

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Koncepce a konstrukční provedení nulového bodu
elektrických sítí**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin KUBAŇ**
Osobní číslo: **E17B0029P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Koncepce a konstrukční provedení nulového bodu elektrických sítí**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

Bakalářská práce „Koncepce a konstrukční provedení nulového bodu elektrických sítí“ bude zaměřena na tyto body:

1. Popište provoz sítí s izolovaným uzlem.
2. Uveďte charakteristické vlastnosti sítí s odporově uzemněným uzlem sítě.
3. Uveďte, jakým způsobem se provádí kompenzace zemních kapacitních proudů.
4. Doložte tyto informace na vybraném konkrétním případě.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Skripta Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie.
2. Student si další vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího a konzultanta práce.

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

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na problematiku uzemnění uzlu elektrické sítě. Teoretická část práce obsahuje popis jednotlivých způsobů provozu uzlu sítě. Způsob uzemnění uzlu sítě se projeví především při poruše, přičemž nejčastější poruchy, které v elektrizační soustavě vznikají, jsou jednofázové. Práce tedy obsahuje popis vlivu jednofázových poruch na napětí a proudy v dané síti, v závislosti na jejím uzemnění. Pozornost je věnována také způsobům vyhodnocování poruch, včetně metod identifikace postiženého vývodu, jelikož jejich volba závisí na způsobu uzemnění uzlu sítě. Praktická část práce obsahuje výpočet vlivu nesymetrie příčných impedancí sítě a výpočet vlivu odporu poruchy na velikost napětí mezi uzlem sítě a zemí a také na velikost napětí jednotlivých fází vůči zemi, včetně rozdílů ve velikosti těchto napětí.

Klíčová slova

elektrizační soustava, síť vysokého napětí, uzemnění uzlu sítě, zemní porucha, výpočet vlivu nesymetrie, výpočet vlivu odporu poruchy

Abstract

This thesis focuses on the issue with the earthing of electrical network node. The theoretical part of the thesis contains a description of individual ways of electrical network node operation. The way of electrical network node operation manifests itself especially in the event of a disorder, whereas the most common disorders, which arise in the electricity system, are single-phase. The thesis therefore contains description of the effect of single-phase disorders on voltages and currents in the network, depending on its earthing. Attention is also paid to ways of evaluating faults, including methods for identifying the affected outlet, because their choice depends on electrical network node earthing. The practical part of the thesis contains a calculation of the effect of asymmetry of transverse network impedances and calculation of the effect of disorder resistance on the magnitude of the voltage between the electrical network node and ground and also on the magnitude of the voltage of the individual phases to ground, including differences in the magnitude of these voltages.

Keywords

electrical system, high voltage networks, earthing the electrical network node, earth disorder, calculation of the effect of asymmetry, calculation of the effect of disorder resistance

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 8.6.2020

Martin Kubaň

Poděkování

Rád bych poděkoval paní doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce. Touto cestou bych také rád poděkoval konzultantovi panu Ing. Františku Žákovi, Ph.D. za cenné rady při řešení praktické části mé práce.

Obsah

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam symbolů a zkratek

1	Úvod.....	1
2	Způsoby provozu uzlu transformátoru.....	2
2.1	Sítě účinně uzemněné	4
2.2	Sítě izolované	6
2.3	Sítě uzemněné přes rezistor	8
2.4	Sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku.....	10
2.4.1	Zhášecí tlumivka	13
2.5	Srovnání jednotlivých způsobů provozu uzlu sítě.....	16
3	Způsoby vyhodnocování zemních poruch	18
3.1	Metoda souměrných složek	20
4	Systémy chránění elektrických sítí	23
4.1	Opětné zapínání	25
4.2	Distanční ochrana	26
4.3	Srovnávací ochrana.....	27
4.4	Rozdílová ochrana	27
4.5	Nadproudová ochrana.....	27
5	Metody detekce zemní poruchy v sítích vysokého napětí	28
5.1	Statické metody vhodné pro izolované sítě	29
5.2	Statické metody vhodné pro sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku.....	31
5.3	Dynamické metody.....	33
5.4	Metody vhodné pro odporově uzemněné sítě.....	35
5.5	Způsoby lokalizace místa zemní poruchy.....	36
5.6	Systém RCC (Residual Current Compensation).....	37
5.7	Přízemnění postižené fáze	38
6	Výpočet aplikovaný na konkrétní situaci.....	39
6.1	Výpočet vlivu nesymetrie	44
6.2	Výpočet vlivu odporu poruchy	57
6.3	Shrnutí výpočtu a porovnání.....	66
7	Závěr	69
	Použitá literatura	71

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Příklady jednotlivých způsobů uzemnění uzlu sítě.....	2
Obr. 2.2: Druhy a četnost zkratů v elektrizační soustavě [6]	3
Obr. 2.3: Účinně uzemněná síť	5
Obr. 2.4: Izolovaná síť	6
Obr. 2.5: Fázorový diagram izolované sítě a) bez poruchy, b) s poruchou.....	8
Obr. 2.6: Síť uzemněná přes rezistor.....	9
Obr. 2.7: Síť uzemněná přes zhášecí tlumivku	10
Obr. 2.8: Fázorový diagram sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku a) ideální kompenzace, b) skutečná kompenzace.....	11
Obr. 2.9: Zjednodušené schéma zhášecí tlumivky [7]	14
Obr. 2.10: Příklad rezonanční křivky a) kabelového vedení, b) venkovního vedení.....	15
Obr. 3.1: Rozklad nesymetrické soustavy fázorů na trojici souměrných soustav	20
Obr. 3.2: Náhradní složkové schéma.....	22
Obr. 4.1: Základní členy ochrany [8]	24
Obr. 5.1: Přizemnění postižené fáze.....	38
Obr. 6.1: Zjednodušené schéma sítě.....	41
Obr. 6.2: Závislost napětí U_0 na symetrii druhé fáze v přímo uzemněné síti.....	45
Obr. 6.3: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na symetrii druhé fáze v přímo uzemněné síti.....	45
Obr. 6.4: Závislost napětí U_0 na symetrii druhé fáze v izolované síti.....	47
Obr. 6.5: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na symetrii druhé fáze v izolované síti.....	47
Obr. 6.6: Závislost napětí U_0 na proudu tlumivkou pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,995 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku.....	50
Obr. 6.7: Závislost napětí U_0 na proudu tlumivkou pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku	50
Obr. 6.8: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu tlumivkou pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,995 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku	51
Obr. 6.9: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu tlumivkou pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku	51
Obr. 6.10: Závislost napětí U_0 na proudu tlumivkou při zvýšeném tlumení sítě pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku.....	52
Obr. 6.11: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu tlumivkou při zvýšeném tlumení sítě pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku	53

Obr. 6.12: Závislost napětí U_0 na proudu odporníkem pro symetrii druhé fáze 0,995 v síti uzemněné přes uzlový odporník.....	54
Obr. 6.13: Závislost napětí U_0 na proudu odporníkem pro symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes uzlový odporník.....	55
Obr. 6.14: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu odporníkem pro symetrii druhé fáze 0,995 v síti uzemněné přes uzlový odporník.....	55
Obr. 6.15: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu odporníkem pro symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes uzlový odporník.....	56
Obr. 6.16: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy v přímo uzemněné síti	59
Obr. 6.17: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy v přímo uzemněné síti	59
Obr. 6.18: Závislost proudů I_0 , I_{L1} , I_{L2} a I_{L3} na odporu poruchy v přímo uzemněné síti	60
Obr. 6.19: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy v izolované síti	61
Obr. 6.20: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy v izolované síti	62
Obr. 6.21: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku.....	63
Obr. 6.22: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku	64
Obr. 6.23: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy v síti uzemněné přes uzlový odporník.....	65
Obr. 6.24: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy v síti uzemněné přes uzlový odporník	66

Seznam tabulek

Tabulka 6.1: Parametry zadávané pro výpočet vlivu nesymetrie.....	39
Tabulka 6.2: Příklad tabulky v Excelu se zadanými rovnicemi	42
Tabulka 6.3: Příklad tabulky v Excelu s výsledky soustavy rovnic.....	42
Tabulka 6.4: Příklad tabulky v Excelu s konečnými výsledky	43
Tabulka 6.5: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v přímo uzemněné síti	44
Tabulka 6.6: Velikosti napětí U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} v závislosti na symetrii v přímo uzemněné síti ..	44
Tabulka 6.7: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v izolované síti.....	46
Tabulka 6.8: Velikosti napětí U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} v závislosti na symetrii v izolované síti	46
Tabulka 6.9: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při reaktanci zvýšené o 10 % oproti vyladěnému stavu	48
Tabulka 6.10: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při reaktanci zvýšené o 5 % oproti vyladěnému stavu	48
Tabulka 6.11: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při vyladěném stavu	49
Tabulka 6.12: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při reaktanci snižené o 5 % oproti vyladěnému stavu	49
Tabulka 6.13: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při reaktanci snižené o 10 % oproti vyladěnému stavu	49
Tabulka 6.14: Velikosti napětí $U_{0 \max}$ v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes uzlový odporník	54
Tabulka 6.15: Parametry zadávané pro výpočet vlivu odporu poruchy.....	57
Tabulka 6.16: Velikosti napětí U_0 a proudu I_0 v závislosti na odporu poruchy v přímo uzemněné síti.....	58
Tabulka 6.17: Velikosti napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy v izolované síti	61
Tabulka 6.18: Velikosti napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku	63
Tabulka 6.19: Velikosti napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy v síti uzemněné přes uzlový odporník	65

Seznam symbolů a zkratek

U'_a	Velikost napětí vůči zemi u fáze s poruchou (V)
R_p	Přechodový odpor poruchy (Ω)
I_{por}	Velikost poruchového proudu (A)
\bar{U}_f	Fázové napětí (V)
L	Indukčnost zhášecí tlumivky (H)
R_L	Odpor tlumivky (Ω)
R_{0L}	Odpor připojovaný paralelně ke zhášecí tlumivce (Ω)
ω	Úhlová frekvence (rad/s)
C_0	Kapacita vůči zemi pro jednu fázi, pro kterou uvažujeme délku všech vedení připojených k příslušnému uzlu (F)
U_f	Velikost fázového napětí (V)
\bar{U}_0	Napětí uzlu sítě vůči zemi (V)
$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$	Napětí fází A, B, C (V)
$\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$	Proudy fází A, B, C (A)
\bar{Y}	Admitance (S)
OZ	Opětné zapnutí
ZS	Zemní spojení
HDO	Hromadné dálkové ovládání

1 Úvod

Elektrizační soustava, je tvořena sítěmi o různých hladinách jmenovitého napětí. Jedná se o sítě nízkého, vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. Pro tyto různé sítě existují také různé způsoby uzemnění jejich uzlu. Způsob uzemnění uzlu se volí v závislosti na velikosti sítě a na jejím charakteru, tedy jestli se jedná o venkovní, kabelové nebo případně smíšené vedení.

