

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Přechod z přímo uzemněného uzlu sítě na kompenzaci
zemních kapacitních proudů**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub VANĚK**
Osobní číslo: **E12N0171P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Přechod z přímo uzemněného uzlu sítě na kompenzaci zemních kapacitních proudů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište základní informace k provozu sítě vn s přímo uzemněným uzlem.
2. Uveďte vlastnosti sítí s uzlem uzemněným přes zhašecí tlumivku.
3. Zpracujte analýzu vlivu jednofázových poruch na spolehlivost dodávky elektrické energie.
4. Analyzujte přechodové děje při jednofázových poruchách (popř. namodelujte přechodový děj.
5. V konkrétním případě porovnejte provoz sítě s přímo uzemněným uzlem s uzlem uzemněným přes zhašecí tlumivku.

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

1. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie, Elketnoenergetika I, II
2. Internetové podklady
3. Dle uvážení a pokynů udá konzultant
4. Příručky k použitému simulačnímu nástroji (MATLAB simulink, atd.)

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

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



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



V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na porovnání přímého uzemnění distribuční sítě s nepřímým kompenzovaným přes tlumivku. V úvodní teoretické části poukazují na základní typy uzemnění, zemní poruchy a popis souměrné složkové soustavy. Výpočtová část ukazuje chování sítě, napěťové a proudové poměry při zemním spojení a zemním zkratu.

Klíčová slova

Distribuční soustava, vysoké napětí, uzemnění, přímo uzemněná síť, zhášecí tlumivka, kapacitní proud, zemní spojení, zemní zkrat

Abstract

The master theses focus on comparison between solidly earthed (neutral) system and system earthed by arc suppression. In the first theoretic part there are mentioned the basic characteristics of a solidly earthed network and a compensated network operation. Calculation behavior of grid submitted voltage and current proportions during earth fault and short-circuit to earth.

Key words

Distribution network, high voltage, earthed, solidly earthed network, arc suppression coil, capacitive current, earth fault, short-circuit to earth

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 12.5.2014

Jakub Vaněk

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za dobré vedení během zpracování, profesionální připomínky a její ochotu a čas. Mé poděkování patří také konzultantovi Ing. Františku Žákovi za praktické podklady pro výpočty a další náhled na teoretické znalosti a rodičům za podporu při studiu.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 ZPŮSOBY PROPOJENÍ ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAV SE ZEMÍ	10
1.1 SÍŤE ÚČINNĚ UZEMNĚNÉ	11
1.2 SÍŤE IZOLOVANÉ	12
1.3 SÍŤE NEÚČINNĚ UZEMNĚNÉ.....	12
1.3.1 <i>Kompenzace přes Petersenovu zhášecí tlumivku</i>	13
1.3.2 <i>Kabelové sítě uzemněné přes odpor</i>	14
2 ZEMNÍ PORUCHY	16
2.1 ZEMNÍ SPOJENÍ.....	16
2.1.1 <i>Dokonalé zemní spojení</i>	16
2.1.2 <i>Odporové zemní spojení</i>	17
2.2 ZEMNÍ ZKRAT	19
3 METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK	20
4 VÝPOČET PORUCHOVÉHO PROUDU I_{POR} A NAPĚTÍ U_0 PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ	22
5 VÝPOČET PORUCHOVÉHO PROUDU I_{POR} A NAPĚTÍ U_0 PŘI ZEMNÍM ZKRATU	29
6 LADĚNÍ ZHÁŠECÍ TLUMIVKY	34
6.1 REZONANČNÍ METODA LADĚNÍ TLUMIVKY	35
6.2 METODA PROUDOVÉ INJEKTÁŽE	36
6.3 SEKUNDÁRNÍ ODPORNÍK	36
6.4 KONKRÉTNÍ NÁVRH ZHÁŠECÍ TLUMIVKY	37
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	41
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

U_s	sdužené napětí	(V)
U_f	fázové napětí	(V)
U_1	sousledná složka napětí	(V)
U_2	zpětná složka napětí	(V)
U_0	nulová složka napětí	(V)
I	proud	(A)
I_1	sousledná složka proudu	(A)
I_2	zpětná složka proudu	(A)
I_0	nulová složka proudu	(A)
I_{por}	poruchový proud	(A)
I_{kap}	kapacitní proud	(A)
I_R	proud protékající činným odporem	(A)
I_{TL}	induktivní proud tlumivkou	(A)
R	odpor	(Ω)
R_C	svodový odpor	(Ω)
X	reaktance	(Ω)
X_C	kapacitní reaktance	(Ω)
L	indukčnost	(H)
C	kapacita vodiče proti zemi	(F)
Z_V	impedance vedení	(Ω)
a, b, c	fázové vodiče soustavy	
\bar{a}	operátor natočení	

Úvod

Ve své předkládané práci na téma „Přechod z přímo uzemněného uzlu sítě na kompenzaci zemních kapacitních proudů“ se zaměřím na teoretické srovnání způsobů uzemnění elektrických sítí, metody jejich řešení a konkrétní výpočty napět'ových a proudových poměrů ve dvou případech. V teoretické části se s ohledem na téma budu věnovat zejména sítím přímo uzemněným a sítím uzemněným přes odpor či tlumivku. Pro přehledný popis také okrajově izolovanému uzemnění.

Pro obecné a následně konkrétní řešení sítí se užívá několik metod výpočtů. Do mé práce jsem zvolil metodu Fortesque, neboli metodu souměrných složek. Pro její dostatečnou přesnost a názorné výsledky, považuji za vhodné využít právě tuto metodu. V praxi se často setkáváme s aplikacemi Fortesque metody, ačkoli mnozí neznají pozadí výpočtů. S jejím základním popisem a konkrétním využitím vás seznámím v jedné z kapitol věnovaných této aplikaci.

Mou diplomovou práci věnuji hlavně analýze chování sítě při zemním spojení a zemním zkratu a výpočty napět'ových a proudových poměrů v závislosti na několika parametrech. Simulací poruchy se budu snažit ukázat výsledky při výpočtech zmíněnou metodou složkových soustav. Cílem práce je porovnání provozu sítě s přímo uzemněným uzlem a uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku. Způsoby chování obou sítí zobrazené na grafech prokáží, které uzemnění je vyhovující a zmíním výhody a nevýhody každého z nich. Přestože je nutné brát v potaz okolnosti jedinečného chování zadané sítě postavené na zvolených parametrech použitých zařízení, jsem přesvědčen, že výsledky budou dost vypovídající o odlišnosti přímého uzemnění a uzemnění se zhášecí tlumivkou.

1 Způsoby propojení elektrizačních soustav se zemí

Vlastnosti distribuční sítě s ohledem na způsob uzemnění uzlu transformátoru ovlivňují její základní chování při nesymetrických stavech, zejména při jednofázových zemních poruchách. Propojení fázových vodičů na provozním transformátoru trojfázové soustavy se nazývá provozní (nulový) uzel. Základní dělení uzlů soustavy je založeno na způsobu jejich spojení se zemním bodem. Každý způsob uzemnění s sebou nese jisté výhody i rizika. Volí se tak, aby bylo co nejvýhodnější.

Důležité faktory, které ovlivňují výběr typu uzemnění sítě:

- Celkový kapacitní proud v síti (velikost celkové kapacity proti zemi).
- Poruchová napětí v ustáleném stavu (stacionární rezonanční přepětí).
- Velikost poruchového proudu.
- Ferorezonanční přepětí, přenesená napětí.
- Použití přepětiových ochran.
- Způsob odstranění poruchy.
- Vliv na pomocné obvody v síti.
- Investiční a provozní náklady.
- Riziko přerušování dodávky při poruše.

V bezporuchovém stavu mají všechny symetrické sítě podobné proudové a napěťové poměry. Lišit se mezi sebou začnou až v případě poruchy, zejména při jednofázových zemních poruchách, kvůli kterým mohou sítě přejít ze symetrického stavu na nesymetrický. V takovém případě má vliv na změnu parametrů typ uzemnění sítě. [1] [2]

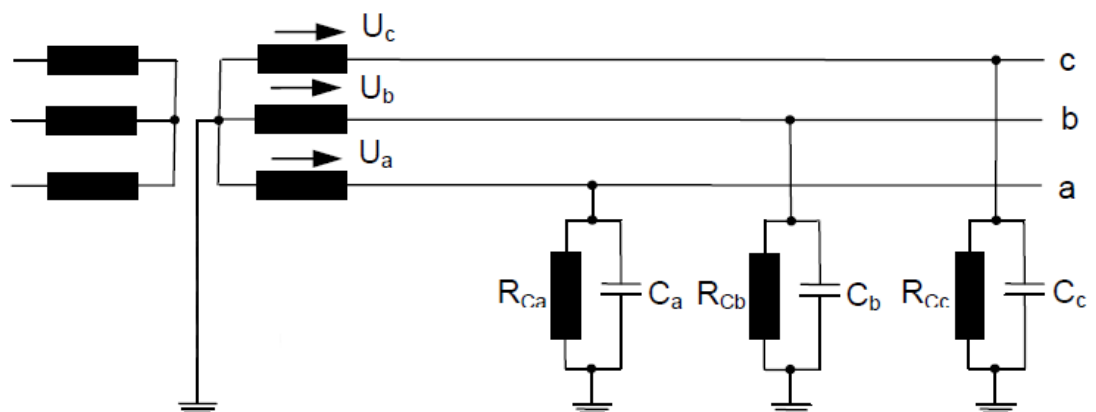
Podrobněji se podívám na typy uzemnění sítí používaných v naší distribuční soustavě.

1.1 Síť účinně uzemněné

Účinně uzemněné sítě se provozují na hladinách 400 kV, 220 kV, 110 kV a převážnou většinu nn sítí 400 V. Tyto sítě mají nulové body transformátorů spojeny přímo se zemí nebo přes malou impedanci. Někdy se odpojují nulové body některých transformátorů pro zmenšení velikosti jednofázového zkratového proudu, ale tak, aby síť měla charakter soustavy účinně uzemněné. V České republice se nulové body transformátorů uzemňují přímo.

Napětí uzlů vinutí transformátorů (při přímém uzemnění) zůstává vůči zemi prakticky nulové a napětí zdravých fází zůstává vůči zemi na fázové hodnotě. Proto se izolace vedení těchto sítí dimenzují na jmenovitá napětí fázová, což je ekonomicky velmi výhodné. Avšak vedení této sítě při spojení jedné fáze se zemí musí být v krátkém čase odpojeno, protože zemní proud (v tomto případě nazývaný zkratový proud) dosahuje obvykle značných hodnot.

Na hladině zvn a vvn jsou to až desítky kA. Takto uzemněné sítě umožňují snadné nalezení poruchy. V postižené fázi se snižuje napětí a vzrůstá proud. Proto kladou tyto typy sítí menší nároky na dimenzování izolace, a sice jen na hodnotu fázového napětí. To jsou nesporné výhody účinně uzemněných sítí. Na druhou stranu následky velikosti proudu při poruše jsou nebezpečné dotykové a krokové napětí, síť za těchto podmínek nesmíme dále provozovat. Zvyšují se tak nároky na ochrany. [1] [4]

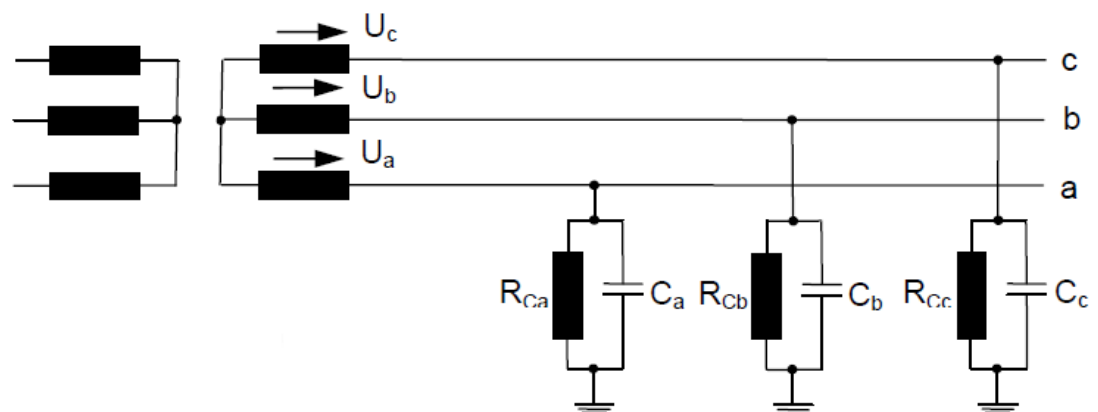


Obrázek 1.1: Účinně uzemněná síť

1.2 Síť izolovaná

Izolované sítě se provozují na hladinách vn, zřídka také na nn (ve větších průmyslových závodech). Nulové body transformátorů nejsou spojeny se zemí (jsou odizolované) a jejich impedance $Z_N \rightarrow \infty$. Napětí jednotlivých fází v bezporuchovém stavu vůči zemi je stejné. Také svodové odpory jsou přibližně symetrické. Napětí uzlu transformátoru (U_0) vůči zemi je téměř nulové. I u netransponovaného vedení je vlivem nesymetrie kapacit jednotlivých fází napětí U_0 menší než 1 % fázového napětí, což považujeme za zanedbatelné.

