 0];

% Napeti fáze b
PlotXY=Ub;
PlotX2=[real(Un), -(Uf/2)];
PlotY2=[imag(Un), -(Uf*(sqrt(3)/2))];

% Napeti fáze c
PlotXY=Uc;
PlotX3=[real(Un), -(Uf/2)];
PlotY3=[imag(Un), (Uf*(sqrt(3)/2))];

% Napeti Un
PlotXY=Un;
PlotX4=[real(PlotXY(1)), 0];
PlotY4=[imag(PlotXY(1)), 0];

plot(PlotX1,PlotY1,'r+',PlotX1,PlotY1,'r-', ...
      PlotX2,PlotY2,'g+',PlotX2,PlotY2,'g-', ...
      PlotX3,PlotY3,'b+',PlotX3,PlotY3,'b-', ...
      PlotX4,PlotY4,'k+',PlotX4,PlotY4,'k-');
title('Napětí: U_a_p (červená), U_b_p (zelená), U_c_p (modrá), U_N
(černá)');
xlabel('Real. [V]');
ylabel('Imag. [V]');
grid on;
axis equal;

```

```

function Shuntovani_H
% výpočet simultánních poruch sestavením impedančních T-článku
% axiomy
j = sqrt(-1);
w = 2*pi*50;
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
F = [1 1 1;
     a*a a 1;
     a a*a 1];

% parametry prvků sítě, parametry vedení z lit. [3]
l = 20; % vzdálenost poruchy od napájecí transformovny
lv = 550; % součet délek venkovních vedení napájené oblasti
lk = 300; % součet délek kabelových vedení napájené oblasti
Rl = 0.2454;
R0 = 0.5252;
Rsh = 11;
Rp = 30;
Rz_vvn_vn = 2;
Ll = 0.92e-3;
L0 = 5.34e-3;
C1 = (3.6e-9*lv) + (50*3.6e-9*lk); % pro kabel 50*C venk. ved.
%Cnes = ; zanedbano
Ltl = 0.98*(1/(w*w*C1)); % tlumivka podladěná o 2 %
Rtl = 3*1;

% kontrolní výpočet kapacitního proudu
Ikap = 3*(22000/(sqrt(3)))*w*C1;

% porucha ve fázi a, b, c ?
ni1 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk1 = a; % pro poruchu ve fázi a-b
ni2 = 1; % pro poruchu ve fázi a
nk2 = a*a; % pro poruchu ve fázi a-b

% sousledná složka
Zt1 = 0.138 + 2.324*1j; % z lit. [2], přepočteno na 22kV
Zv = Rl + w*Ll*1j;
Zs1 = 0.0278 + 0.278*1j; % z lit. [2], pro Ik3=10kA, přepočteno na
22kV

% nulová složka
Zv0 = R0 + w*L0*1j;
Ztl = Rtl + w*Ltl*1j; % pro kompenzaci kap. proudu
Zc = 1/(w*C1*1j);

% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zik1 = Zt1+Zs1;
Zki1 = Zik1;
Zii1 = Zik1;
Zkk1 = Zki1 + Zv * l;
Zik0 = ((Zt1*Zc)/(Zt1+Zc)) + 3*Rz_vvn_vn; % pro kompenzaci kap. proudu
Zki0 = Zik0;
Zii0 = Zik0 + 3*Rsh;
Zkk0 = Zki0 + Zv0 * l + 3*Rp;

% definice složkových matic
Z1 = [Zii1 Zik1;
      Zki1 Zkk1];

```

```

Z0 = [Zii0 Zik0;
      Zki0 Zkk0];

Hi1 = -(det(Z1))/Zkk1;
Hik1 = -Zik1/Zkk1;
Hki1 = Zki1/Zkk1;
Hkk1 = 1/Zkk1;
Hi0 = -(det(Z0))/Zkk0;
Hik0 = -Zik0/Zkk0;
Hki0 = Zki0/Zkk0;
Hkk0 = 1/Zkk0;

H1 = [Hi1 ((ni1/nk1)*Hik1);
      ((nk1/ni1)*Zki1) Zkk1];

H2 = [Hi1 ((ni2/nk2)*Hik1);
      ((nk2/ni2)*Hki1) Hkk1];

H0 = [Hi0 Hik0;
      Hki0 Hkk0];

% výpočet simultánních poruch
E = [((22000/sqrt(3))+0*j); ((22000/sqrt(3)) + 0*j)];
EI1 = [-1 (Zik1/Zkk1); 0 (1/Zkk1)] * E;
EI = [ni1*(EI1(1)); nk1*(EI1(2))];

H = H1+H2+H0;
IxUy = H\EI;

Iisl = IxUy(1) * [1/ni1; 1/ni2; 1];
Uksl = IxUy(2) * [1/nk1; 1/nk2; 1];
Ux1Iy1 = EI-H1*IxUy;
Ux2Iy2 = -H2*IxUy;
Ux0Iy0 = -H0*IxUy;
Uisl = [Ux1Iy1(1)*(1/ni1); Ux2Iy2(1)*(1/ni2); Ux0Iy0(1)];
Iksl = [Ux1Iy1(2)*(1/nk1); Ux2Iy2(2)*(1/nk2); Ux0Iy0(2)];

Ui = F * Uisl;
Uk = F * Uksl;
Ii = F * Iisl;
Ik = F * Iksl;

% grafický výstup v polárních souřadnicích
subplot (2,2,1)
compass(Ui);
title('Fázová napětí v místě shuntu [V]');
subplot (2,2,2)
compass(Uk);
title('Fázová napětí v místě poruchy [V]');
subplot (2,2,3)
compass(Ii);
title('Proud shuntem [A]');
subplot (2,2,4)
compass(Ik);
title('Proud poruchou [A]');

```

Název tématu:            Disertační práce na téma  
                                  *Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu*

Zpracoval:                Ing. Daniel Kouba

Náklad:                    3 výtisky

Počet stran:               143

Počet grafů:              32

Počet obrázků:            36

Počet tabulek:            7