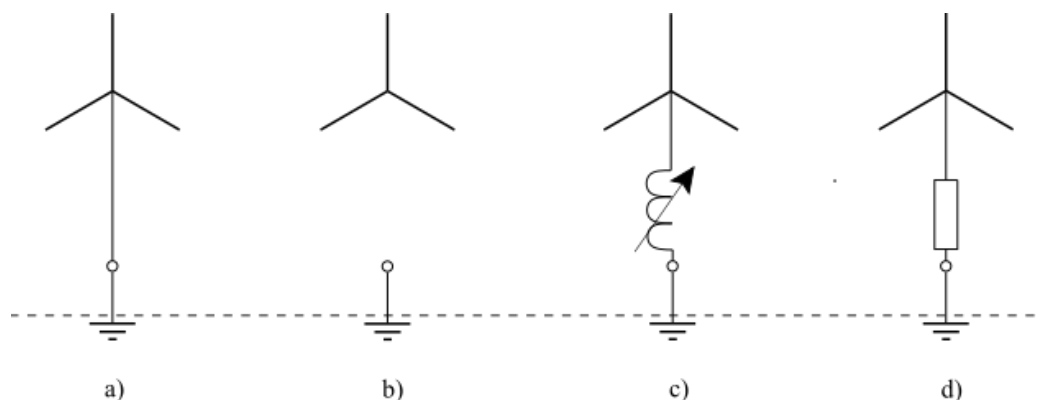
Existují základní způsoby uzemnění, které jsou charakteristické pro určité sítě. Přímé neboli účinné uzemnění uzlu sítě, které se používá u sítí zvláště vysokého a velmi vysokého napětí, tedy u nejvyšších napěťových hladin, ale také u většiny sítí nízkého napětí. Izolovaný uzel sítě je využíván především v sítích vysokého napětí, které však dosahují pouze malého rozsahu. Jedná se především o sítě v průmyslových areálech. Dalším způsobem uzemnění uzlu sítě je uzemnění přes uzlový odpor. Tohoto způsobu se využívá u velkých kabelových sítí vysokého napětí. Posledním způsobem uzemnění uzlu sítě je uzemnění přes zhašecí tlumivku, které se používá především u venkovních vedení vysokého napětí, která tvoří většinu naší elektrizační soustavy. Uvedené přiřazení způsobů uzemnění k určitým sítím platí pro elektrizační soustavu České republiky. V mé práci uvádím popis těchto způsobů uzemnění, včetně napěťových a proudových poměrů při jednofázových poruchách pro jednotlivá uzemnění.

Důležitou součástí elektrických sítí jsou také ochrany, které pracují na různých principech. Ochranné systémy musí v případě poruchy rozpoznat, že k poruše došlo. Podle typu sítě je poté nutné poruchu signalizovat, nebo vedení odpojit. Během poruch je důležitá také jejich lokalizace. V této práci tedy uvádím základní přehled systémů chránění elektrických sítí, a dále také způsoby vyhodnocování zemních poruch, včetně způsobů lokalizace těchto poruch.

Při provozu elektrických sítí, nastává na vedení nesymetrie příčných impedancí jednotlivých fází. V závislosti na nesymetrii se mění napětí uzlu sítě vůči zemi, ale také velikost napětí jednotlivých fází vůči zemi, včetně rozdílů mezi nimi. Velikosti těchto napětí i rozdílů mezi nimi však závisí také na způsobu uzemnění uzlu sítě. Pokud nastane v síti jednofázová porucha, závisí napěťové i proudové poměry v síti nejen na způsobu uzemnění uzlu sítě, ale také na velikosti odporu poruchy. V praktické části mé práce se věnuji výpočtu vlivu nesymetrie i výpočtu vlivu odporu poruchy, vždy v závislosti na způsobu uzemnění sítě.

2 Způsoby provozu uzlu transformátoru

Uzel třífázové soustavy je místo, kde dochází ke spojení všech fázových vodičů. Toto spojení je realizováno na svorkách transformátoru, alternátoru nebo spotřebiče. Uzel může být účinně uzemněný, tedy vodivě spojený přímo se zemí, nebo neúčinně uzemněný, tedy spojený se zemí přes zhášecí tlumivku nebo rezistor. Pokud není uzel vůbec uzemněný, pak mluvíme o izolované soustavě.



Obr. 2.1: Příklady jednotlivých způsobů uzemnění uzlu sítě

- a) Účinně uzemněná síť
- b) Izolovaná síť
- c) Síť uzemněná přes zhášecí tlumivku
- d) Síť uzemněná přes rezistor

Způsob provozu uzlu má vliv především na velikost poruchového proudu a velikost napětí neporušených fází a uzlu sítě vůči zemi. Velikost poruchového proudu je důležitým parametrem při dimenzování sítě a navrhování jejích ochrán. Podle velikosti napětí mezi neporušenými fázemi a zemí jsou určovány nároky na izolaci.

Proudy při spojení jedné fáze se zemí:

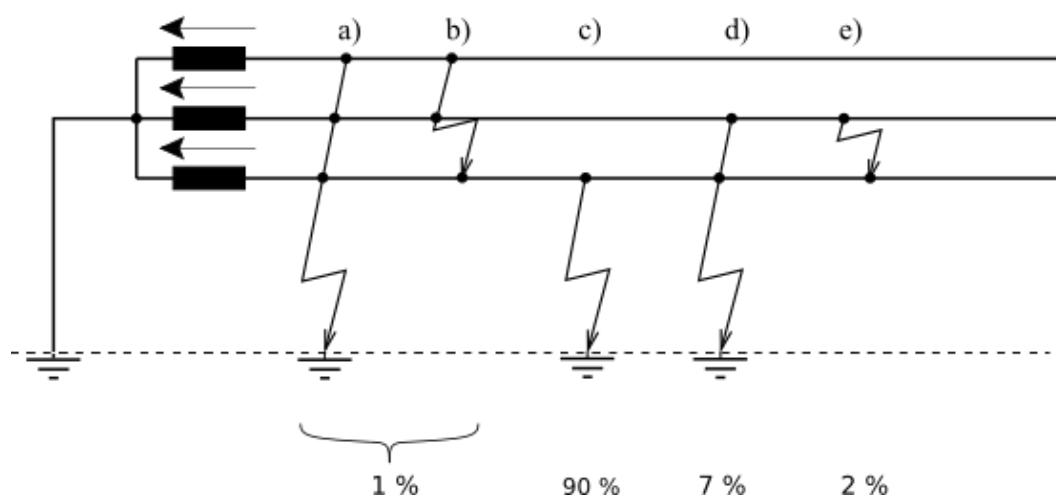
- 1) V účinně uzemněné soustavě dosahuje zkratový proud, kvůli bezimpedančnímu spojení uzlu se zemí, až desítek kA.
- 2) V izolované soustavě se poruchový proud uzavírá přes kapacity neporušených fází vůči zemi. Tento proud závisí na velikosti sítě a dosahuje i stovek A.
- 3) Uzemnění přes rezistor se používá pro snížení zkratového proudu.
- 4) Síť s uzlem uzemněným přes tlumivku neboli kompenzovaná síť, dosahuje nejnižších hodnot poruchového proudu.

Napětí při spojení jedné fáze se zemí:

- 1) Účinně uzemněná síť a síť uzemněná přes rezistor mají při kovovém zkratu mezi neporušenými fázemi a zemí fázové napětí.
- 2) U izolované sítě a sítě uzemněné přes zhašecí tlumivku je toto napětí sdružené.

Při provozu symetrické sítě bez poruchy nezáleží na způsobu uzemnění uzlu. Napětíové i proudové poměry zůstávají pro všechny způsoby stejné. Zemí během souměrného chodu neteče proud. Mezi fázemi je sdružené napětí a mezi fázemi a zemí je napětí fázové. Způsob uzemnění uzlu se projeví až při nesymetrických stavech. Nesymetrie nejčastěji nastává při jednofázové zemní poruše. Při zemní poruše se způsob provozu uzlu projeví různými napětíovými a proudovými poměry.

Zemní poruchou nazýváme stav, kdy dojde ke spojení jedné fáze, případně více fází, se zemí. K zemní poruše může dojít při pádu přetrženého vodiče na zem, při průrazu pevné izolace, při pádu větve či stromu na vedení nebo přeskokem na izolátoru. Charakter zemní poruchy je ovlivněn především způsobem, jakým je uzemněný uzel transformátoru. Spojí-li se se zemí pouze jedna fáze, a to v případě izolovaného uzlu nebo uzlu uzemněného přes zhašecí tlumivku, nazýváme tuto zemní poruchu jako zemní spojení. Ostatní zemní poruchy, tedy spojení jedné fáze se zemí v účinně uzemněné síti nebo v síti uzemněné přes rezistor, nebo dojde-li ke spojení více fází se zemí, nazýváme zemní zkrat.



Obr. 2.2: Druhy a četnost zkratů v elektrizační soustavě [6]

- a) třífázový zemní zkrat souměrný úplný
- b) třífázový zkrat souměrný
- c) jednofázový zkrat (v účinně uzemněné síti)
- d) dvoufázový zemní zkrat (v účinně uzemněné síti)

- e) dvoufázový zkrat

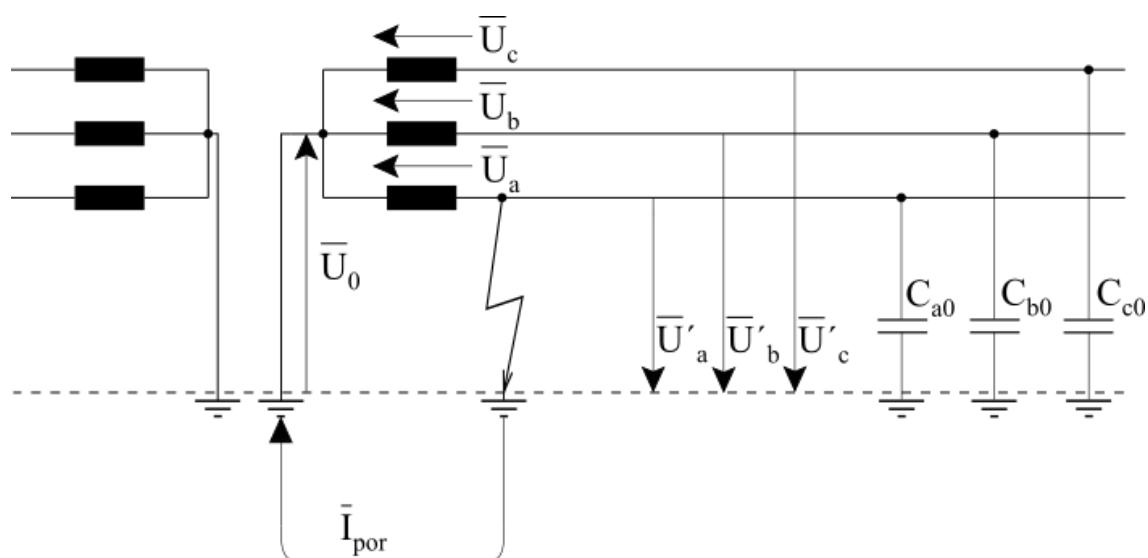
“Druhy zemních spojení:

- podle velikosti přechodového odporu v místě poruchy (R_p)
 - kovová (0Ω)
 - oblouková (několik Ω)
 - odporová (několik set Ω)
- podle doby trvání
 - mžiková (do 0,5 s)
 - krátkodobá (do 5 min) } Přechodná ZS
 - přerušovaná (opakovaná mžiková nebo krátkodobá porucha, mnohdy nelze vyhledat)
 - trvalá (až několik hodin, do doby odstranění poruchy)” [1]

Sítě s izolovaným uzlem nebo sítě s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku, tedy sítě, v nichž nastává zemní spojení, je možné po určitou dobu provozovat i s poruchou. Díky možnosti tohoto provozu nedochází k přerušení dodávky elektrické energie a porucha neovlivní napětí v síti nízkého napětí, ze které odebírá elektrickou energii většina odběratelů. Tento provoz je používán jen na dobu nezbytně nutnou k vyhledání místa vzniku zemního spojení. Oproti kabelovým sítím nastává u venkovního vedení zemní spojení častěji. Na venkovním vedení nastávají častěji především přechodná zemní spojení, tedy zemní spojení jejichž příčina zmizí po určitém čase. Pro venkovní vedení je tedy vhodné použití zhášecí tlumivky. Zhášecí tlumivka totiž snižuje proud v místě poruchy, díky tomu při přechodném zemním spojení snadněji zhasíná oblouk a zařízení připojená k síti tak mají příznivější podmínky k provozu.