Veškeré neživé části elektrických zařízení jsou přímo uzemněny do země nebo je veden společný uzemňovací vodič, na který jsou vodivě připojeny všechny neživé části elektrické soustavy a sám uzemňovací vodič je uzemněn na jednom nebo více místech. V různých prostředích je nařízená hodnota odporu uzemnění různá. Totéž platí o trvalé kontrole izolačního stavu elektrické sítě a jejího vypnutí při poklesu izolačního stavu pod určitou mez. Z časového hlediska je odpojení poškozeného místa od dvojpólových a trojpólových zkratů také závislé na hladině napětí a prostředí.



Obrázek 1.2: Izolovaná síť [6]

1.3 Síť neúčinně uzemněné

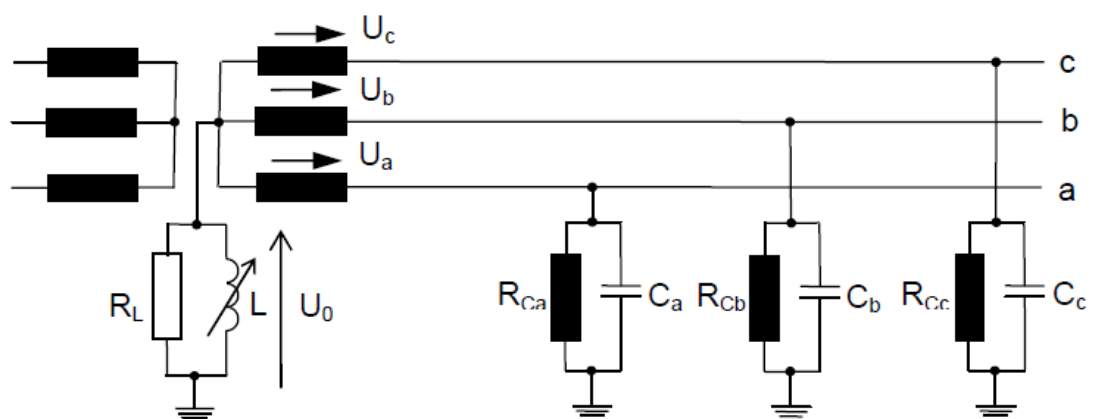
Neúčinné uzemnění v distribučních soustavách je realizováno přes impedanci. Na venkovním vedení je zastoupena tlumivkou, při kabelovém vedení odporem. V prvním případě spojení se zemí přes tlumivku se jedná o kompenzaci sítě při jednofázovém zemním spojení. Při použití odporu jde o omezení velikosti jednofázového zkratového proudu. V praxi se venkovní sítě s kompenzací používají při hodnotách kapacitního proudu kolem 100 A, smíšené sítě do hodnoty 300 A a u kabelového vedení s kompenzací dokonce až 450 A.

1.3.1 Kompenzace přes Petersenovu zhášecí tlumivku

Při jednofázovém zemním spojení teče mezi fází a zemí proud kapacitního charakteru. Zhášecí tlumivka se do nulového bodu transformátoru připojuje pro snížení kapacitního proudu. Sama je zdrojem proudu induktivního charakteru a uvažujeme-li pro zjednodušení tento proud stejně velký jako kapacitní proud, nastává tzv. vykompenzování zemního proudu. Aby toto mohlo nastat, musí být zhášecí tlumivka regulovatelná, aby se její proud mohl měnit podle zemního proudu, který je v dané síti dán celkovou délkou galvanicky spojeného vedení. Tato délka se mění buď vypínáním nebo zapínáním jednotlivých vedení a nebo rozšiřováním sítě.

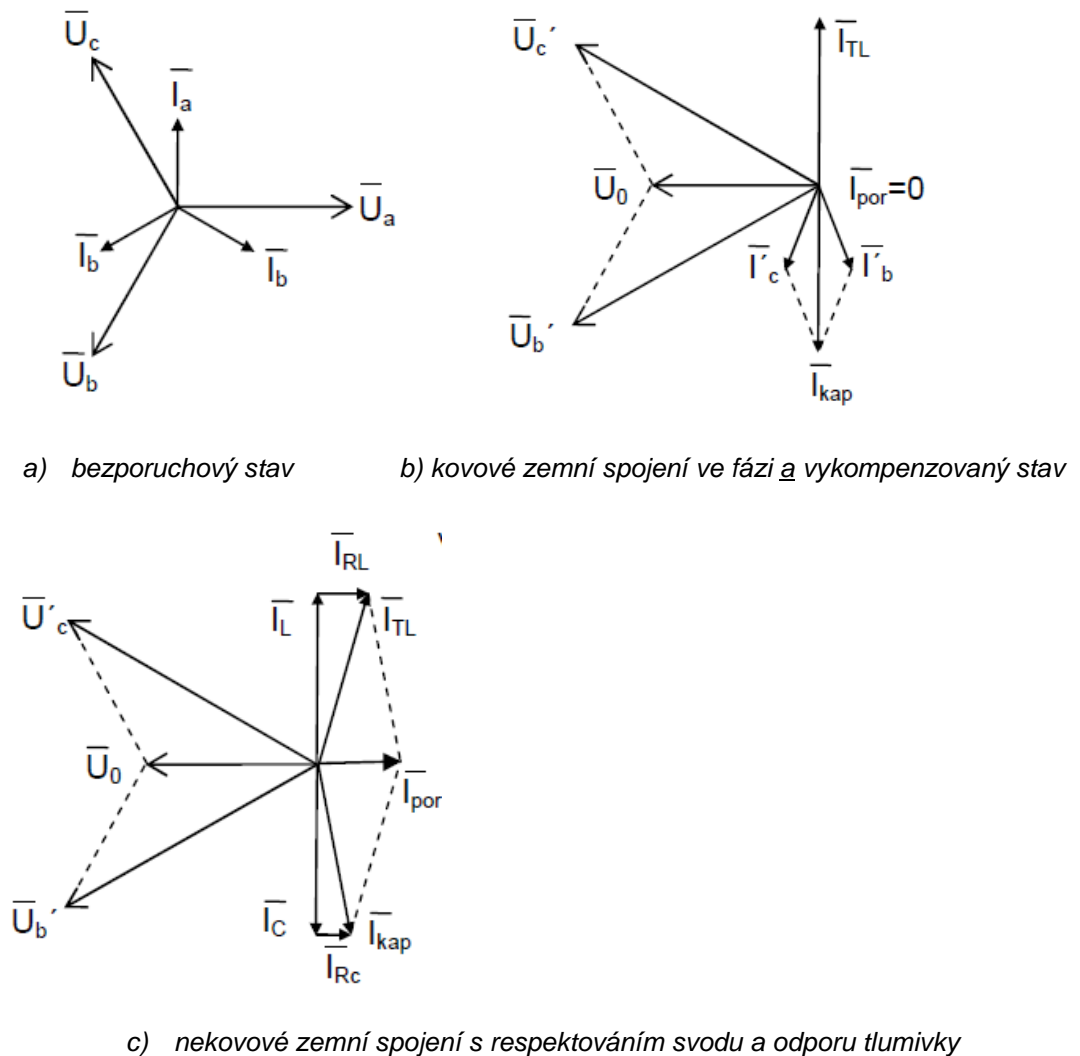
Při uvažování činné složky proudu zemního spojení a obvodu tlumivky teče místem spojení tzv. zbytkový proud. Kompenzace kapacitní složky zemního proudu má ještě další ekonomický dosah a to na uzemnění stožáru. To může být dimenzováno pouze na zbytkový proud a je tedy levnější, aniž by vzniklo nebezpečné dotykové napětí. Zhášecí tlumivka se dimenzuje s určitou rezervou výkonu. Často se volí tlumivky s o 30% větším výkonem, než je předpokládaný potřebný kompenzační výkon v síti. Nesmí se však překročit třetinový jmenovitý výkon transformátoru s alespoň jedním vinutím zapojeným do trojúhelníka. Při zemním spojení by kompenzační tlumivky neměly být zatíženy déle než 2 hodiny.

Výhodou tohoto zapojení je, že i rozsáhlejší síť lze provozovat se zemním spojením po dobu potřebnou k nalezení poruchy, takže doba přerušení dodávky elektrické energie je velmi krátká. Navíc většina přechodných zemních spojení se zháší sama.



Obrázek 1.3: Neúčinně uzemněná síť s Petersenovou tlumivkou [6]

Jednotlivé stavy před poruchou a při vzniku kovového a nekovového zemního spojení popisují následující fázorové diagramy (Obrázek 1.4). V poruchovém stavu považujeme tlumivku za již zmíněný zdroj indukčního proudu, který je otočen za napětím na této tlumivce o 90° . Vůči kapacitnímu poruchovému proudu je pootočen o 180° .



Obrázek 1.4: Fázorové diagramy [6]

1.3.2 Kabelové sítě uzemněné přes odpor

Uzemnění přes malý činný odpor se používá převážně u kabelového vedení. Při spojení fáze se zemí se sníží velikost proudu, který je u kabelů obvykle vysoký a pro kompenzaci by tak byla potřeba zhášecí tlumivka s vysokým kompenzačním výkonem. Kabelová vedení mají kapacity proti zemi několikanásobně vyšší (30 až 70 krát) než venkovní vedení. Na rozdíl od tlumivky dokáže odpor omezit také přepětí, které namáhá izolaci zdravých fází a umožňuje vypnutí obvodu za použití jednoduchých ochran.

Při návrhu sítě se činný odpor volí se jmenovitým proudem vyšším, než je kapacitní proud sítě. To znamená, poruchový proud vznikající při poruše by měl při vektorovém součtu z větší části tvořit právě proud procházející odporem.

$$\bar{I}_{por} = \sqrt{\bar{I}_R^2 + \bar{I}_C^2} [A], \quad \text{přítom } \bar{I}_R > \bar{I}_C \quad (1.1)$$

Pokud bychom chtěli tyto vysoké poruchové proudy kompenzovat pomocí zhášecí tlumivky, vyžadovalo by to tlumivky značných výkonů, které se po ekonomické stránce nevyplatí. Vzhledem k velikosti poruchových proudů v síti uzemněné přes odpor se musí úseky při poruše vypínat velmi rychle. Provoz se zemní poruchou, jako u kompenzovaných sítí, není možný. Vliv uzemnění uzlu přes odporník se nejvíce projevuje při jednofázových poruchách. U ostatních druhů poruch jsou napěťové a proudové poměry podobné jako u sítí kompenzovaných zhášecí tlumivkou.

Předchozí kapitoly byly zpracovány na základě literatury a zdrojů [1] [2] [5] a [6].

2 Zemní poruchy

2.1 Zemní spojení

Zemní spojení je jednofázová porucha vznikající v sítích, kde uzel není uzemněn přímo. Poruchový proud se totiž v sítích izolovaných a nepřímo uzemněných nemůže přes nulový bod přímo uzavírat. Poruchový proud je tedy závislý na zemních kapacitních proudech sítě. Zemní spojení způsobuje řadu nežádoucích jevů, jako výrazný pokles napětí postižené fáze a zvýšení napětí ve zdravých fázích, vznik nulové složky napětí a proudu atd. Příčiny vzniku zemních spojení jsou v praxi přeskoky na izolátorech, vodivý dotyk vodiče se zemí, průraz izolace a mnoho dalších. V některých případech se může síť vn provozovat i pokud v ní k zemní poruše dojde, např. síť kompenzovaná přes zhášecí tlumivku.

Zemní spojení se dělí na několik typů podle doby trvání a podle velikosti přechodového odporu v místě spojení na:

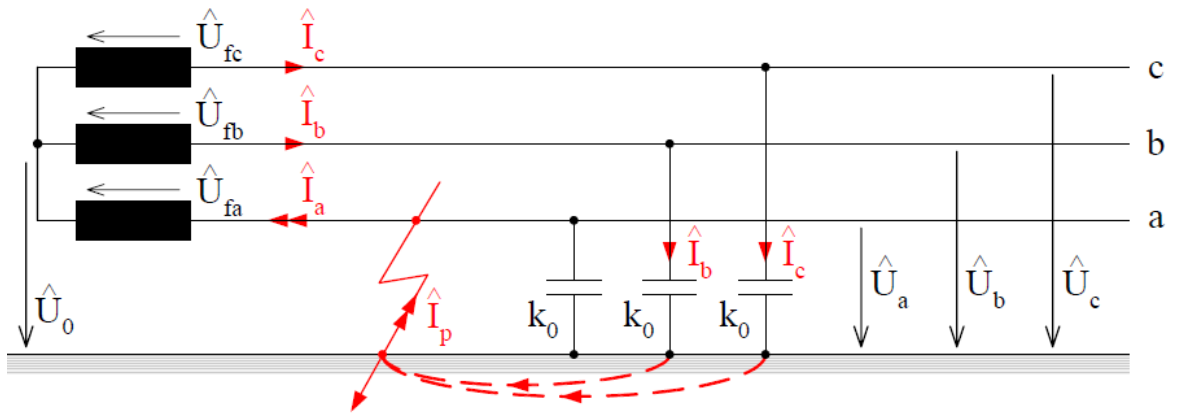
- Kovové a obloukové zemní spojení – přechodový odpor v řádech jednotek ohmů
- Odporové zemní spojení – přechodový odpor o hodnotě stovek ohmů
- Mžikové zemní spojení – doba trvání do 500 ms
- Krátkodobá zemní spojení – do 5 minut
- Trvalá zemní spojení – porucha trvá, dokud se neodstraní obsluhou
- Přerušované zemní spojení – sekvenčně se opakující zemní spojení

2.1.1 Dokonalé zemní spojení

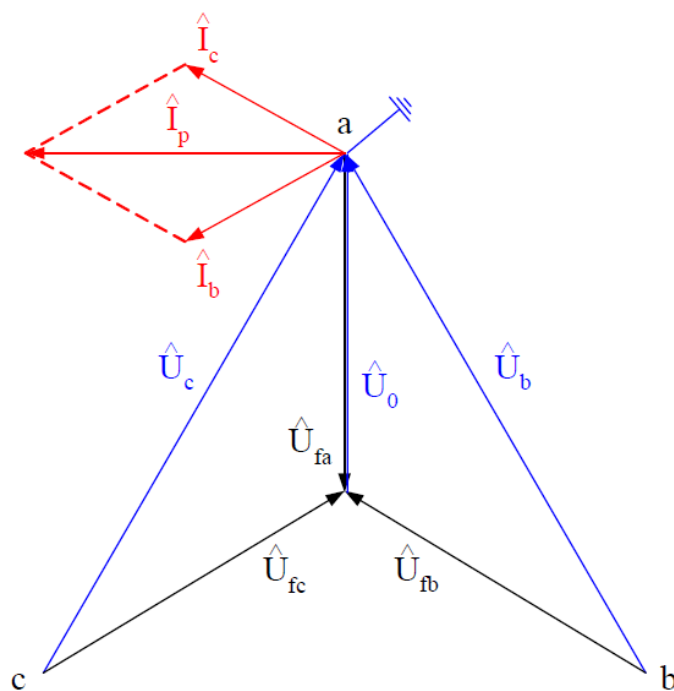
Též nazývané kovové zemní spojení je takové, při kterém velikost odporu poruchy považujeme za nulovou, resp. velmi nízkou hodnotu. Poruchový proud je složen ze dvou proudů, tekoucích kapacitami nepostižených fází. Třetí kapacita postižené fáze je překlenuta poruchou (viz. obrázek 2.1)

$$\bar{I}_{por} = \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (2.1)$$

Při dokonalém zemním spojení klesne napětí postižené fáze na nulu, napětí nepostižených fází proti zemi stoupnou na sdruženou hodnotu. Napětí uzlu transformátoru stoupne na hodnotu záporného napětí postižené fáze. Napěťové a proudové poměry jsou dobře zřejmé z fázorového diagramu na obrázku 2.2.



Obrázek 2.1: Dokonalé zemní spojení v souměrné síti [8]

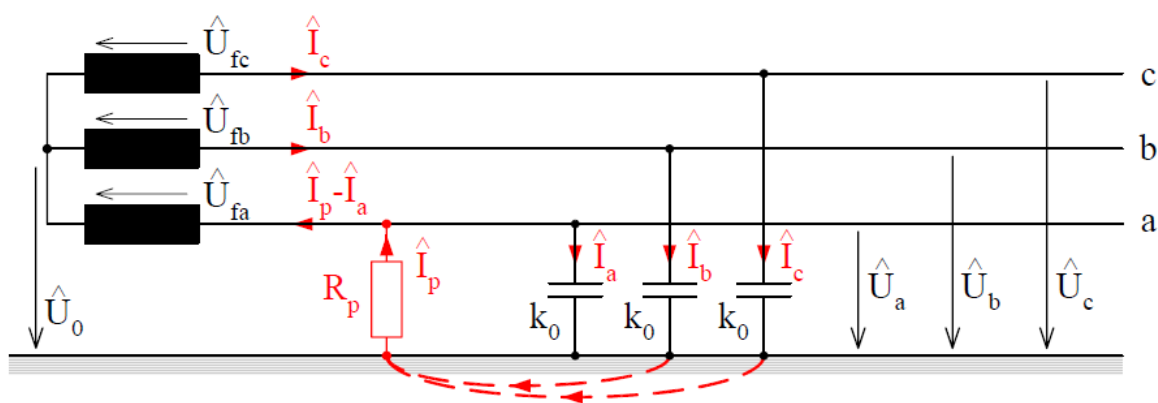


Obrázek 2.2: Fázorový diagram napětí a proudů při dokonalém zemním spojení [8]

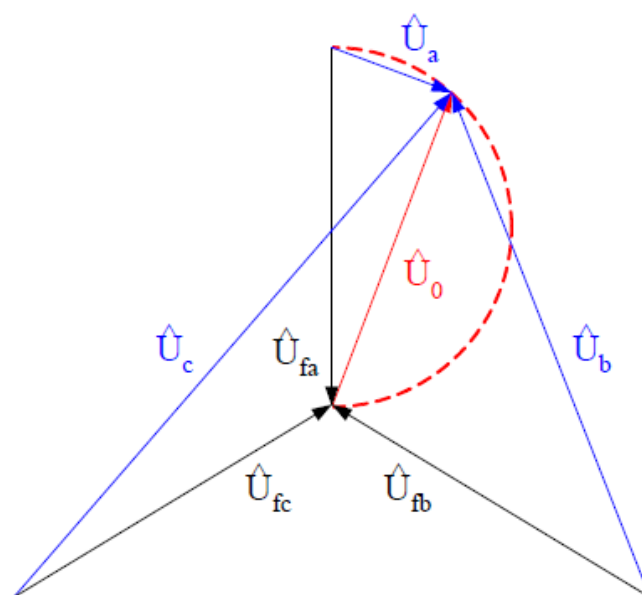
2.1.2 Odporové zemní spojení

Těž nazývané nekovové zemní spojení. O takovém spojení mluvíme v případě, že hodnota odporu v místě poruchy je nezanedbatelná, řádově několik set ohmů. Napětí postižené fáze proti zemi je nenulové a pro poruchový proud platí:

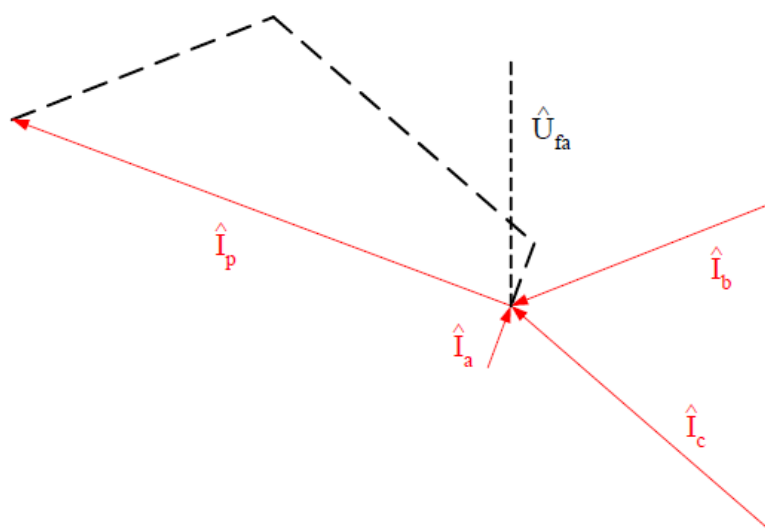
$$\bar{I}_{por} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (2.2)$$



Obrázek 2.3: Odporové zemní spojení [8]



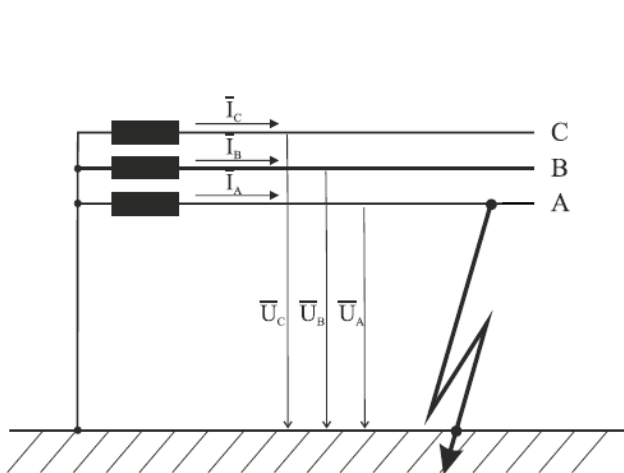
Obrázek 2.4: Fázorový diagram napětí při odporovém zemním spojení [8]



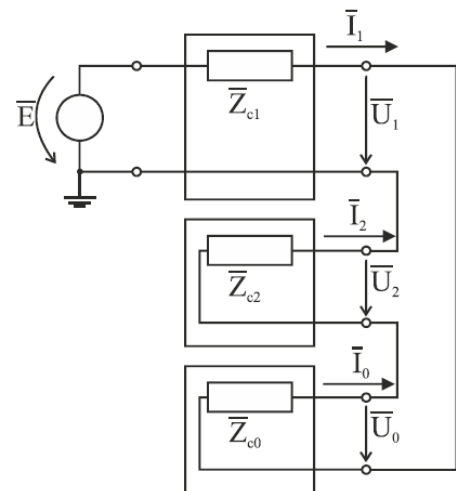
Obrázek 2.5: Fázorový diagram proudů při odporovém zemním spojení [8]

2.2 Zemní zkrat

K zemnímu zkratu dochází při vodivém spojení jedné fáze se zemí v sítích s přímo uzemněným nulovým bodem nebo v sítích s nepřímou uzemněným nulovým bodem (přes odpor – kabelová vedení). Proud procházející vedením při zkratu dosahuje hodnoty omezené pouze impedancí zkratové smyčky. Hodnota bývá několikanásobná oproti běžnému proudovému zatížení. V sítích zvn a vvn jsou to až desítky kA. V takovém případě poruchy sítě se musí vedení rychle odpojit.