2.1 Síť účinně uzemněné

V České republice je přímé uzemnění uzlu sítě používáno v přenosové soustavě, tedy u sítí zvláště vysokého napětí a velmi vysokého napětí na hladinách 400 kV a 220 kV. Dále je využíváno v distribuční síti, a to na hladině velmi vysokého napětí 110 kV a u většiny sítí nízkého napětí 0,4 kV.



Obr. 2.3: Účinně uzemněná síť

Ve všech těchto případech je uzel transformátoru přímo uzemněn a můžeme uvažovat $\bar{Z}_0 = 0$. Jen v některých případech se používá uzemnění přes malou impedanci. Pro dosažení menšího jednofázového zkratového proudu se mohou uzly některých transformátorů ponechat bez uzemnění, ale pouze do té míry, aby se nezměnil charakter sítě. Tedy aby síť jako celek šlo i nadále uvažovat jako účinně uzemněnou.

V přímo uzemněné síti bez poruchy je napětí uzlu transformátoru vůči zemi nulové a všechny fáze mají vůči zemi fázové napětí. Při zemní poruše, kdy dojde ke spojení jedné fáze se zemí, tedy při zemním zkratu, zůstává napětí uzlu vůči zemi téměř nulové. Při kovovém zkratu, tedy při $R_p = 0$, u fáze s poruchou klesne na nulu velikost napětí vůči zemi:

$$U'_a = R_p \cdot I_{por} \quad (2.1)$$

Napětí neporušených fází zůstává vůči zemi na fázové hodnotě. Díky tomu stačí tyto sítě dimenzovat na fázová napětí.

Během zemního zkratu teče v místě poruchy do země proud induktivního charakteru. Pro tento proud platí vztah:

$$\bar{I}_{por} = \frac{3 \cdot \bar{U}_f}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 \cdot R_p} \quad (2.2)$$

kde \bar{Z}_1 – zkratová impedance sousledné soustavy, \bar{Z}_2 – zkratová impedance zpětné soustavy, \bar{Z}_0 – zkratová impedance netočivé soustavy.

Velikost tohoto proudu závisí na místě vzniku zkratu. Netočivá složka zkratové impedance má při účinném uzemnění nejnižší možnou hodnotu oproti jiným způsobům provozu uzlu sítě. To

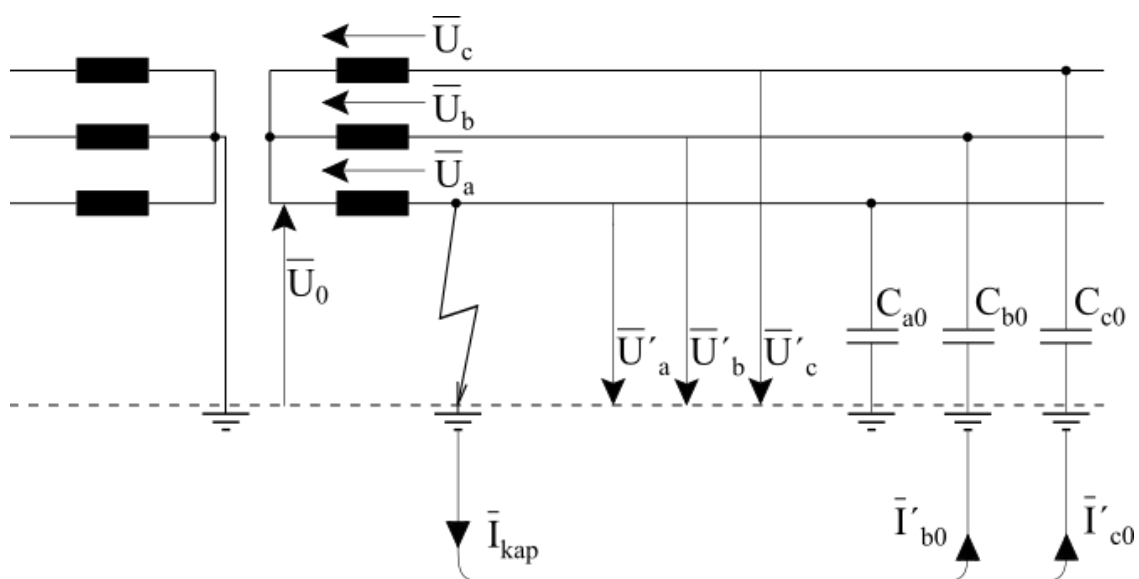
způsobuje, že poruchový (zkratový) proud má nejvyšší hodnotu a při zemním zkratu je nutné vedení okamžitě odpojit. [1]

Výhodou takto provozované sítě je možnost jednoznačného vyhodnocení vzniku poruchy, díky tomu, že ve fázi s poruchou poklesne napětí a zvýší se proud. V síti velmi vysokého napětí vybavené jednopólovými vypínači je možné využít jednopólového OZ pouze pro fázi s poruchou. Výhodou je také možnost dimenzování sítě jen na fázová napětí, a s tím spojené menší náklady na izolaci. Mezi výhody patří také menší hodnoty přepětí. Nevýhodou je vysoká hodnota zkratového proudu a nutnost neprodleného vypnutí poruchy. Dalšími nevýhodami jsou také vysoké hodnoty krokových a dotykových napětí.

2.2 Síť izolovaná

Jako izolované sítě jsou v České republice provozovány distribuční sítě vysokého napětí malého rozsahu, sítě vysokého napětí v průmyslových podnicích a vlastní spotřeby elektráren a tepláren. Jako vysoké napětí bereme provozované napěťové hladiny od 6 kV do 35 kV. S izolovanými sítěmi se můžeme setkat i v sítích nízkého napětí. Například v některých průmyslových závodech, které pracují s napětím 0,5 kV nebo 0,69 kV.

V rozsáhlých průmyslových závodech může být jako izolovaná síť řešena i síť nízkonapěťových rozvodů 0,4 kV. Důvodem, proč se takto provozují jen malé sítě, je normou omezený zemní kapacitní proud do 20 A. Avšak už od 10 A je doporučeno tento zemní proud kompenzovat.



Obr. 2.4: Izolovaná síť

V takto provozované síti je uzel transformátoru zcela izolován od země a můžeme uvažovat $\bar{Z}_0 \rightarrow \infty$. Mezi uzel a zem, ani mezi jednotlivé fáze a zem není připojena žádná impedance. Uvažujeme pouze síťové kapacity vůči zemi a svodové odpory vedení. Mohou být ovšem připojeny jednofázové přístrojové transformátory napětí.

V síti bez poruchy jsou kapacity i svodové odpory téměř symetrické. Fázová napětí vůči zemi jsou stejně velká a napětí uzlu vůči zemi je téměř rovno nule. Kvůli nedokonalé symetrii kapacit vedení je obvykle velikost napětí mezi uzlem a zemí $U_0 < 1 \% U_f$. Jednotlivými síťovými kapacitami vůči zemi protékají proudy jejichž součet je díky jejich fázovému posunu nulový.

Když dojde k tomu, že se jedna fáze spojí se zemí, tak se mezi uzlem transformátoru a zemí objeví fázové napětí a mezi neporušenými fázemi a zemí bude sdružené napětí. Při této poruše dojde k porušení symetrie impedancí i napětí vůči zemi a změní se úhly kapacitních proudů ve fázích. V místě spojení fáze se zemí protéká do země proud, který se vrací přes kapacity a svodové odpory neporušených fází a přes napájecí transformátor. Neporušené fáze mohou mít při některých hodnotách přechodového odporu R_p proti zemi napětí větší než sdružené.

Napětí uzlu sítě vůči zemi:

$$\bar{U}_0 = \bar{U}_f \cdot \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0} \quad (2.3)$$

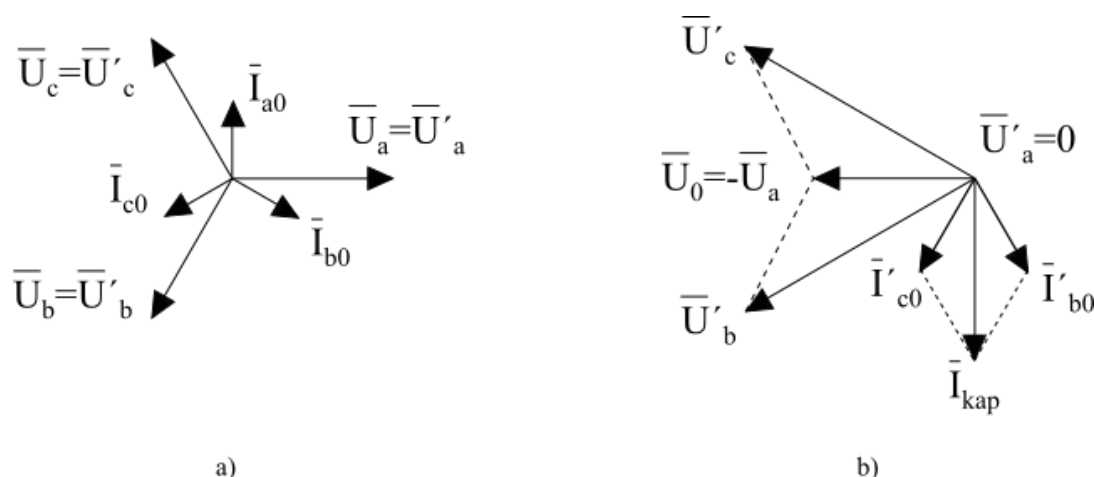
Při zemním spojení s přechodovým odporem blízcím se nule, tedy kovovém zemním spojení platí, že napětí mezi uzlem a zemí je fázové $\bar{U}_0 = \bar{U}_f$. Dále platí, že poruchový proud:

$$\bar{I}_{por} = j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \bar{U}_f \quad (2.4)$$

je kapacitního charakteru. Velikost tohoto proudu:

$$I_{por} = 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U_f \quad (2.5)$$

je označována jako kapacitní proud sítě I_{kap} . I_{kap} je jednou z charakteristických hodnot sítě a volíme podle něj způsob provozu uzlu transformátoru. Poruchový proud I_{por} je ovlivněn odporem poruchy R_p , když hodnota tohoto odporu je řádově desítky až stovky ohmů.



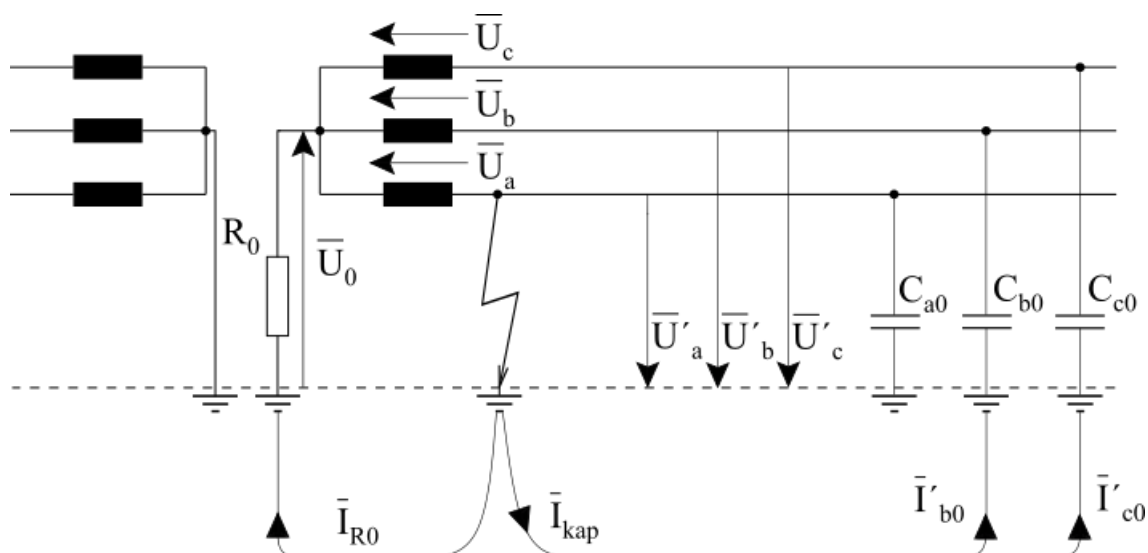
Obr. 2.5: Fázorový diagram izolované sítě a) bez poruchy, b) s poruchou

Kapacitní charakter poruchového proudu při obloukových zemních spojení způsobuje obtížné zhášení oblouku. Napětí začne po přerušení oblouku rychle narůstat a tím může být oblouk znovu zapálen. Tím vznikne přerušované zemní spojení, při kterém nastávají vysoké hodnoty přepětí. Může nastat situace, kdy přepětí v jiném místě sítě prorazí izolaci, čímž vznikne dvojitě zemní spojení. Dvojitě zemní spojení je vlastně dvoufázový zkrat, který je nutné okamžitě vypnout kvůli nadproudům.