Obrázek 2.6: Schéma jednofázového zkratu [2]



Obrázek 2.7: Náhradní schéma při jednofázovém zkratu [2]

Charakteristické rovnice pro jednofázový zemní zkrat jsou

$$\bar{U}_a = 0 \quad (2.3)$$

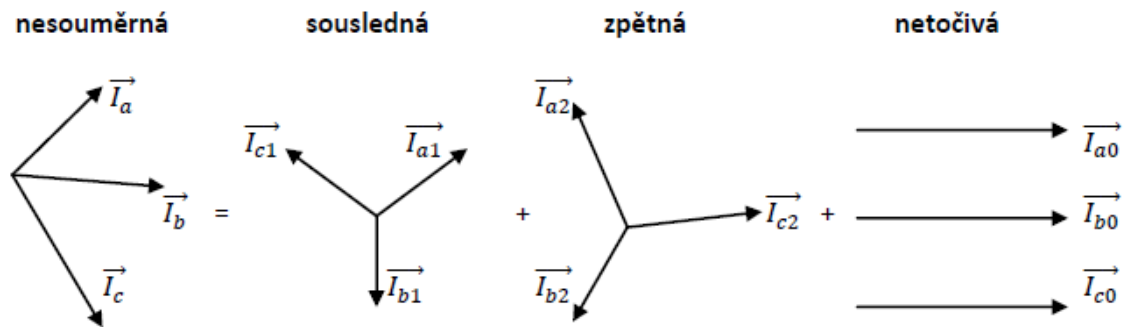
$$\bar{I}_b = \bar{I}_c = 0 \quad (2.4)$$

Mezi hlavní příčiny zkratu patří přepětí (atmosférická nebo provozní), poškození izolace a vady elektrického zařízení. Atmosférická přepětí nejčastěji způsobují přímé úder blesku do vedení nebo elektrostatické indukce, zatímco provozní přepětí jsou charakterizována spínacími pochody, rezonančními stavy nebo náhlým odlehčením sítě.

Předchozí kapitoly jsou zpracovány na základě literatury a zdrojů [2] [4] [8].

3 Metoda souměrných složek

Matematický popis nesouměrných soustav bývá složitý a nepřehledný. Proto se při nesouměrnosti používá symetrizace rozkladem na souměrné složky. Metoda souměrných složek umožňuje rozložení třífázové nesouměrné soustavy na 3 třífázové souměrné soustavy, a to na souslednou (označuje se indexem 1), zpětnou (označuje se indexem 2) a nulovou (netočivou; označuje se indexem 0).



Obrázek 3.1: Grafický rozklad na souměrné složky

Matematicky se rozklad napíše takto:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_{a1} + \bar{U}_{a2} + \bar{U}_{a0}$$

$$\bar{U}_b = \bar{U}_{b1} + \bar{U}_{b2} + \bar{U}_{b0}$$

$$\bar{U}_c = \bar{U}_{c1} + \bar{U}_{c2} + \bar{U}_{c0} \quad (3.1)$$

Vztáhneme-li fázory k fázi a, můžeme pak rovnice zapsat takto:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0$$

$$\bar{U}_b = \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_1 + \bar{a} \cdot \bar{U}_2 + \bar{U}_0$$

$$\bar{U}_c = \bar{a} \cdot \bar{U}_{c1} + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{c2} + \bar{U}_{c0} \quad (3.2)$$

Kde

$$\bar{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ} \quad (3.3)$$

$$\bar{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j240^\circ} \quad (3.4)$$

Po úpravě rovnic na maticový zápis a pomocí matice Fortescue (F) dostaneme zápis ve tvaru:

$$\begin{aligned}\bar{U} &= \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \\ \bar{U}_s &= \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} \\ \bar{U} &= \bar{F} \cdot \bar{U}_s\end{aligned}\tag{3.5}$$

Zápis matice Fortescue

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix}\tag{3.6}$$

Pro jednotlivé složky lze napsat:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_a + \bar{a} \cdot \bar{U}_b + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_c) \\ \bar{U}_2 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_a + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_b + \bar{a} \cdot \bar{U}_c) \\ \bar{U}_0 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c)\end{aligned}\tag{3.7}$$

Analogicky lze provést způsob pro zápis proudových poměrů. Tato metoda je pro svou jednoduchost vhodná pro výpočet jednofázových (nesymetrických) poruch.

4 Výpočet poruchového proudu I_{por} a napětí U_0 při zemním spojení

Chování smíšené sítě (venkovní i kabelové) při zemním spojení názorně prokáže praktický příklad. Síť provozujeme jako soustavu s nepřímo uzemněným uzlem přes tlumivku. Schéma je znázorněné na obr. 4.1.

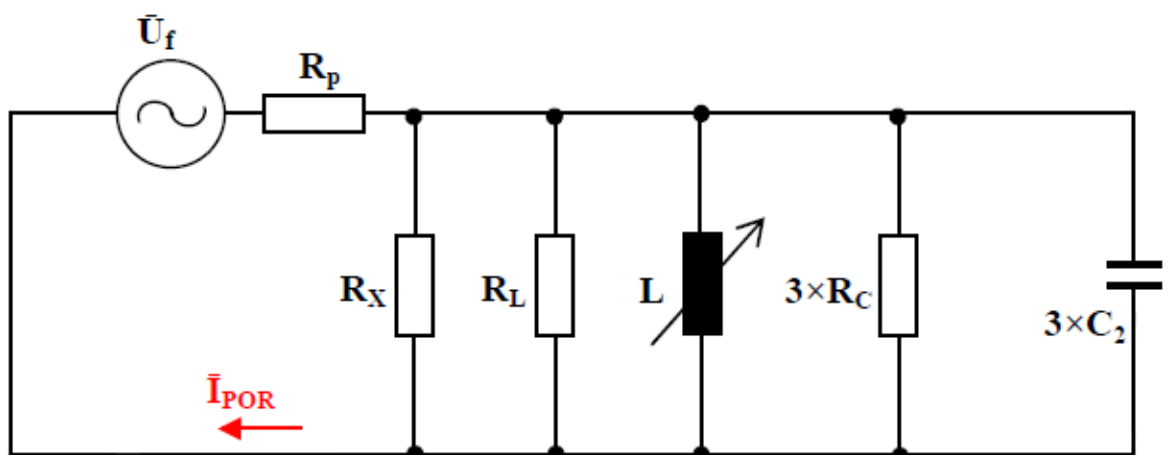
- celkový kapacitní proud $I_C = 138$ A (podíl činné složky 8 %)
- plynule laditelná tlumivka $I_L = 30 \div 300$ A (podíl činné složky 1 %)
- sdružené napětí sítě 22 kV
- zemní spojení na vývodu 1
- sekundární odporník R_X bude v rozmezí 0,222 – 6 Ω
- převod $U_f / 500$ V

Úkoly výpočtu:

- I_{por} a U_0 při kovovém zemní spojení ($R_P = 0$)
- I_{por} a U_0 při nekovovém zemní spojení

Postup řešení:

Prvním krokem je nahrazení sítě náhradním schématem. Neobsahuje kapacitu proti zemi vývodu 1, protože zde uvažují simulované zemní spojení.

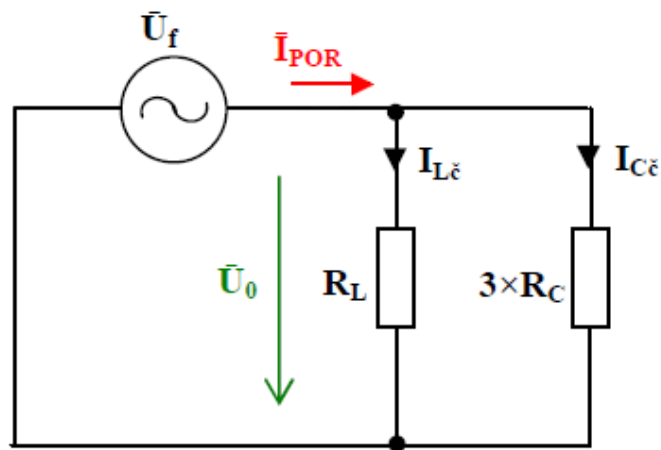


Obrázek 4.1: Náhradní schéma sítě

Při kovovém zemním spojení je odpor $R_P = 0$, proto v dalším zjednodušení schématu není zakreslen. Jedinou kapacitou proti zemi je kapacita druhého nepostiženého vývodu. Tlumivka, která je správně naladěna, splňuje podmínku: (4.1)

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \text{ (H)}$$

Také reaktance prvků L , C se rovnají. Dokonalá kompenzace jalových proudů zaručí plné vykompenzování a „vyrušení“ obou prvků. Následuje další zjednodušení schématu, oba prvky L a $3 \times C_2$ v tomto případě dále neuvažují. Nyní nepředpokládám ani připojení sekundárního odporníku, proto vypadne také odpor R_X .



Obrázek 4.2: Zjednodušené náhradní schéma

Velikost fázového napětí je známá hodnota. Poruchový proud se podle schématu rozdělí na činné složky induktivního a kapacitního proudu označené I_{Lc} a I_{Cc} . Činná část kapacitního proudu reprezentuje porušenou větev. Celkový kapacitní proud je 138 A.

Při poruše na vývodu 1 odečtu od celkového kapacitního proudu hodnotu zadanou pro porušený vývod.

$$I_C = I_{kapC} - I_{kap1} = 138 - 20 = 118 \text{ A}$$

$$\text{jalová složka činí 92 \%} \quad I_{Cj} = 0,92 \cdot 118 = 108,56 \text{ A}$$

$$\text{činná složka činí 8 \%} \quad I_{Cc} = 0,08 \cdot 118 = 9,44 \text{ A}$$

Takto odvodit lze také hodnotu proudu $I_{L\check{c}}$. Vzhledem k vyladění tlumivky je jalová složka proudu procházející tlumivkou rovna jalovému proudu kondenzátoru I_{Cj} . Činnou část výpočtu ze znalosti procentního rozdělení.

$$\text{jalová složka činní 99 \%} \quad I_{Lj} = I_{Cj} = 108,56 \text{ A}$$

$$\text{činná složka činí 1 \%} \quad I_{L\check{c}} = 1,1 \text{ A}$$

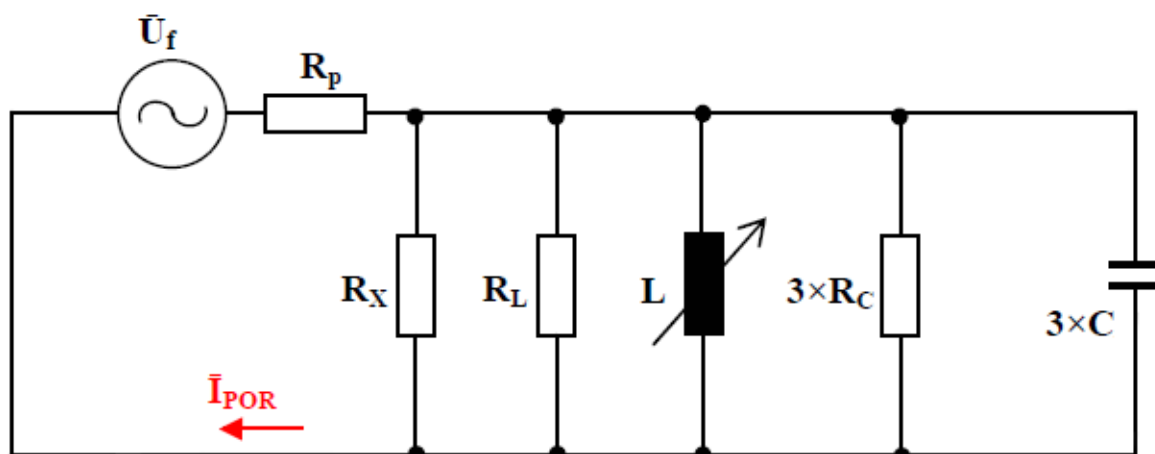
Zbývá pouze vypočítat poruchový proud I_{por} ze zjednodušeného náhradního schématu viz. obrázek 4.2.

$$U_f = U_0$$

$$I_{por} = I_{L\check{c}} + I_{C\check{c}}$$

$$I_{por} = 1,1 + 9,44 = 10,54 \text{ A}$$

Druhý úkol respektuje odpor poruchy R_p . Proud protékající obvodem je tímto odporem také ovlivněn. Nelze použít metodu, při které se celkový kapacitní proud ze znalosti procentních poměrů činných a jalových složek rozdělí. Předchozí postup by generoval značné nepřesnosti. Výpočet vychází ze schématu na obrázku 6.3. Velmi podobnému náhradnímu schématu jako v předchozím případě, s tím rozdílem, že nyní velikost kapacity C , následně také její reaktanci, vypočteme ze znalosti celkového kapacitního proudu, fázového napětí a frekvence sítě.



Obrázek 4.3: Náhradní schéma sítě pro nekovové zemní spojení

$$I_C = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C \quad (4.2)$$

$$138 = 3 \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot C$$

$$C = \frac{I_C}{3 \cdot \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{138}{3 \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,153 \cdot 10^{-5} \text{ F}$$

Z vypočtené kapacity zjistím velikost reaktance. (4.3)

$$X_C = \frac{1}{j3 \cdot \omega \cdot C}$$

$$X_C = \frac{1}{j \cdot 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 1,153 \cdot 10^{-5}} = -j92,02 \Omega$$

Opět z podmínky pro vyladěnou tlumivku získám reaktanci X_L .

$$|X_L| = |X_C|$$

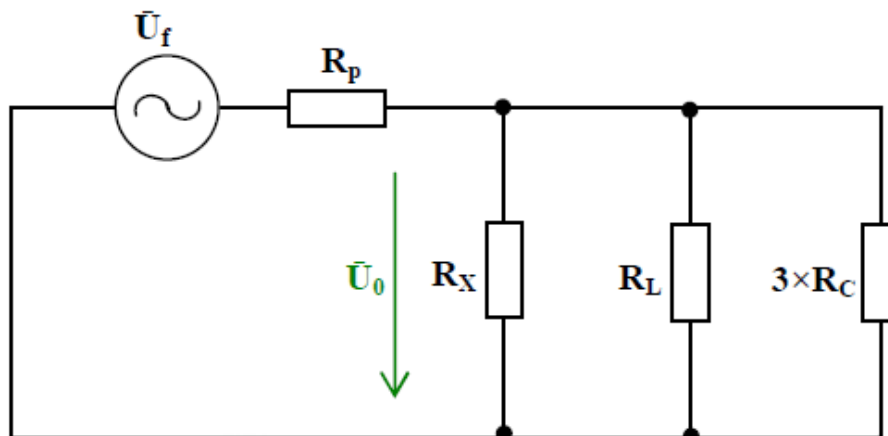
$$X_L = j92,02 \Omega$$

Procentní rozdělení činné a jalové složky můžu nakonec využít. Nikoli však pro určení proudu, ale pro určení svodového odporu R_C a odporu tlumivky R_L .

$$X_C \sim 8 \% \rightarrow 3 * R_C \sim 92 \% \quad 3 * R_C = 1058,23 \Omega$$

$$X_L \sim 1 \% \rightarrow R_L \sim 99 \% \quad R_L = 9109,98 \Omega$$

Po úpravách získám zjednodušené náhradní schéma pro nekovové zemní spojení, ve kterém znám velikosti všech pasivních prvků. Před konečným výpočtem poruchové proudu I_{POR} a napětí U_0 ještě provedu přepočítání sekundárního odporníku R_X na primární stranu.



Obrázek 4.4: Zjednodušené náhradní schéma pro nekovové zemní spojení

Výpočet předpokládá hodnotu odporu $R_P = 1000 \Omega$ a sekundárního odporníku $R_{Xsek} = 1 \Omega$.

$$R_X = R_{Xsek} \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = 1 \cdot \left(\frac{22000}{500 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 = 645,33 \Omega$$

$$R_A = \frac{R_X \cdot R_L \cdot 3R_C}{R_X \cdot R_L + R_X \cdot 3R_C + R_L \cdot 3R_C}$$

$$R_A = \frac{645,33 \cdot 9109,98 \cdot 1058,23}{645,33 \cdot 9109,98 + 645,33 \cdot 1058,23 + 9109,98 \cdot 1058,23} = 383,97 \Omega$$

(4.4)

$$I_{por} = \frac{U_f}{R_P + R_A}$$

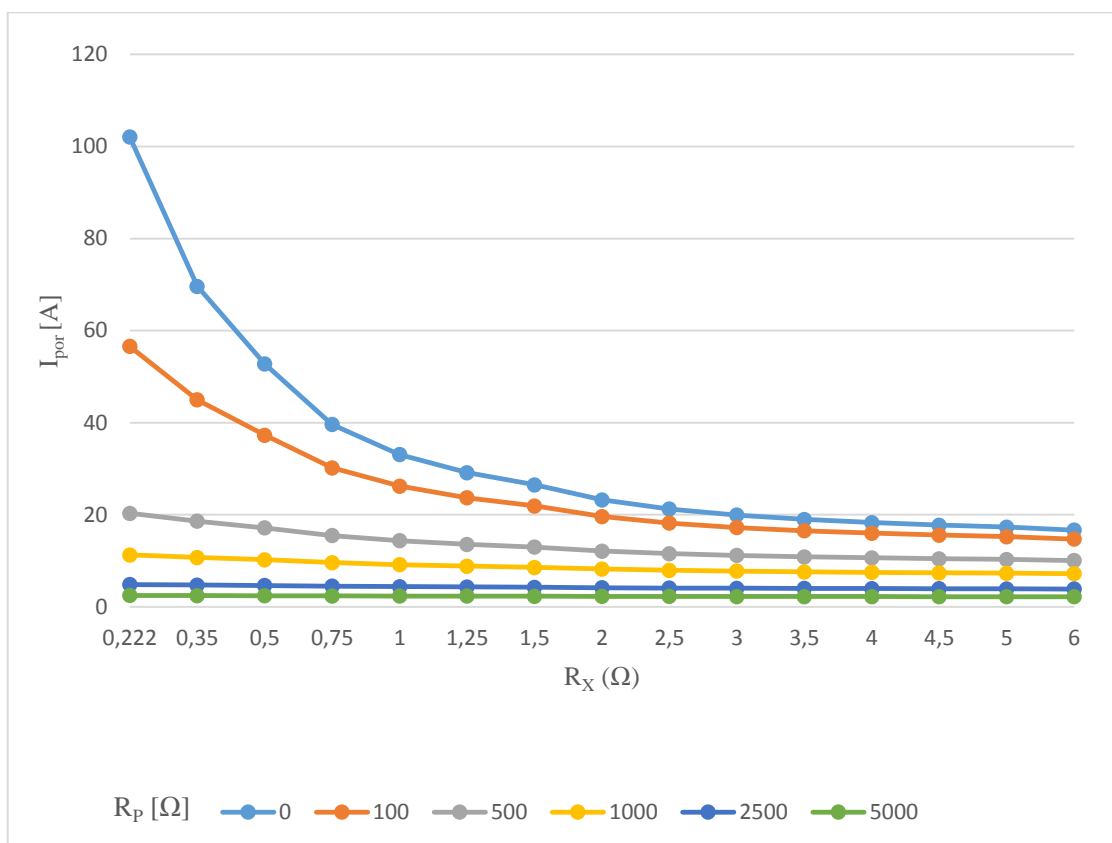
$$I_{por} = \frac{12701,7}{1000 + 383,97} = 9,18 \text{ A}$$

$$U_0 = I_{por} \cdot R_A$$

$$U_0 = 9,18 \cdot 383,97 = 3524,84 \text{ V}$$

		R_P [Ω]	0	100	500	1000	2500	5000
R_{Xsek} [Ω]	R_X [Ω]	R_A [Ω]	I_{por} [A]					
0,222	143,264	124,461	102,05	56,587	20,340	11,296	4,840	2,479
0,35	225,867	182,419	69,629	44,975	18,613	10,742	4,735	2,451
0,5	322,667	240,751	52,759	37,276	17,147	10,237	4,634	2,424
0,75	484,000	320,450	39,637	30,210	15,481	9,619	4,503	2,387
1	645,333	384,012	33,076	26,243	14,368	9,177	4,404	2,359
1,25	806,667	435,888	29,140	23,702	13,572	8,846	4,326	2,337
1,5	968,000	479,029	26,516	21,936	12,974	8,588	4,264	2,318
2	1290,66	546,659	23,235	19,642	12,135	8,212	4,169	2,290
2,5	1613,33	597,252	21,267	18,217	11,576	7,952	4,101	2,269
3	1936,00	636,526	19,955	17,245	11,176	7,761	4,050	2,253
3,5	2258,66	667,896	19,017	16,541	10,876	7,615	4,010	2,241
4	2581,33	693,531	18,315	16,007	10,642	7,500	3,977	2,231
4,5	2904,00	714,872	17,768	15,587	10,455	7,407	3,951	2,223
5	3226,66	732,914	17,330	15,250	10,302	7,330	3,929	2,216
6	3872,00	761,752	16,674	14,739	10,067	7,210	3,894	2,204

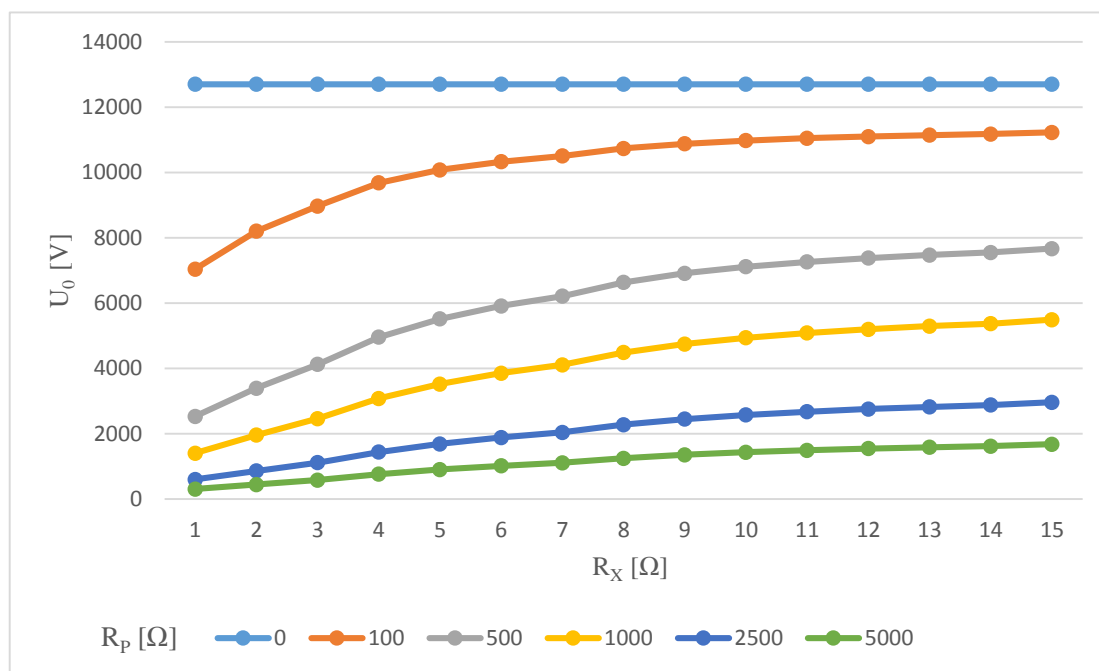
Tabulka 4.1: Výpočet závislosti poruchového proudu I_{por} na odporu poruchy R_P a odporníku R_X



Graf 4.1: Závislost poruchového proudu I_{por} na odporu poruchy R_P a odporníku R_X

Z předchozí tabulky a grafu (tabulka 4.1) vyplývá, že při narůstajícím odporu poruchy R_P a sekundárním odporníku R_X , poruchový proud klesá. Jeho hodnoty se pohybují od jednotek až po desítky ohmů. Nejvyšší strmost, snížení poruchového proudu v závislosti na vzrůstající hodnotě sekundárního odporníku, má kovové zemní spojení $R_P = 0$.

	R_P [Ω]	0	100	500	1000	2500	5000
R_{Xsek} [Ω]	R_X [Ω]	U_0 [V]					
0,222	143,264	12701,706	7042,957	2531,577	1405,893	602,361	308,495
0,35	225,867	12701,706	8204,235	3395,320	1959,568	863,784	447,094
0,5	322,667	12701,706	8974,141	4128,171	2464,593	1115,733	583,494
0,75	484,000	12701,706	9680,725	4961,008	3082,478	1443,124	765,021
1	645,333	12701,706	10077,45	5517,580	3524,252	1691,257	905,943
1,25	806,667	12701,706	10331,48	5915,793	3855,815	1885,807	1018,512
1,5	968,000	12701,706	10508,08	6214,815	4113,837	2042,438	1110,504
2	1290,667	12701,706	10737,50	6633,970	4489,357	2279,056	1251,836
2,5	1613,333	12701,706	10880,02	6913,746	4749,484	2449,308	1355,330
3	1936,000	12701,706	10977,16	7113,753	4940,322	2577,681	1434,388
3,5	2258,667	12701,706	11047,61	7263,849	5086,301	2677,936	1496,750
4	2581,333	12701,706	11101,05	7380,645	5201,575	2758,398	1547,200
4,5	2904,000	12701,706	11142,97	7474,116	5294,910	2824,403	1588,853
5	3226,667	12701,706	11176,73	7550,614	5372,025	2879,525	1623,827
6	3872,000	12701,706	11227,76	7668,344	5492,003	2966,365	1679,272

Tabulka 4.2: Výpočet závislosti napětí U_0 na odporu poruchy R_P a odporníku R_X Graf 4.2: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy R_P a odporníku R_X

Nulová složka napětí, jak vidíme z grafu 4.2, se při kovovém spojení $R_P = 0$ udržuje na konstantní hodnotě fázového napájecího napětí. Ostatní průběhy mají mírně stoupající tendenci při vzrůstající hodnotě sekundárního odporníku.