Výhodou takto provozované sítě je jednoznačné vyhodnocení zemního spojení a možnost provozovat síť i po tom, co nastane zemní spojení, což poskytuje čas k hledání místa poruchy. Další výhodou je, že není potřeba používat zhášecí tlumivku a automatiku potřebnou k jejímu provozu. Nevýhodou je obtížné přerušení oblouku při zemním spojení a nutnost dimenzovat síť na sdružené napětí.

2.3 Síť uzemněné přes rezistor

Přes rezistor bývají uzemňovány uzly kabelových sítí vysokého napětí, které se využívají především ve městech. Tyto sítě jsou provozovány s napěťovou hladinou 22 kV, ale můžeme se setkat i s hladinami 10 kV nebo 6 kV. Uzemnění přes rezistor může být použito také u rozsáhlých venkovních sítí, u kterých byla překročena horní mez I_{kap} .



Obr. 2.6: Síť uzemněná přes rezistor

U kabelových sítí, na rozdíl od venkovního vedení vysokého napětí, nemusí být použití zhášecí tlumivky výhodné. V kabelových sítích nastávají většinou poruchy trvalého charakteru, zmenšení poruchového proudu se tedy neprojeví v samozhášení poruch, jako je tomu u venkovních vedení, na kterých nastávají obloukové poruchy. Tlumivka navíc nedokáže omezit přepětí, která se objevují při vzniku zemních spojení. Kvůli nízké kapacitní nesymetrii kabelových vedení je také obtížné ladění zhášecí tlumivky. Při provozu sítě se zemním spojením je zvýšeným napětím namáhána izolace zdravých fází, což představuje riziko vzniku vícenásobných poruch. Výhody tlumivek se zde tedy neuplatní a jejich provoz je neekonomický. Napětí uzlu sítě vůči zemi:

$$\bar{U}_0 = \bar{U}_f \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_p - j \cdot R_0 \cdot R_p \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0} \quad (2.6)$$

kde R_0 – odpor uzlového odporníku.

Kabelová vedení mají oproti venkovním vedením 30 až 70 krát větší zemní kapacitní proud na jednotku délky. [1] Jednofázové poruchy kabelů mohou přerůst ve vícefázové poruchy. Úsek, na kterém nastane vícefázová porucha, je nutné okamžitě vypnout, kvůli velkým zkratovým proudům. V místě poruchy teče proud odpovídající součtu kapacitního proudu celé sítě a proudu přes uzemňovací rezistor. Velikost poruchového proudu je závislá na rozloze sítě a na vzdálenosti místa vzniku poruchy od transformátoru.

Proud v místě poruchy:

$$\bar{I}_{por} = \bar{U}_0 \cdot \left(\frac{1}{R_0} + j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0 \right) = \bar{I}_{R0} + \bar{I}_{kap} \quad (2.7)$$

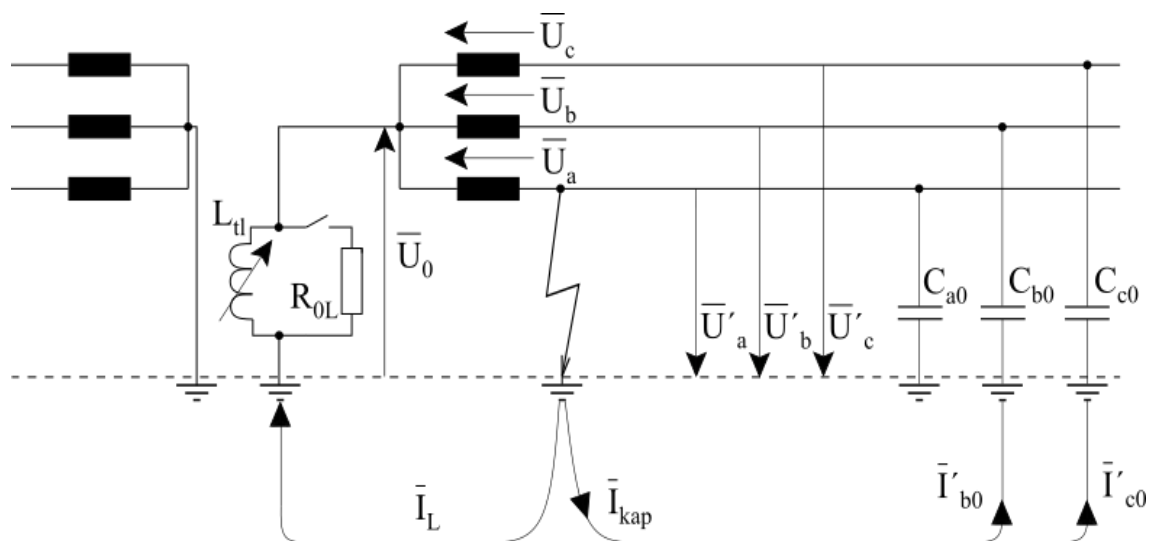
Pro kabelová vedení se tedy používá uzemnění uzlu přes rezistor o hodnotě obvykle v řádech desítek ohmů. Odpor tohoto uzlového odporníku se volí tak, aby jmenovitý proud tohoto odporníku byl větší než kapacitní proud sítě.

Uzlový odporník musí omezovat proudy zemních poruch na přijatelné hodnoty, zároveň během zemních poruch tlumit přepětí a umožňovat tak využití jednoduchých zemních ochran.

Výhodou takto provozované sítě, oproti síti s účinně uzemněným uzlem, je omezení proudů během zemní poruchy (zkratu). Díky nižším proudům nastávají lepší podmínky pro dimenzování elektrických zařízení. Díky tomu, že poruchový proud je několikanásobně větší oproti proudu v bezporuchovém stavu a je téměř ve fázi s napětím uzlu vůči zemi, je možné jednoznačně vyhodnotit zemní poruchu. Další výhodou je schopnost uzlového odporníku tlumit přepětí. Nevýhodou této sítě je, že při vzniku zkratu dojde k jejímu okamžitému vypnutí a není možné ji provozovat s poruchou. V porovnání s izolovanou nebo účinně uzemněnou sítí jsou nevýhodou vyšší náklady způsobené uzlovým odporníkem.

2.4 Síť uzemněné přes zhášecí tlumivku

Venkovní vedení vysokého napětí je v České republice většinou provozováno s uzlem transformátoru uzemněným přes zhášecí tlumivku. Tento způsob se používá u sítí, jejichž kapacitní proud je větší než 10 A. Použití tohoto způsobu je omezené také horní mezí kapacitního proudu, která je u venkovního vedení 100 A, u smíšených vedení 300 A a u kabelových 450 A.



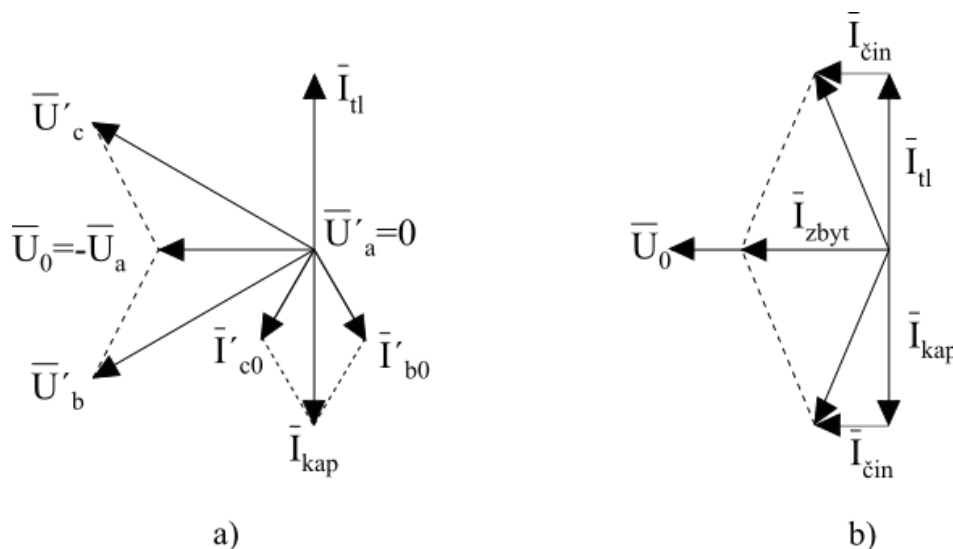
Obr. 2.7: Síť uzemněná přes zhášecí tlumivku

Zapojením zhášecí tlumivky (Petersenovi tlumivky) do uzlu transformátoru dosáhneme snížení poruchového proudu. Při poruše je mezi uzlem transformátoru a zemí fázové napětí, takže tlumivka se stane zdrojem induktivního proudu, který kompenzuje kapacitní proud vznikající během zemního spojení. V sítích 22 kV se hodnota indukčnosti zhášecí tlumivky pohybuje v rozmezí 0,14 až 3,6 H. [1] Pro správnou kompenzaci je nutné automatické nastavování indukčnosti tlumivky, aby se proud tlumivky mohl nastavovat podle zemního proudu. Zemní proud závisí na celkové délce galvanicky spojeného vedení sítě, která se mění spolu s vypínáním a zapínáním jednotlivých částí sítě nebo při rozšiřování sítě.

Napětí uzlu sítě vůči zemi je ovlivněno nesymetrií kapacit vedení, a to i přes skutečnost, že mezi kapacitami jednotlivých fází jsou jen velmi malé rozdíly. Napětí uzlu sítě vůči zemi tak může v bezporuchovém stavu dosahovat i několika procent fázového napětí. Toto napětí způsobuje, že tlumivkou i při bezporuchovém provozu protéká malý proud. Velikost napětí uzlu vůči zemi dosahuje nejvyšších hodnot během paralelní rezonance indukčnosti zhášecí tlumivky a kapacity sítě vůči zemi, tedy ve vykompenzovaném stavu. Tato vlastnost sítě je využita při ladění velikosti indukčnosti zhášecí tlumivky. [1]

Napětí uzlu sítě vůči zemi:

$$\bar{U}_0 = \bar{U}_f \cdot \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + j \cdot \left(3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega \cdot L} \right)} \quad (2.8)$$



Obr. 2.8: Fázorový diagram sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku
a) ideální kompenzace, b) skutečná kompenzace

V ideálním případě, kdy zanedbáváme odpor tlumivky i svodové odpory vedení, při vykompenzovaném stavu má proud tlumivky I_L oproti kapacitnímu proudu v místě poruchy I_{kap} stejnou velikost, ale opačný směr. Výsledný poruchový proud je tedy nulový. Skutečná tlumivka však má odpor, takže i ve vykompenzovaném stavu teče místem spojení zbytkový proud.