5 Výpočet poruchového proudu I_{por} a napětí U_0 při zemním zkratu

Náhradní schéma jednofázového zkratu je zobrazeno na obrázku 2.7. Na základě charakteristických rovnic vyplývajících ze schématu (viz. rovnice 2.3 a 2.4) jsem odvodil soustavu rovnic.

$$\begin{aligned} \bar{U}_f &= \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 + \bar{U}_1 & 0 &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ 0 &= \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 + \bar{U}_2 & 0 &= \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ 0 &= \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_0 + \bar{U}_0 & 0 &= \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Pro složkové proudy platí:

$$\bar{I}_{120} = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{I} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{1}{3} \bar{I}_a = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}$$

Rovnice pro složkové proudy:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 = 0 \quad (5.4)$$

$$\bar{U}_1 = (\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{I}_1 \quad (5.5)$$

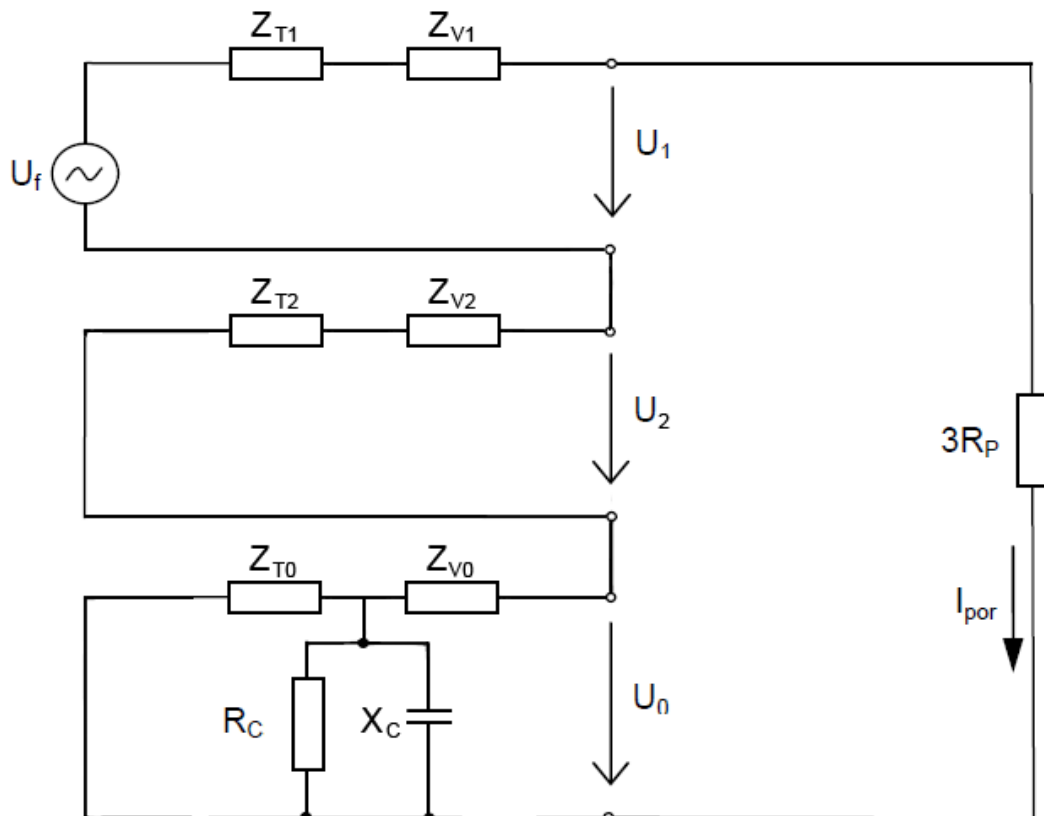
$$\bar{U}_2 = -\bar{Z}_2 \bar{I}_1 \quad (5.6)$$

$$\bar{U}_0 = -\bar{Z}_0 \bar{I}_1 \quad (5.7)$$

Proud poruchy má induktivní charakter a jeho velikost je ovlivněna místem vzniku poruchy (tj. impedancí vedení Z_V). (5.8)

$$\bar{I}_{por} = \bar{I}_a = 3 \cdot \bar{I}_1 = \frac{3 \cdot \bar{U}_f}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 \cdot R_p}$$

Pro výpočty příčných a podélných parametrů jsem uvažoval distribuční síť 22 kV, transformátor o výkonu 63 MVA (zapojeno YNynd), délku vedení 12 km.



Obrázek 5.1: Náhradní schéma složkové soustavy pro zemní zkrat

Netočivá složka impedance napájecího transformátoru je podstatně menší než hodnota $1/Y$ reprezentující paralelní kombinaci R_C a X_C a tudíž lze příčnou admitanci vedení v obecném náhradním schématu zanedbat. Kapacita vedení se při jednofázovém zemním zkratu neuplatní. Impedance pro souslednou a zpětnou složku považují za totožné při uvažování elektricky vzdáleného zkratu od transformátoru.

$$Z_{T1} = Z_{T2} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_s^2}{S_n} = \frac{15,03}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{63 \cdot 10^6} = 1,155 \Omega$$

Ze zadání vyplývá zapojení transformátoru YN_ynd, u kterého je nulová složka impedance shodná se souslednou. Vyjadřují tedy pro všechny souměrné složky stejnou velikost impedance napájecího transformátoru.

$$Z_{T0} = Z_{T1} = 1,155 \Omega$$

Impedance vedení:

$$R = R_k \cdot l = 0,28 \cdot 12 = 3,36 \Omega$$

$$X = X_k \cdot l = 0,4 \cdot 12 = 4,8 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V1} = \bar{Z}_{V2} = R + jX = 3,36 + j4,8 \Omega$$

$$|\bar{Z}_{V1}| = |\bar{Z}_{V2}| = \sqrt{(R^2 + X^2)} = \sqrt{(3,36^2 + 4,8^2)} = 5,85 \Omega$$

Nulová složka impedance vedení je násobena koeficientem, v mém případě trojnásobkem sousledné složky.

$$\bar{Z}_{V0} = 3 \cdot \bar{Z}_{V1} = 3 \cdot (R + jX) = 10,08 + j14,4 \Omega$$

$$|\bar{Z}_{V0}| = 3 \cdot |\bar{Z}_{V1}| = 3 \cdot \sqrt{(R^2 + X^2)} = 3 \cdot \sqrt{(3,36^2 + 4,8^2)} = 17,55 \Omega$$

Impedance příčné kapacity.

$$\bar{Z}_C = R_C + jX_C$$

$$Z_C = \sqrt{(R_C^2 + X_C^2)} = \sqrt{(1058,23^2 + 92,02^2)} = 1062,22 \Omega$$

Impedance sousledné, zpětné a nulové složky:

$$Z_1 = Z_{T1} + Z_{V1} = 1,155 + 5,85 = 7,005 \Omega$$

$$Z_2 = Z_{T2} + Z_{V2} = 1,155 + 5,85 = 7,005 \Omega$$

$$Z_0 = \frac{Z_{T0} \cdot Z_{C0}}{Z_{T0} + Z_{C0}} + Z_{V0} = \frac{1,155 \cdot 1062,22}{1,155 + 1062,22} + 17,55 = 18,7 \Omega$$

Výsledný poruchový proud vypočtu podle vztahu 5.8 dosazením impedancí jednotlivých složek. Odpor poruchy v tomto případě uvažuji $R_P = 1000 \Omega$.

$$\bar{U}_f = \frac{\bar{U}_S}{\sqrt{3}} = \frac{22000}{\sqrt{3}} = 12701,7 V$$

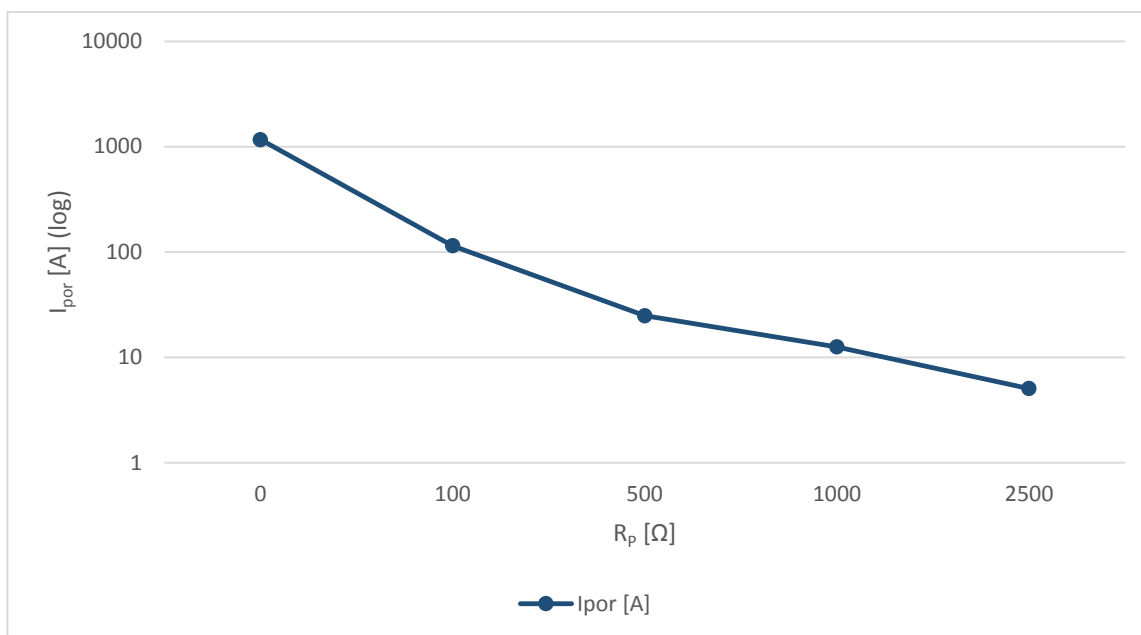
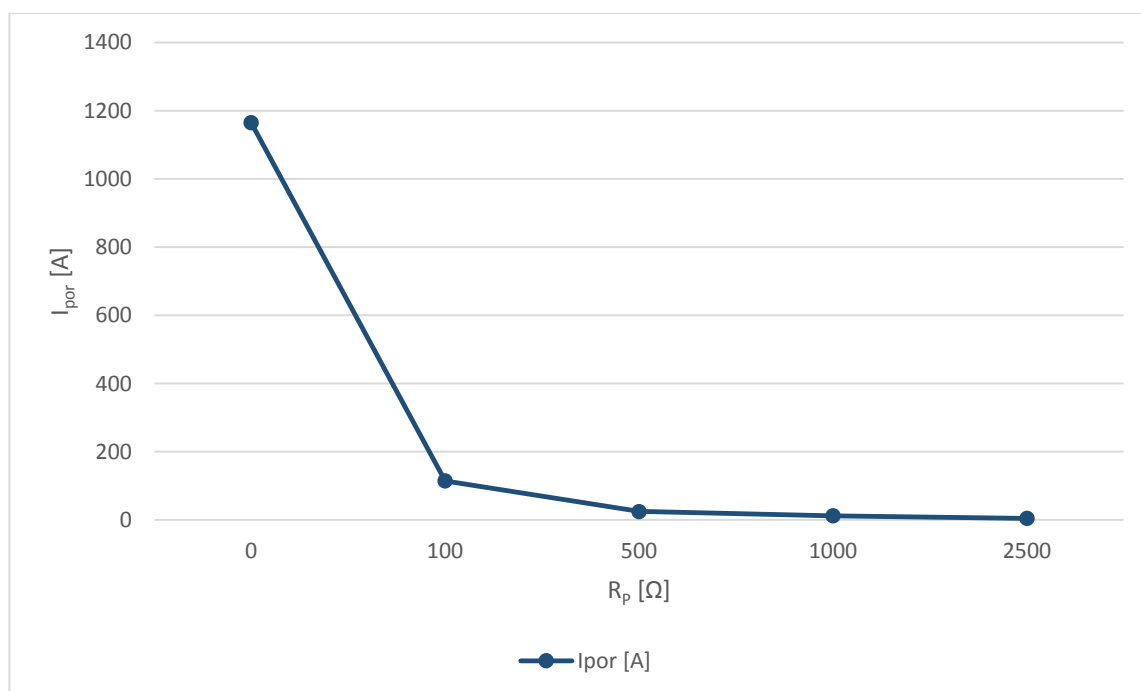
$$\bar{I}_{por} = \frac{3 \cdot \bar{U}_f}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 \cdot R_P} = \frac{3 \cdot 12701,7}{7,005 + 7,005 + 18,7 + 3 \cdot 1000} = 12,56 A$$

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 \cdot (\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2) = \frac{\bar{I}_{por}}{3} \cdot (\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2) = \frac{12,56}{3} \cdot (18,7 + 7,005) = 107,6 V$$

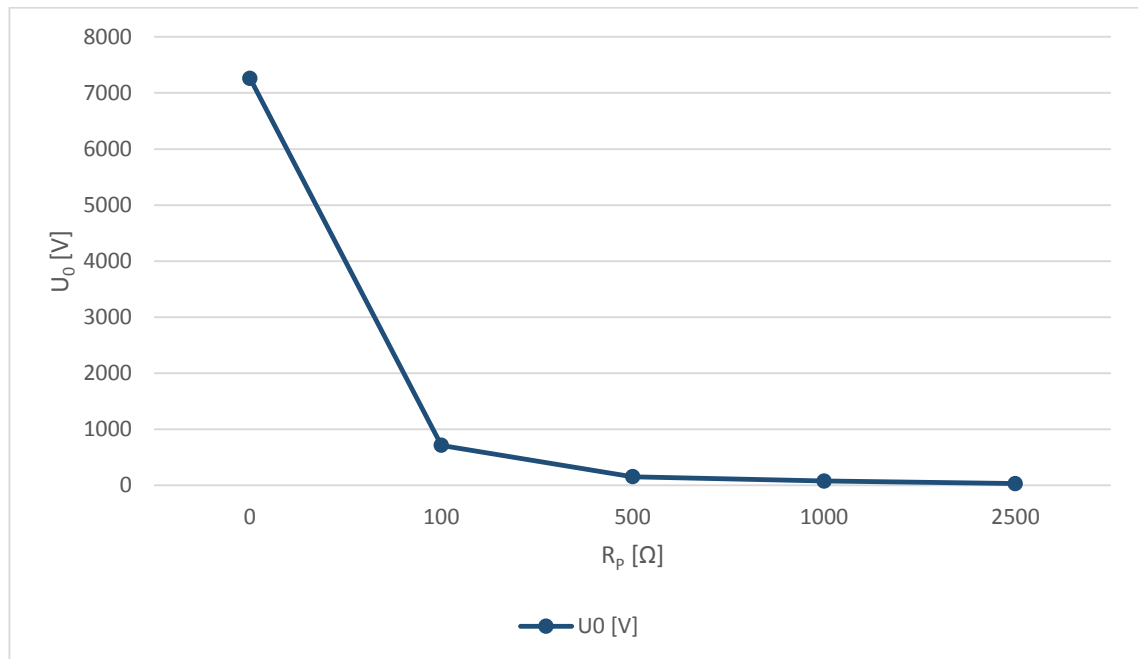
$$\bar{U}_2 = -\bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_2 = \frac{\bar{I}_{por}}{3} \cdot \bar{Z}_2 = \frac{12,56}{3} \cdot 7,005 = -29,33 V$$

$$U_0 = -\bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_0 = \frac{\bar{I}_{por}}{3} \cdot \bar{Z}_0 = \frac{12,56}{3} \cdot 18,7 = -78,32 V \quad \bar{U}_1 = \bar{U}_2 + \bar{U}_0$$

R_p [Ω]	0	100	500	1000	2500
Z_{120} [Ω]	32,71	32,71	32,71	32,71	32,71
Z [Ω]	32,71	332,71	1532,71	3032,71	7532,71
I_{por} [A]	1164,938	114,530	24,861	12,565	5,059
U_0 [V]	7261,446	713,901	154,969	78,320	31,532
U_{Rp} [V]	0	11452,952	12430,635	12564,709	12646,550

Tabulka 5.1: Výpočet poruchového proudu pro zemní zkrat se závislostí na odporu poruchy R_P Graf 5.1: Závislost poruchového proudu I_{por} na různých velikostech odporu poruchy R_p – log. osaGraf 5.2: Závislost poruchového proudu I_{por} na různých velikostech odporu poruchy R_p

Grafy 5.1 a 5.2 závislosti poruchového proudu I_{por} na odporech poruchy, v jednom případě v logaritmické závislosti, ukazují vysokou hodnotu proudu pro přímý zemní zkrat ($R_P = 0$), konkrétně $I_{por} = 1,164$ kA. V dalších případech různých velikostí odporů poruchy je zřejmé, že poruchový proud musí být o něco menší, v závislosti právě na tomto odporu. Čím větší odpor poruchy, tím menší poruchový proud.



Graf 5.3: Závislost napětí U_0 na různých odporech poruchy R_p

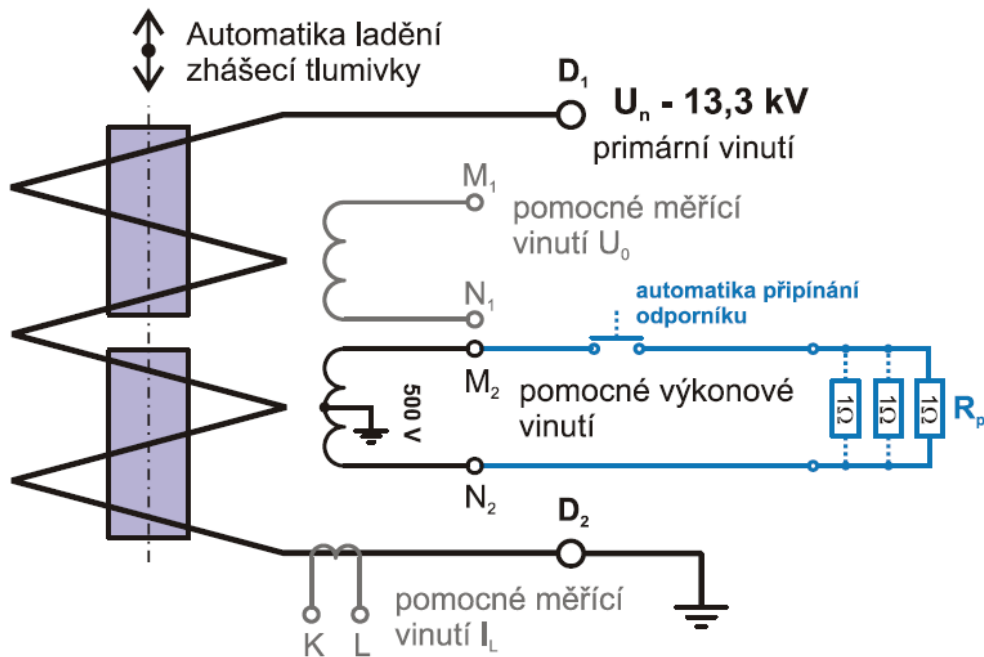
Napětí nulové složky U_0 má stejnou tendenci jako poruchový proud I_{por} a to klesající. Hodnota při přímém zemním zkratu (variantě $R_P = 0$) je téměř třetinová oproti sdružené hodnotě napájecího napětí 22 kV. Konkrétně 7,261 kV.

6 Ladění zhášecí tlumivky

Ladění zhášecích tlumivek se v sítích České republiky provádí automaticky způsobem nastavování induktivního proudu tlumivky na co nejbližší hodnotu s kapacitním zemním proudem. Vyladěný stav se nazývá stavem rezonance. Je tedy zřejmé, že pokud má být tlumivka použitelná, musí reagovat na změny v síti, tzn. být plynule laditelná. Princip je založen na změně indukčnosti pomocí posuvného jádra. Jádro je rozděleno na dvě poloviny, přičemž každá z částí se od sebe může vzdalovat až do krajních poloh. Posunem se zvětšuje vzduchová mezera v cívice a tím její indukčnost. Jedná se o lineární závislost. Historická metoda nastavováním odboček byla závislá na jemnosti kroku odboček a často se stávalo, že rezonance nebylo vůbec možné dosáhnout. Avšak v zahraničí je možné se ještě s tímto typem ladění setkat.

Přesné vyladění tlumivky má značný vliv na bezpečnost provozu snížením hodnoty zbytkového poruchového proudu zemní poruchy. V praxi přesně vyladěné kompenzované sítě neprovozujeme. V takovém stavu jinak dochází k problémům s nesymetriemi a zvýší se citlivost na přechodné děje. Doporučuje se při velkých nesymetriích sítě, při velkých rozdílech v hodnotách fázového napětí a vysoké hodnotě nulové složky napětí, nastavit tlumivku s určitou odchylkou. Ta zapříčiní výrazné snížení nulové složky napětí a vyrovná nesymetrie. Druhou stranou mince je zvýšení hodnoty poruchového proudu, avšak pro odstranění nesymetrií se s tímto krokem počítá.

Stavba tlumivek je po desetiletí stále stejná. Vývojem, také ve firmě EGE, prochází metody nalezení rezonančního bodu. Schématické znázornění tlumivky je zobrazeno na obrázku 5.1. Zhášecí tlumivka se skládá z primárního, pomocí dvou měřících vinutí a jednoho výkonového vinutí. Primární vinutí s hodnotou napětí 13,3 kV je nastavováno automatikou ladění do požadovaného stavu kompenzace. Pomocné měřící vinutí KL slouží pro připojení přístrojového transformátoru proudu určeného k měření kompenzačního proudu, druhé pomocné vinutí M_1N_1 je využíváno k měření uzlového napětí (netočivé složky napětí) U_0 - tedy napětí mezi nulovým bodem transformátoru a zemnicí soustavou. K výkonovému vinutí M_2N_2 s hodnotou napětím 500 V je připojována sestava pomocných (stavebnicových) odporů. Sestava umožňuje konfiguraci odporů.



Obrázek 6.1 Zjednodušené schéma zhášecí tlumivky s automatikou přepínání pomocného odporníku k výkonovému vinutí

6.1 Rezonanční metoda ladění tlumivky

Teoreticky se metod k vyladění tlumivky najde více, přesto mezi nejpoužívanější patří následující tři. Zprvu se zmíním o rezonanční metodě obšírněji, následně představím krátce zbylé dvě.

Rezonanční metoda patří mezi nepoužívanější zejména díky své jednoduchosti. Ne vždy je však vhodné ji použít. Metoda využívá přirozené fázové nesymetrie, jejímž důsledkem je napětí netočivé složky, jenž se objevuje mezi uzlem a zemí. Zapojením zhášecí tlumivky do uzlu transformátoru vzniká ve spolupráci s kapacitami sítě proti zemi paralelní rezonanční obvod, který je laditelný. Důsledkem paralelní rezonance je mimo jiné i maximální uzlové napětí, které je s výhodou využíváno právě pro nalezení rezonance. Výsledkem ladícího procesu je rezonanční křivka, která celý průběh názorně dokazuje. Jedná se o závislost napětí U_0 na velikosti indukčnosti L (viz. obrázek 6.2), případně také velikosti proudu protékající tlumivkou. Při každé změně konfigurace sítě se musí tlumivka znovu naladit, tzn. nalézt vrchol křivky. Při problému s nalezením vrcholu rezonanční křivky se používá metoda proudové injektáže.

6.2 Metoda proudové injektáže

Problém nalezení vrcholu rezonanční křivky vzniká při vysoké strmosti průběhu nebo, je-li křivka příliš úzká. Strmost můžeme u známých automatik bez problémů vyřešit správným nastavením. V druhém případě (příliš nízké hodnotě U_0 , řádově mV) použijeme metodu proudové injektáže. Provádí se injektáží (dodáním) proudu dané velikosti přes sekundární výkonové vinutí zhášecí tlumivky. Velikost se volí nízká, aby nedošlo k aktivaci ochran. Během procesu se také měří napětí a počítá potřebná velikost proudu procházející tlumivkou a základní parametry sítě. Regulátor následně přeladí tlumivku na požadovanou hodnotu s respektováním případného rozladění.