Proud v místě poruchy:

$$\bar{I}_{por} = \bar{U}_0 \cdot \left[\frac{1}{R_L} + j \cdot \left(3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega \cdot L} \right) \right] \quad (2.9)$$

Proud při kovovém zemním spojení ($R_p = 0$):

$$\bar{I}_{por} = \bar{U}_f \cdot \left[\frac{1}{R_L} + j \cdot \left(3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega \cdot L} \right) \right] = I_W + j \cdot (I_{kap} - I_L) \quad (2.10)$$

kde I_W – nevykompenzovaná činná složka (ztráty v tlumivce)

Kompenzace se provádí pouze pro první harmonickou kapacitního proudu, ale místem poruchy mohou protékat i vyšší harmonické proudy.

Poruchový proud je při kompenzaci nižší než kapacitní proud sítě a má činný charakter. Díky činnému charakteru proudu je během obloukových zemních spojení mnohem snazší samozhášení oblouku oproti proudu kapacitního charakteru. Oblouk se zde přeruší, aniž by došlo ke znovuzápalu a ve fázi s poruchou dochází k pomalému nárůstu napětí.

Při úplné kompenzaci kapacitního proudu poteče v místě poruchy nejnižší proud a mezi indukčností zhášecí tlumivky a kapacitou sítě vůči zemi nastane paralelní rezonance. Paralelní rezonance neboli vykompenzovaný stav nastane v případě, že je indukčnost tlumivky nastavena na hodnotu:

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0} \quad (2.11)$$

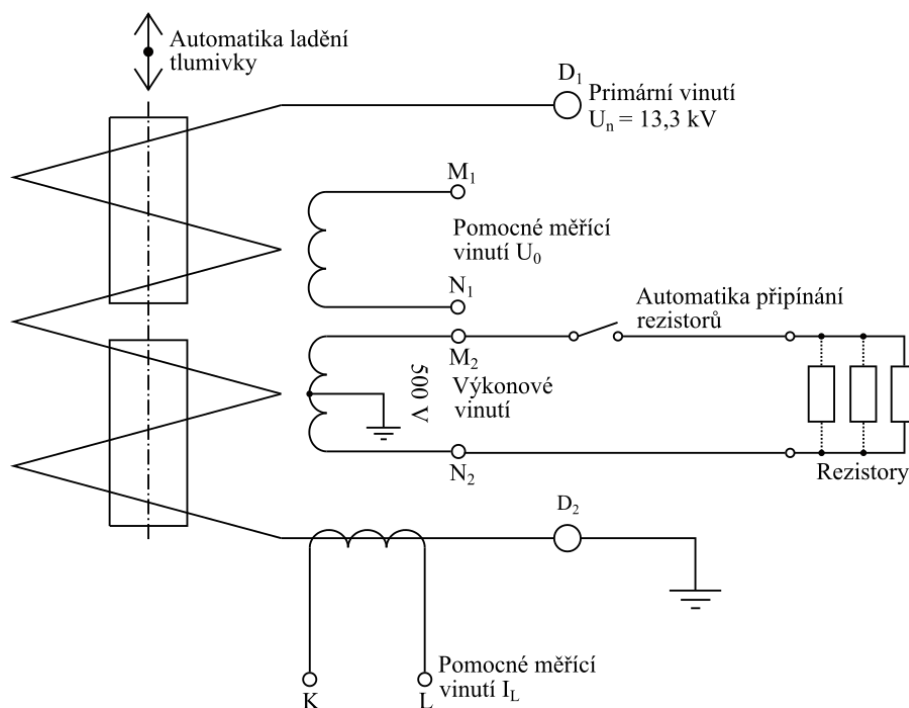
V sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku, stejně jako v izolovaných, se vedení, na kterém nastane zemní spojení, nevypíná elektrickou ochranou v rychlém čase. Zemní spojení se jen signalizuje. Signalizace pracuje na principu identifikace nesouměrného stavu. Trojvintuťový měřicí transformátor napětí připojený k přípojnicím rozvodny má jedno vinutí zapojené do otevřeného trojúhelníka. Při nesouměrnosti se v tomto trojúhelníku uzavírá netočivá složka. Do tohoto trojúhelníku je připojeno čidlo nesouměrnosti (cívka signalizačního relé). Pro identifikaci konkrétní odbočky se zemním spojením se musí v odbočce připojit součtový měřicí transformátor proudu, který během nesouměrnosti zaznamená nenulový součet proudů. [2]

Mezi výhody tohoto způsobu provozu uzlu sítě patří poruchový proud nižší než u izolované sítě, činný charakter poruchového proudu, který umožňuje snazší samozhášení obloukových poruch. Díky malému poruchovému proudu jsou i nízké nároky na uzemnění sítě. Další výhodou je nižší krokové napětí a nižší hodnoty přepětí při zemním spojení. Nevýhodou je nutnost udržování sítě ve vyladěném stavu a s tím spojené náklady na zhášecí tlumivku a automatiku ladění. Další nevýhodou je obtížné vyhledání vývodu se zemním spojením a také vliv odporových a kapacitních nesymetrií sítě na vyhodnocování zemního spojení.

2.4.1 Zhášecí tlumivka

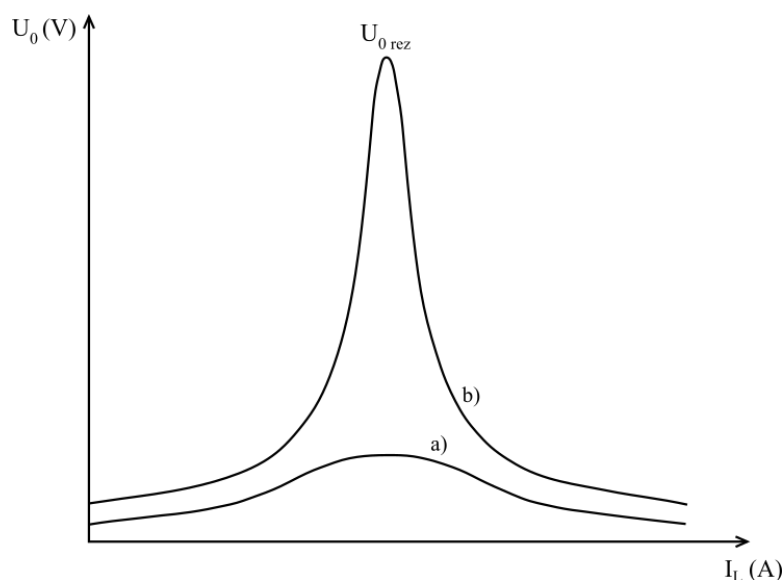
Zhášecí tlumivka je jednofázová tlumivka, která se připojuje mezi uzel transformátoru a zem. Tlumivku je možné regulovat, což umožňuje snížení velikosti poruchového proudu na minimum. Tlumivka se nazývá zhášecí, protože díky její schopnosti snižovat poruchový proud se snadněji zháší oblouky vzniklé při obloukovém zemním spojení. Tlumivka se reguluje podle velikosti sítě. Záleží tedy, kolik vedení je připojeno do uzlu (přípojnice rozvodného zařízení), ke kterému je připojen transformátor. [3]

Běžná zhášecí tlumivka se skládá z primárního vinutí, dvou pomocných vinutí určených k měření a výkonového vinutí. Primární vinutí má jmenovitou hodnotu napětí 13,3 kV a je automaticky nastavováno tak, aby bylo dosaženo dostatečné kompenzace. Měřicí vinutí KL je určeno pro připojení přístrojového transformátoru proudu, který slouží k měření kompenzačního proudu. Druhé měřicí vinutí M_1N_1 je určeno k měření napětí U_0 , tedy napětí uzlu transformátoru vůči zemi. Výkonové vinutí M_2N_2 se jmenovitým napětím 500 V je určeno k připojování rezistoru nebo soustavy rezistorů paralelně k tlumivce. Hodnoty rezistorů se většinou volí tak, aby celková hodnota odporu byla 1 Ω . [7]



Obr. 2.9: Zjednodušené schéma zhášecí tlumivky [7]

Pro správnou kompenzaci kapacitního proudu je nutné znát průběh rezonanční křivky dané sítě. Rezonanční křivka vyjadřuje závislost napětí uzlu sítě vůči zemi U_0 na kompenzačním proudu I_L , který tlumivkou prochází. Určení rezonanční křivky je možné pouze v nesymetrických sítích, tedy například v sítích, jejichž převážnou část tvoří venkovní vedení. U venkovního vedení se totiž oproti kabelovému vedení více projevuje nesymetrie napětí vůči zemi. Kabelové sítě, jejichž fázová napětí jsou symetrická, mají plochou rezonanční křivku a pro nastavení správné funkce tlumivky je nutné vytvořit umělou nesymetrii soustavy. [7]



Obr. 2.10: Příklad rezonanční křivky a) kabelového vedení, b) venkovního vedení

Při provozu sítě během kompenzace se zhášecí tlumivka nastavuje na hodnotu rezonančního napětí $U_{0 rez}$, aby zcela vykompenzovala kapacitní proud sítě. Úplná kompenzace však není kvůli nesymetrii příčných admitancí možná. U nesymetrických sítí a u sítí s malými činnými odpory může napětí uzlu sítě vůči zemi dosahovat vysokých hodnot, což způsobuje namáhání nulového bodu transformátoru. Pro snížení tohoto napětí je možné tlumivku rozladit. Vzhledem ke strmosti rezonanční křivky stačí malá změna vyladění cívky, aby došlo k dostatečnému snížení napětí mezi uzlem transformátoru a zemí. [7]

V našich sítích je ladění zhášecích tlumivek většinou automatické. Ladění se provádí změnou magnetického odporu ve vzduchové mezeře. Automatika ladění nastavuje indukčnost tlumivky tak, aby poruchový proud byl minimální. Při tomto minimálním proudu je napětí mezi uzlem transformátoru a zemí maximální a nastává paralelní rezonance sítě. Kritériem pro vyladění je právě maximální hodnota napětí na tlumivce. Po každé změně sítě (připojení nebo odpojení vedení) se tlumivka přeladuje. Přeladování nastává s určitým časovým zpožděním, aby tlumivka reagovala pouze na trvalé změny v síti a nereagovala na přechodné změny napětí uzlu sítě vůči zemi. [7]

Určení vývodu se zemní poruchou může být kvůli nízkým hodnotám poruchového proudu velice obtížné. Kvůli těmto případům má tlumivka možnost paralelního připojení rezistoru. Připojením rezistoru se navýší činná složka poruchového proudu, což umožní správnou funkci ochran a nalezení vývodu se zemní poruchou. Rezistor se k tlumivce připojuje automaticky. Rezistor je potřeba připojovat jen při trvalých zemních poruchách. Poté co zemní porucha

nastane tedy automatika tlumivky nespíná okamžitě, pro případ přechodné zemní poruchy. Doba, po kterou je rezistor k tlumivce připnut, je časově omezená. Rezistor se připojuje na dobu 1 až 3 s. Tedy pouze na dobu potřebnou k lokalizaci poruchy. [8]

2.5 Srovnání jednotlivých způsobů provozu uzlu sítě

S účinně uzemněným uzlem je v České republice provozována soustava zvláště vysokého napětí, velmi vysokého napětí a většina sítí nízkého napětí. Sítě vysokého napětí jsou nejčastěji provozovány s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku. S izolovaným uzlem jsou provozovány malé sítě vysokého napětí v některých průmyslových podnicích, dále také vlastní spotřeby elektráren a tepláren. S izolovaným uzlem mohou být v průmyslových podnicích provozovány i sítě nízkého napětí. S uzlem uzemněným přes rezistor se setkáváme především u kabelových sítí, ale také u venkovních sítí, u nichž byla překročena horní mez kapacitního proudu sítě.