6.3 Sekundární odporník

Při jednofázovém zemním spojení nedochází k úplnému kompenzaci poruchového proudu. Velikost výsledného zbytkového proudu protékajícím místem zemního spojení je minimální a je určena rozdílem induktivního proudu tlumivkou a kapacitního poruchového proudu, dále je tento proud ovlivněn ztrátami v samotné zhášecí tlumivce (ztráty jsou dány materiálem, kvalitou konstrukce a použitou technologií výroby, bývají nižší než 1,5% jmenovitého proudu tlumivky) a svodovými odpory vedení.

Pro zlepšení funkce ochran se používají sekundární odporníky. Umožňují zvýšení činné složky poruchového proudu krátkodobým (1 – 3 sekundy) připojením sekundárního odporu do pomocného vinutí zhášecí tlumivky. Zajistí se takto bezpečnost a správná indikace zemního spojení. Pro správnou funkci ochran již v dnešní době není podmínkou maximální zvýšení činné složky poruchového proudu. Sekundární odporníky se využívají s pevnou hodnotou připínaného odporu nebo proměnlivé, jenž lze měnit v závislosti na odporu poruchy. Zvýšení činné složky vyvolává na odporu poruchy zvýšený úbytek napětí a tím i pokles nulové složky napětí v síti. Tato nevýhoda metody nás limituje při výběru sekundárního odporu, konkrétně velikostí požadovaného nárůstu poruchového proudu a z druhé strany velikostí nulové složky napětí pro stanovení meze zemního spojení. V praxi to vede k užívání odporníků s vyšší hodnotou odporu. Nedojde k poklesu nulové složky pod rozběhovou mez ochran, ty nebudou reagovat chybně pouze na poruchy s nízkou hodnotou zemního odporu. Přičemž ani zemní odpor poruchy není konstantní a je proudově závislý. Volba sekundárního odporníku je určitým kompromisem výše zmíněných vlastností.

Kapitola byla zpracována na základě zdrojů [2], [5], [6].

6.4 Konkrétní návrh zhášecí tlumivky

Pro kompenzovanou síť je nutné předem navrhnout zhášecí tlumivku. Podle kompenzačního výkonu se ve výsledku zvolí zařízení z katalogu firmy EGE. Tlumivka je plynule laditelná v rozsahu 30 – 300 A. Přičemž velikost proudu procházející tlumivkou se spočte podle vztahu:

$$I_L = \frac{U_0}{\omega L} \quad (6.1)$$

Velikost zhášecí tlumivky vychází ze vztahu pro rezonanci. Po dosazení koeficientů a známé velikosti kapacity (viz. výpočet 4.2) zjistíme, jakou tlumivku máme pro náš obvod vybrat.

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad (H)$$

$$L = \frac{1}{3 \cdot (2\pi \cdot 50)^2 \cdot 1,153 \cdot 10^{-5}} = 0,2929 \text{ H}$$

Výkon zhášecí tlumivky:

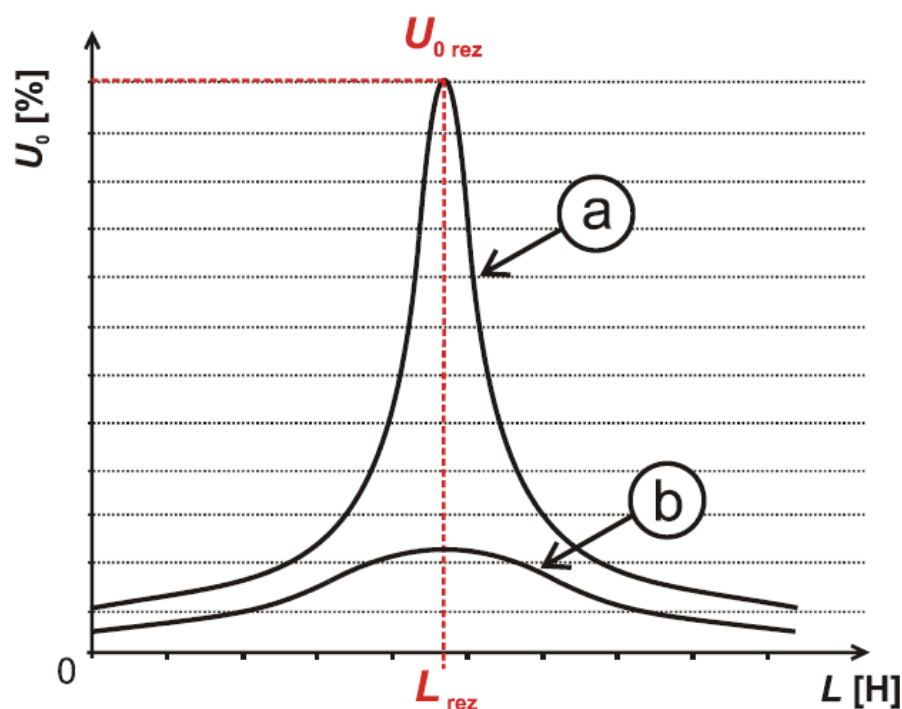
$$Q_L = \frac{U_0^2}{3\omega L} = \frac{(22000)^2}{3 \cdot (2\pi \cdot 50) \cdot 0,2929} = 1753,29 \text{ kVAr}$$

$$I_L = \frac{U_f}{X_L} = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot X_L} = \sqrt{3} \cdot U_0 \cdot \omega \cdot C$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot 22000 \cdot (2\pi \cdot 50) \cdot 1,153 \cdot 10^{-5} = 138,03 \text{ A}$$

Proud I_L tekoucí tlumivkou je induktivního charakteru. Tlumivka musí vykompenzovat analogicky kapacitní proud, proto je její velikost shodná se zadanou hodnotou I_C . Velikost navrhované tlumivky se však většinou volí o 30% větší než je kompenzovaný kapacitní proud. Nabídka firmy EGE dovoluje vybrat tlumivku ASR 2.0 o výkonu $S = 2100 \text{ kVA}$. Tabulka aktuálních parametrů vyráběných tlumivek je uvedena v příloze A.

Rezonanční křivka znázorňuje průběh napětí U_0 na velikosti indukčnosti L tlumivky, případně také na velikosti proudu protékající tlumivkou. Obrázek 6.2. zobrazuje první variantu. Rezonanční hodnotu udává nejvyšší napětí, tzv. vrchol křivky. V případě venkovního vedení je stoupání strmější a vrchol v maximální hodnotě. Kabelové vedení má rezonanční křivku více plochou. Šířku a strmost křivky udává koeficient k , přičemž čím větší k tím plošší křivka. Čili čím vyšší velikost příčné vodivosti, tím větší velikost činného svodového proudu a tím plošší křivka. V důsledku plošší křivky se obtížněji vyladuje kompenzační tlumivka do rezonančního stavu.



Obrázek 6.2. Rezonanční křivka – a) pro venkovní vedení, b) pro kabelové vedení

Závěr

Tato diplomová práce na téma „Přechod z přímo uzemněného uzlu sítě na kompenzaci zemních kapacitních proudů“ názorně ukazuje dva způsoby využití uzemnění pro distribuční síť 22 kV. V prvních kapitolách jsem přehledně popsal základní typy uzemnění uzlů včetně jejich výhod a nevýhod. Teoretická část je doplněna také seznámením s jednofázovými poruchami, konkrétně zemním spojením a zemním zkratem. Obě tyto poruchy využívám při simulaci prokázání chování sítě. Naše venkovní distribuční síť vysokého napětí 22 kV se provozují nepřímo uzemněné přes zhašecí tlumivku, přesto ve výpočtech simuluji také způsob přímého uzemnění pro tuto síť daného zadáním diplomové práce. Na závěr je obsah doplněn návrhem tlumivky pro kompenzovanou síť.

V porovnání přímo uzemněné sítě s kompenzovanou sítí, vychází pro provoz vysokého napětí lépe síť kompenzovaná. Mezi velkou výhodou považuji schopnost provozu rozsáhlejších oblastí při zemním spojení pro dobu potřebnou k nalezení poruchy, což ocení zejména koncový spotřebitel. Vysoké zkratové proudy přímého uzemnění nedovolují provoz sítě při poruše a v takovém případě musíme vedení ihned odpojit. Důvodem jsou vysoké hodnoty krokových a dotykových napětí. Jak jsem výpočtem dokázal, poruchový proud I_{por} se pohybuje v kompenzované síti v řádech jednotek až desítek A (viz. tabulka 4.1) v závislosti na odporu poruchy a odporníku. Tabulka také názorně ukazuje, že větší odpor poruchy má za následek i menší poruchový proud. Při větším odporu odporníku R_X má proud tendenci klesat (viz. graf 4.1). Rozdíl je velmi patrný již mezi kovovým ($R_P = 0$) a nekovovým ($R_P \neq 0$) zemním spojením. Při uvažování nenulového R_P se poruchový proud někdy až desetkrát sníží. Na závěr můžeme připočíst k výhodám nízké nároky na uzemnění sítě a nižší hodnoty přepětí při zemním spojení u venkovních sítí.

Poruchový proud při zemním zkratu je dán trojnásobkem sousledného proudu I_1 . Ve výpočtu jsou uvažovány podélné impedance transformátoru a vedení sousledné a zpětné složky, podélná impedance transformátoru i vedení nulové složky a příčná téměř zanedbatelná příčná kapacita. Ta nemá velký vliv na výsledný poruchový proud. Pokud uvažuji přímý zkrat, bez odporu poruchy, převyšuje očekávaně poruchový proud jednotky kA. V mém případě 1,1 kA. Čím větší odpor R_P , tím nižší proud. Napětí na postižené fázi kleslo na nulu, v ostatních fázích vzrostlo na sdružené napětí. Napětí U_0 pro tento případ je 7261 V. Zatímco napětí na R_P je nulové.

Návrh tlumivky vyšel z podmínky vztahu 4.1. Velikost celkové kapacity z předchozích postupů již znám. Její hodnota je 11,53 μF . Z čehož indukčnost tlumivky pro vyladěný rezonanční stav musí odpovídat hodnotě 0,29 H. Důležitým parametrem pro výběr z katalogů je zdánlivý výkon. Na indukčnost navazuje výpočet jalového výkonu $Q_L = 1753 \text{ kVAr}$ podle kterého jsem zvolil z nabídky zhášecí tlumivku typu ASR 2.0.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. Elektrické stanice a vedení. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008, 168 s. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [2] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] UHLÍK, Petr. *Elektroenergetika*. 78 s. Skripta. SPŠ Písek, 2005.
- [4] FEJT, Z., ČERMÁK, J. *Elektroenergetika*. Praha: ČVUT, 1985.
- [5] PECHOLT, Milan. *Provoz uzlu distribučních sítí*. Plzeň, 2008. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce doc. Ing. Lucie NOHÁČOVÁ, Ph.D.
- [6] LÁLA, Jan. *Způsob provedení přechodu izolované sítě na uzemněnou s uzlem sítě přes plynule nastavitelnou tlumivku*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce doc. Ing. Lucie NOHÁČOVÁ, Ph.D.
- [7] HADÁČEK, Zdeněk. *Analýza provozu uzlu sítě 22 kV vzhledem k jednofázovým zemním poruchám*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce doc. Ing. Miloslava TESAŘOVÁ, Ph.D.
- [8] Zemní spojení v trojfázových soustavách. In: [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [9] [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.ege.cz>

Přílohy

Příloha A – Tabulka s parametry zhášecích tlumivek vyráběných firmou EGE

Petersen coils – continuous duty (standard design) Erdschlusslöschspulen – Dauerbetrieb 24 Stunden (Standardausführung)					
Power*) Leistung*) (max) k VA	Type Typ	typical dimensions Abmessungen (informative)			Weight Gewicht (max) kg
		A (height) (Höhe)	B (width) (Breite)	C (length) (Tiefe)	
200	ASR 0.16	1650	1460	1171	990
630	ASR 0.63	2220	2160	1220	1900
1000	ASR 1.0	2400	1820	1330	2900
1700	ASR 1.6	2510	1810	1492	3800
2100	ASR 2.0	2630	2495	1505	4400
2550	ASR 2.5	2730	2315	1930	4900
4000	ASR 3.2	3015	2420	2130	6000
4300	ASR 4.0	3080	1840	2460	6500
5000	ASR 5.0	3650	2680	1820	8500
7300	ASR 6.3	3810	2550	2310	10400
8000	ASR 8.0	3875	2694	2363	12600
10500	ASR 10	4440	2694	2363	15200