Jedním z kritérií, podle kterých volíme uzemnění uzlu sítě, je napětí neporušených fází vůči zemi během poruchy. Nevýhodou izolované sítě a sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku je, že při zemní poruše vzroste napětí neporušených fází vůči zemi na sdruženou hodnotu. To vyžaduje dimenzování sítě na tato napětí, což zvyšuje náklady na vybavení a stavbu sítě. U účinně uzemněné sítě a sítě uzemněné přes rezistor zůstávají napětí neporušených fází vůči zemi na fázové hodnotě. Díky tomu jsou zde nižší nároky na izolaci. To v praxi znamená například možnost použití méně masivních stožárů venkovního vedení, což snižuje náklady na výstavbu tohoto vedení. S napětím souvisí také nižší hodnota přepětí u účinně uzemněné sítě a u sítě uzemněné přes rezistor.

Dalším kritériem je proud tekoucí místem poruchy. Nejvyšší poruchový proud je v účinně uzemněné síti. O něco nižší poruchový proud je v síti uzemněné přes rezistor, kde je tento proud omezen uzlovým odporníkem. Tyto sítě není možné, kvůli vysokým hodnotám poruchového proudu, provozovat po vzniku poruchy a je nutné je okamžitě vypnout. Výhodou sítí izolovaných a sítí uzemněných přes zhášecí tlumivku je možnost jejich provozu i po vzniku poruchy, a to do doby, než je porucha nalezena. V izolované síti jsou proudy malé, ale mají kapacitní charakter, takže přerušeni oblouku vzniklého při zemním spojení je obtížné. V sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku je díky zhášecí tlumivce poruchový proud nejnižší, a navíc má činný charakter, což při vzniku oblouku způsobí jeho snazší samozhášení. Díky takto nízkému proudu jsou i nižší nároky na uzemnění sítě.

Vyhodnocování, na jakém vývodu vznikla zemní porucha, je v účinně uzemněné síti, izolované síti i síti uzemněné přes rezistor jednoznačné a jeho určení je možné i s pomocí

poměrně jednoduchých přístrojů. Obtížné je vyhledávání zemních poruch v sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku, u nichž je toto vyhodnocování nejvíce ovlivněno odporovými a kapacitními nesymetriemi sítě.

Z hlediska nákladů na uzemnění je nejméně nákladná izolovaná síť, kde se uzemnění vůbec neprovádí. Ze způsobů uzemnění, na které vznikají náklady, je nejlevnější účinné uzemnění uzlu transformátoru. Dražším řešením je poté použití uzlového odporníku v sítích uzemněných přes rezistor. Největší náklady na uzemnění jsou v sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku, kde jsou nutné náklady na zhášecí tlumivku, automatiku jejího ladění a také na složitější přístroje k určování vývodu vedení se zemní poruchou.

3 Způsoby vyhodnocování zemních poruch

Zjišťování zemních poruch v sítích vysokého napětí je možné rozdělit do dvou základních skupin. Zjištění toho, že zemní porucha vznikla a zjištění na kterém konkrétním vývodu zemní porucha nastala. Pro tyto dvě základní skupiny existují různé druhy ochran. Tyto ochrany reagují na veličiny, které jsou pro vývod se zemní poruchou charakteristické. U sítí, u kterých je povoleno jejich provozování i potom co na nich nastane zemní porucha a zároveň se jedná o síť malého rozsahu, tedy zpravidla izolované síť, obvykle stačí když ochrany pouze signalizují, že k zemní poruše v síti došlo. U sítí, které je po vzniku zemní poruchy nutné rychle vypnout, tedy účinně uzemněné síť a síť uzemněné přes rezistor, je použití zemních ochran jednotlivých vývodů nutností a závisí na nich bezpečný a spolehlivý provoz sítě.

V izolovaných sítích a sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku určujeme, jestli je síť v normálním stavu nebo jestli nastala zemní porucha, podle napětí uzlu sítě vůči zemi.

Pokud má v síti přechodový odpor jednofázové poruchy R_p velikost, při které se napětí uzlu transformátoru vůči zemi zvýší nad hodnotu 33 % fázového napětí sítě, mluvíme o tomto stavu jako o zemním spojení. Toto napětí nenastává při žádné konkrétní hodnotě R_p . Odpor, při kterém napětí uzlu sítě vůči zemi přesahuje danou mez, je nepřímo úměrný velikosti sítě. Tedy čím je síť rozsáhlejší, tím menší hodnota R_p je potřeba pro vznik zemního spojení. V sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku, oproti sítím s izolovaným uzlem, stačí mnohem menší snížení symetrie jedné fáze k tomu, aby napětí uzlu vůči zemi stoupl nad mez 33 % fázového napětí a nastalo zemní spojení. [1]

Jestli napětí uzlu sítě vůči zemi překročilo stanovenou mez sledují zemní relé. V praxi se napětí uzlu vůči zemi neměří přímo, ale zjišťuje se měřením napětí pomocných vinutí transformátoru napětí, která jsou spojena do otevřeného trojúhelníka. Pokud je porušena symetrie napětí proti zemi, pak je na svorkách výstupu otevřeného trojúhelníka napětí, které odpovídá fázorovému součtu jednotlivých fázových napětí: [1]

$$\bar{U}_0 = \bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C \quad (3.1)$$

Převod pomocného vinutí se volí tak, aby při kovovém zemním spojení, při kterém nastane plná nesymetrie napětí, bylo na výstupu otevřeného trojúhelníka napětí 100 V.

Existují dvě možnosti pro určení vývodu, na kterém nastalo zemní spojení. První postup je postupné odpínání jednotlivých vývodů, což může být prováděno ručně nebo automaticky,

příčemž při odepnutí vývodu, na kterém zemní spojení nastalo, se projeví vymizení zemního spojení. Druhým způsobem je měření činných nebo jalových nulových výkonů na vývodech.

Vývod se zemní poruchou se od ostatních vývodů bez poruchy odlišuje poruchovým proudem. Kvůli velikostem poruchových proudů při porovnání s proudy zátěže většinou nejde zjišťovat poruchový stav přímo měřením proudů, které tečou jednotlivými fázemi, jako je to možné v sítích velmi vysokého napětí, ve kterých proudy zemních poruch mnohonásobně převyšují provozní proudy.

Proto se v sítích vysokého napětí používají pro zjištění, na kterém vývodu nastala zemní porucha, směrová výkonová nebo směrová nadproudová kritéria využívající netočivou složku výkonu nebo netočivou složku proudu.

Ke zjišťování netočivé složky proudu, která se objevuje ve vývodu s poruchou, se používá součtové zapojení proudových transformátorů. V uzlu transformátorů se uzavírá součtový proud.

Součtový proud uzavírající se v uzlu:

$$\bar{I}_Z = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C \quad (3.2)$$

Aby bylo u izolovaných sítí možné použít proudové kritérium, musí se u každého vývodu proud zemní ochrany dostatečně lišit při poruše na vlastním vývodu a mimo tento vývod. Tato podmínka musí být splněna nejen při kovovém zemním spojení, ale i při odporovém zemním spojení. Pokud je napětí uzlu transformátoru vůči zemi na hodnotě 33 % fázového napětí, může se vývodem, na kterém nastala porucha, uzavírat jen 33 % kapacitního proudu sítě. Směr proudu, tedy i jalového výkonu, se mezi neporušeným vývodem a vývodem s poruchou jednoznačně liší. V izolované síti se tedy obvykle využívá směru jalového výkonu. Jalový výkon je dán napětím uzlu sítě vůči zemi a součtovým proudem. [1]

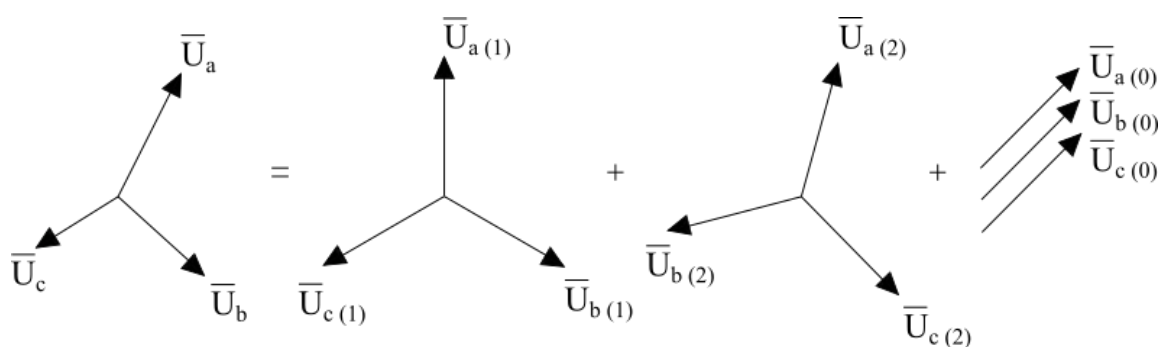
U sítí uzemněných přes zhášecí tlumivku jsou velikost a směr jalové složky proudu závislé na vyladění a na přechodovém odporu. U těchto sítí se tedy obvykle jako kritérium využívá činný výkon. Vlivem nesymetrií v síti se v uzlu proudových transformátorů uzavírá rušivý proud. Aby mohly být zemní ochrany nastaveny nad hodnoty rušivých proudů, používá se v sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku při trvalých zemních spojeních zvyšování proudu. Zvyšování proudu se provádí paralelním připojováním rezistoru R_{0L} k části sekundárního vinutí kompenzační tlumivky. Při vyhodnocení trvalého zemního spojení se rezistor připojuje automaticky na dobu 1 až 3 s. [8] U vývodu se zemním spojením se připojení odporu projeví na součtovém proudu, ale u neporušeného vývodu se součtový proud nezmění. [1]

U sítí uzemněných přes rezistor je možné jednoduše zjistit zemní poruchy použitím nadproudového kritéria. I u těchto sítí je zemními ochranami vyhodnocovaný součtový proud. I zde je potřeba, aby minimální proud během poruchy byl nad rozběhovou hodnotou ochrany. Toto nastavení musí být nad součtovým proudem (vlastním kapacitním proudem vedení), pokud nastane porucha mimo vlastní vedení. U velkých kabelových sítí není možné tyto podmínky splnit, protože kvůli velkým kapacitním proudům není možné nastavit ochrany dostatečně nízko. [1,5]

3.1 Metoda souměrných složek

Metoda souměrných složek se využívá ke stanovení napěťových a proudových poměrů v sítích. Tato metoda se používá k vyhodnocení poruch v ustáleném stavu. Její výhodou je poměrně snadné řešení a dostatečně přesné interpretování fyzikální reality. Využívá se zde skutečnosti, že v třífázových soustavách je možné všechny nesymetrické soustavy fázorů rozložit na trojici souměrných soustav. Tyto soustavy se nazývají sousledná (1), zpětná (2) a netočivá (0). [10]

Následující odvození provedeno dle [10].



Obr. 3.1: Rozklad nesymetrické soustavy fázorů na trojici souměrných soustav

Když sečtu jednotlivé složky, dostanu původní fázor:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_a &= \bar{U}_{a(1)} + \bar{U}_{a(2)} + \bar{U}_{a(0)} \\
 \bar{U}_b &= \bar{U}_{b(1)} + \bar{U}_{b(2)} + \bar{U}_{b(0)} \\
 \bar{U}_c &= \bar{U}_{c(1)} + \bar{U}_{c(2)} + \bar{U}_{c(0)}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Při využití U_a jako referenčního napětí, vzniknou rovnice ve tvaru:

$$\begin{aligned}\bar{U}_a &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_b &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_c &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}\quad (3.4)$$

kde pro fázory natočení \bar{a} a \bar{a}^2 platí:

$$\begin{aligned}\bar{a} &= e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \bar{a}^2 &= e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\end{aligned}\quad (3.5)$$

Předchozí rovnice je možné zapsat v maticovém tvaru $\bar{U}_f = \bar{F} \cdot \bar{U}_s$:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix}\quad (3.6)$$

Pro matici \bar{F} se používá název Fortescue matice. Její determinant není roven nule, takže lze vytvořit inverzní matici a docílit tím maticového zapsání jednotlivých složek napětí. Tím vznikne zápis ve tvaru $\bar{U}_s = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{U}_f$:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\quad (3.7)$$

Dále tedy platí:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_a + \bar{a} \bar{U}_b + \bar{a}^2 \bar{U}_c) \\ \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_a + \bar{a}^2 \bar{U}_b + \bar{a} \bar{U}_c) \\ \bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c)\end{aligned}\quad (3.8)$$

Obdobný postup platí pro složkové proudy.

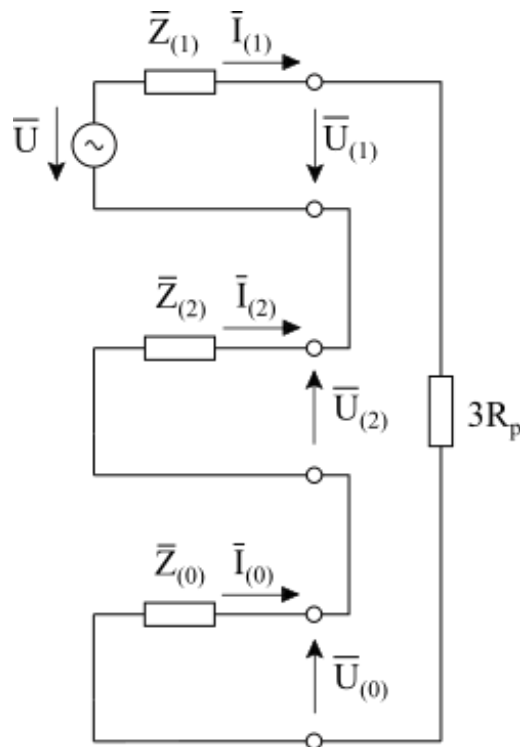
Pokud nastane jednofázová porucha, platí tyto rovnice:

$$\begin{aligned}\bar{U}'_a - \bar{U}_a - \bar{U}_0 &= 0 \\ \bar{U}'_b - \bar{U}_b + \bar{U}_0 &= 0 \\ \bar{U}'_c - \bar{U}_c - \bar{U}_0 &= 0\end{aligned}\quad (3.9)$$

Pokud dojde k poruše na fázi a , dojde ke změně:

$$\begin{aligned}\bar{U}'_a &= 0 \\ \bar{U}_0 &= -\bar{U}_a \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_b + \bar{U}_0 = \bar{U}_a \cdot (-1 + \bar{a}^2) = -\sqrt{3} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot \bar{U}_a \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_c + \bar{U}_0 = \bar{U}_a \cdot (-1 + \bar{a}) = -\sqrt{3} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} \cdot \bar{U}_a\end{aligned}\tag{3.10}$$

Náhradní složkové schéma je možné využít k výpočtu jednotlivých složkových napětí a poruchového proudu \bar{I}_{por} , který protéká místem poruchy.



Obr. 3.2: Náhradní složkové schéma

Pro složkové proudy platí tyto vztahy:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_a = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3 \cdot R_p}\tag{3.11}$$

4 Systémy chránění elektrických sítí

V elektrických sítích hrají nezastupitelnou roli ochrany. Ochrany zajišťují bezpečný provoz sítě, ale i ostatních zařízení, ke kterým jsou instalovány. Pomocí čidel a měřících transformátorů monitorují potřebné veličiny u chráněného objektu. Základní funkcí ochrany je rozpoznání, zda je chráněný objekt v normálním provozním stavu, nebo jestli na něm nastala porucha. V případě poruchy vysílá ochrana signál k vypnutí daného úseku soustavy. [9]

Příklad dělení ochran: [8]

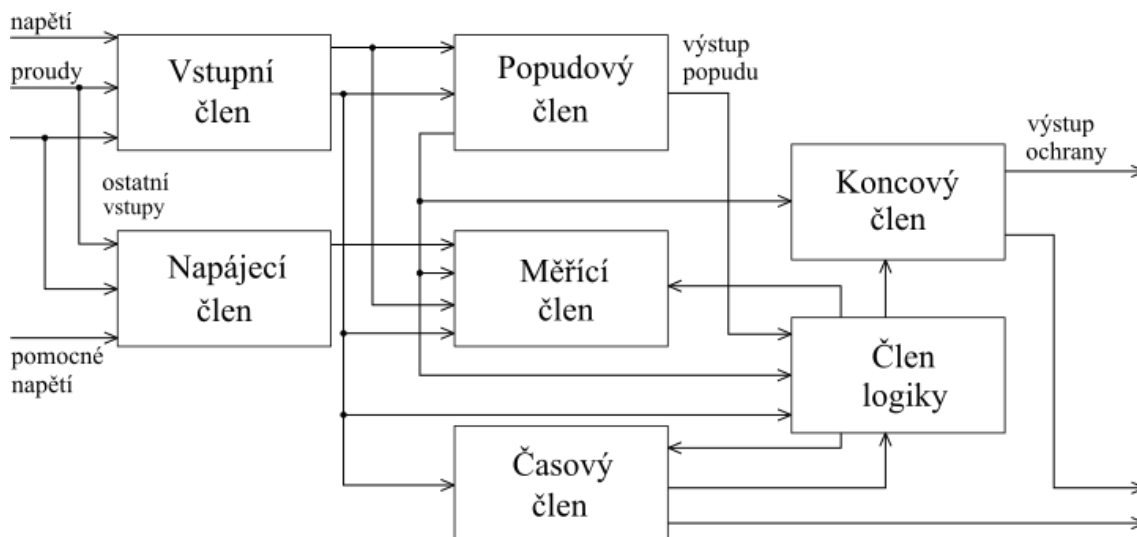
- Podle chráněného objektu na:
 - vedení,
 - transformátor,
 - přípojnice,
 - generátor.
- Podle poruchy na:
 - zkrat,
 - přetížení,
 - podpětí,
 - přepětí.
- Podle principu na:
 - srovnávací,
 - distanční,
 - rozdílové.
- Podle doby působení na:
 - mžikové,
 - časově závislé,
 - časově nezávislé.
- Podle konstrukce na:
 - elektromechanické,
 - analogové,
 - digitální.

Příklad požadavků na ochrany: [8]

- selektivita,
- rychlost,
- citlivost,
- přesnost,
- spolehlivost,
- snadná údržba,
- odolnost proti EMC.

Ochrana je tvořena základními členy s určitými funkcemi. Základními členy jsou: [8]

- vstupní člen – zjišťuje stav chráněného objektu,
- popudový člen – informuje člen logiky o poruše,
- napájecí člen – napájí integrované obvody ochrany,
- měřicí člen – rozhoduje, jestli nastala porucha, je u něj tedy potřebná velká citlivost,
- časový člen – informuje ostatní členy o čase,
- člen logiky – zpracuje signály od měřicího členu a vyšle signál koncovému členu,
- koncový člen – obvykle jde o relé s výkonovými kontakty.



Obr. 4.1: Základní členy ochrany [8]

4.1 Opětné zapínání

U kabelového i venkovního vedení se vyskytují poruchy. V kabelových sítích jsou téměř všechny poruchy trvalé. Při poruše na kabelovém vedení je tedy nutné odpojit celé vedení. Oproti tomu u venkovních vedení je většina poruch přechodného charakteru. Patří mezi ně například atmosférické přepětí, poruchy v důsledku přiblížení vodičů, nebo zapálení oblouku kvůli větvi spadlé na vedení. Tyto poruchy zmizí po odpojení napájení daného vedení. Kvůli přechodnému charakteru poruch by bylo trvalé odpojení vedení zbytečné, proto se používá opětné zapínání. Funkce OZ zajišťuje zapnutí daného vedení po určitém časovém intervalu, čímž přispívá ke spolehlivosti dodávky elektrické energie. OZ doplňuje funkci ochran.

Pokud nastane porucha, tak ji nejprve zaznamená ochrana a dá okamžitě povel k odpojení poškozeného vedení. Po krátké době (desetiny sekundy) dá OZ impulz k připojení odpojeného vedení. Pokud měla porucha přechodný charakter, tak dané vedení pokračuje v normálním provozu. Pokud měla porucha trvalý charakter, pak OZ proběhlo neúspěšně a ochrana odpojí úsek vedení s poruchou natrvalo. Po tomto odpojení už systém OZ do sítě nezasahuje.

V účinně uzemněných sítích, ve kterých při spojení fáze se zemí vzniká zkrat, je možné použít i jednofázové OZ. Tedy opětovné zapnutí jen pro jednu fázi, na které porucha nastala. Fáze s poruchou se tedy odpojí na obou jeho koncích a po krátké době se opět připojí. Doba, po kterou je fáze s poruchou odpojena je 0,2 až 0,6 s. [8] Pro použití OZ jen pro jednu fázi je nutné mít pro každou fázi samostatný vypínač. Během tohoto provozu vzniká na vedení nesymetrie proudů. To je sice nežádoucí stav, ale po tak krátkou dobu je provoz sítě v tomto stavu možný.

Při dvofázovém i třífázovém zkratu se v sítích velmi vysokého napětí a v sítích vysokého napětí používá třífázové OZ. Třífázové OZ se používá i v sítích, ve kterých nastává zemní spojení, tedy izolované sítě a sítě s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku. Při použití třífázového OZ je doba, po kterou je vedení s poruchou odpojeno, omezena kvůli požadavku na zachování synchronního chodu rozpojených soustav. Doba, po kterou je vedení s poruchou odpojeno je 0,2 až 0,3s. [8] Při používání třífázového OZ je možné použít i třífázové vypínače a není nutné mít pro každou fázi vypínač zvlášť.

Pro zajištění úspěšného cyklu OZ je u vedení napájených z obou stran nutné, aby ochrany na obou koncích vedení vydaly signál ke spuštění OZ současně. Současného vyslání lze dosáhnout dvěma metodami. [8]

Při první metodě je použit spojovací kanál mezi oběma konci vedení. Toho využívají rozdílové a srovnávací ochrany.

Druhá metoda se používá u distančních ochran, které nemají vazbu mezi oběma konci vedení. U distančních ochran se současné sepnutí OZ řeší prodloužením první zóny ochrany z obvyklých 80 % délky vedení na 120 % jeho délky. Díky tomu i porucha na konci vedení spadá do prvního stupně ochrany a nastává současné OZ. K prodloužení první zóny dochází jen při prvním pokusu o vypnutí. Při neúspěšném cyklu OZ je kvůli selektivitě ochran nutné, aby byla porucha na konci vedení definitivně vypnuta až ve druhém stupni.

4.2 Distanční ochrana

Distanční ochrana patří k nejpoužívanějším ochranám. Používá se v přenosové i distribuční soustavě. Tato ochrana využívá pro svoji funkci napětí a proud naměřené v místě ochrany. Není tedy závislá na ochranách z druhého konce vedení. Mohou také pracovat jako vzdálené záložní ochrany dalších objektů sítě.

Tato ochrana zjišťuje z poruchového napětí a proudu poruchovou impedanci v místě, ve kterém je nainstalována. Takto určená poruchová impedance je následně porovnávána s vypínací charakteristikou. Pokud je zjištěná poruchová impedance menší než nastavená hodnota, vyhodnotí ochrana tento stav jako poruchu a vyšle vypínací signál na výkonový vypínač.

Ochrana využívá proudové a napěťové měřicí transformátory. Ty však mohou být nepřesné, a proto může být nepřesné i určení poruchové impedance. Proto není možné chránit celé vedení jedním distančním stupněm. První zóna ochrany musí být tedy kratší než samotné chráněné vedení (např. 15 %). Zbytek vedení se nachází ve druhé zóně. Ta je kvůli selektivitě časově zpožděna oproti ochraně následného vedení.

Distanční ochrana slouží také jako záložní ochrana následného vedení. K tomu slouží druhá zóna, do které patří protilehlá přípojnice a část následného vedení. Ochrana má také třetí zónu, která pokrývá i zbytek následného vedení. Tyto stupně mají nastavené určité časové zpoždění, aby bylo dosaženo potřebné selektivity s ochranou následného vedení. Časová závislost jednotlivých stupňů distanční ochrany představuje schodovitou křivku, která je závislá na měřené impedanci, tedy na vzdálenosti poruchy. [8]

4.3 Srovnávací ochrana

Srovnávací ochrana pracuje na principu porovnávání hodnot elektrických veličin (např. směr proudu, fáze proudu, činný výkon) na začátku a konci vedení. Na začátku i na konci chráněného vedení jsou instalována směrová relé. Tato relé jsou navzájem propojena. Při normálním provozním stavu prochází oběma konci vedení proud ve stejném směru. Při poruše teče proud do místa vzniku poruchy z obou stran vedení. To zaznamenají směrová relé, která vyšlou signál ochraně. Ta vyšle vypínací signál výkonovým vypínačům, které vedení s poruchou odpojí z obou stran. Srovnávací ochrany pracují ve spolupráci s automatikou OZ. [8]

4.4 Rozdílová ochrana

Princip rozdílové ochrany je založen na předpokladu, že provozní proudy, které chráněným objektem za normálního stavu procházejí, mají na všech vývodech nulový součet. Pokud nastane situace, kdy je součet proudů nenulový, znamená to vznik nového svodu, kterým protéká poruchový rozdílový proud. V tomto případě ochrana okamžitě odpojuje chráněný objekt od napájení. I v normálním bezporuchovém stavu může unikat malý proud. V ochraně navíc může být jeho hodnota zkreslena chybou měření. Proto je u ochrany potřeba nastavit necitlivost, která je určena chybou měření a chybou převodu přístrojového transformátoru. [9]

4.5 Nadproudová ochrana

Úkolem nadproudové ochrany je chránit objekt před přetížením nebo zkratem. Ochrana začne působit až při zvýšení proudu nad určitou mez. Tuto hranici je na nadproudové ochraně nutno předem nastavit. Tyto ochrany jsou velmi rozšířeny především díky své jednoduchosti. Mohou být použity jako hlavní, ale i jako záložní ochrany. Pokud tyto ochrany pracují v jiných než radiálních sítích, potřebují také informaci o směru toku proudu.

Nadproudové ochrany dělíme podle závislosti jejich vypínání na čase na:

- časově závislé,
- časově polozávislé,
- časově nezávislé,
- mžikové.

5 Metody detekce zemní poruchy v sítích vysokého napětí

Pro lokalizaci vývodu se zemní poruchou se používají různé metody. Jejich použití závisí na velikostech proudů a napětí během poruchy. Jak již bylo uvedeno, velikosti těchto napětí a proudů závisí na způsobu uzemnění uzlu sítě.

V elektrických sítích je nutné nejprve určit, že k poruše vůbec došlo. Vznik zemní poruchy se určuje měřením netočivé složky napětí U_0 , kterou je možné změřit přístrojovými transformátory napětí. Tyto transformátory jsou zapojeny do otevřeného trojúhelníku a jsme schopni jimi naměřit trojnásobek netočivé složky napětí. V sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku je možné k měření tohoto napětí použít automatiku tlumivky. V rozvodnách se pro identifikaci vývodu s poruchou měří také netočivá složka proudu I_0 . K měření tohoto proudu se používá součtové zapojení přístrojových transformátorů proudu, jimiž naměříme trojnásobek netočivé složky proudu. [10]

Zemní spojení je ochranami vyhodnoceno, pokud netočivá složka napětí překročí stanovenou mez. Toto napětí je závislé na hodnotě odporu poruchy a na rozloze provozované sítě. Čím je síť rozsáhlejší, tím menší R_p stačí ke vzniku zemního spojení. [10]

Netočivá složka napětí je téměř stejná v celé síti, proto lze toto napětí použít jen k indikaci zemní poruchy, ale není možné ji použít k určení konkrétního vývodu se zemní poruchou. Samotné určení vzniku poruchy stačí jen u sítí malého rozsahu, které mají malý poruchový proud. Díky tomu nevznikají nebezpečné hodnoty krokových napětí a tyto soustavy mohou být provozovány i po vzniku poruchy. U sítí většího rozsahu je nutné i určení vývodu, na kterém porucha nastala. Pro určení konkrétního vývodu se zemní poruchou jsou používány metody aktivní a pasivní. Metody pasivní se dále dělí na metody statické a dynamické. [10]

Aktivní metody

Aktivní metody spočívají v tom, že se do soustavy injektuje signál, jehož pomocí se nalezne místo poruchy. Tento signál může mít konstantní nebo proměnnou frekvenci.

Injektování signálu se provádí pomocí napěťových transformátorů, které při vzniku zemního spojení začnou do obvodu přenášet daný generovaný signál. Tento signál má konstantní frekvenci a přes místo poruchy se uzavírá do smyčky. Vývod, na kterém zemní spojení nastalo, a místo jeho vzniku se určí pomocí stopování tohoto vygenerovaného signálu. Úroveň tohoto signálu je omezena napěťovým transformátorem. Nevýhodou je tak nutnost

použití zařízení pro vygenerování signálu. Výhodou je, že místo generování nového signálu je možné využít signál HDO o frekvenci např. 216,66 Hz. [11] U vysokoimpedančních nebo u obloukových zemních spojení s přerušovaným obloukem je však malá pravděpodobnost správného určení místa vzniku poruchy. Správnou funkci této metody ovlivňuje také celková kapacita soustavy. Vysoká kapacita vedení způsobuje snížení přesnosti při lokalizaci poruchy.

V sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku, kde často nastávají vysokoimpedanční zemní spojení, se používá proudový signál s rezonanční frekvencí. Při nízkoimpedančních zemních spojeních se používá konstantní signál o frekvenci 70 Hz. [11] Tyto signály jsou následně měřeny na jednotlivých vývodech a sleduje se jejich útlum. Na žádném vývodu nesmí dojít k útlumu signálu většímu než 17 %. [11] Pokud dojde k většímu útlumu, je vývod označen za vývod s poruchou.

Tyto metody však nejsou v praxi příliš využívány. Je to způsobeno především jejich technickou náročností a nutností použít zdroj pro vytvoření injektovaného signálu.

Pasivní metody

Pasivní metody je možné využít k lokalizaci vývodu se zemní poruchou pouze za pomoci napět'ových a proudových signálů vyvolaných samotnou poruchou. Pasivní metody jsou děleny na:

- Statické metody – k lokalizaci vývodu s poruchou používají napět'ové a proudové signály v ustáleném stavu,
- Dynamické metody – k lokalizaci vývodu s poruchou používají napět'ové a proudové signály v průběhu přechodného děje.

5.1 Statické metody vhodné pro izolované sítě

Porovnání amplitudy netočivé složky proudu

Metoda spočívá v porovnávání amplitud netočivých složek proudů pro jednotlivé vývody. Pokud proud při poruše překročí určitou nastavenou hodnotu, začne ochrana porovnávat amplitudy netočivých složek proudů jednotlivých vývodů a vývod s největší amplitudou je označen za vývod s poruchou. Nevýhodou je u této metody nízká citlivost a závislost na přesném změření netočivé složky proudu, a to především v případech, kdy je kapacita celé sítě téměř stejná jako kapacita postiženého vývodu nebo během vysokoimpedančních zemních spojení. [10]

Porovnání fáze netočivé složky proudu

Během této metody se porovnávají fáze netočivých složek proudů v jednotlivých vývodech. Vývod, na kterém nastala zemní porucha, má opačnou fázi netočivé složky proudu. Jestli bude za vývod s poruchou označen správný vývod, závisí na délce jednotlivých vývodů, velikosti přechodového odporu poruchy a na proudové nesymetrii sítě.

Lepšího vyhodnocování vývodu se zemní poruchou je možné dosáhnout kombinací metod. Napřed se provede porovnání amplitud netočivých složek proudů, čímž se vyberou vývody s možným výskytem zemní poruchy. Poté se u takto vybraných vývodů porovnají fáze netočivých složek proudů. Za vývod s poruchou je označen vývod s opačnou fází netočivé složky proudu. Pokud nastane situace, že všechny vývody mají fázi stejnou, pak nastala porucha v rozvodně. Bezchybná identifikace vývodu, na kterém nastala zemní porucha, však není zaručena ani touto kombinací. Toto platí především pro vysokoimpedanční zemní spojení v sítích malého rozsahu, ve kterých se vyskytují malé hodnoty netočivých složek proudů. Může tak dojít k chybné identifikaci vývodu s poruchou. [7]

Určení toku netočivé složky jalového výkonu

Při této metodě dochází k porovnávání netočivých složek proudů a napětí jednotlivých vývodů před zemní poruchou a během zemní poruchy. Před poruchou se netočivá složka proudu zpožďuje za netočivou složkou napětí o 90° , zatímco u vývodu se zemní poruchou netočivá složka proudu o 90° předbíhá před netočivou složkou napětí. Tím dochází k vyhodnocování toku jalového výkonu. O vzniku zemního pojení na vývodu tedy rozhoduje znaménko jalového výkonu. U vývodů v běžném provozu je znaménko kladné, u vývodu s poruchou záporné. U této metody tedy není nutné porovnávat jednotlivé vývody mezi sebou. I u této metody je omezena její citlivost pro krátké vývody a nízkou hodnotou netočivé složky proudu. [10]

Maximální změna jalové složky netočivého proudu

U této metody se v bezporuchovém stavu určí pro jednotlivé vývody referenční signál netočivé složky proudu spolu s fázovým posunem netočivé složky napětí a po vzniku zemní poruchy dojde k vyhodnocení jejich změny. Vývod s největší změnou jalové složky netočivého proudu je označen jako vývod s poruchou. [10]

5.2 Statické metody vhodné pro sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku

Metoda detekce činné složky poruchového proudu

V sítích s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku patří metoda detekce činné složky poruchového proudu neboli Wattmetrická metoda, k základním metodám pro detekci zemní poruchy. Metoda je založena na skutečnosti, že zhášecí tlumivkou nedokážeme dokonale vykompenzovat celý poruchový proud. Po kompenzaci zůstane v síti zbytkový neboli reziduální proud činného charakteru, který lze použít pro lokalizaci vývodu s poruchou. U vývodu s poruchou je totiž činná složka poruchového proudu, a tedy i výkonu, větší než u vývodů bez poruchy a má opačný směr. Citlivost a přesnost této metody je závislá na přesné funkci proudových transformátorů a na velikosti činné složky poruchového proudu. Selektivnost metody může být ovlivněna chybami měřících transformátorů. Citlivost této metody je možné zvýšit krátkodobým připojením odporníku k výkonovému vinutí zhášecí tlumivky, čímž dojde k navýšení velikosti činné složky poruchového proudu. [10]

Admitanční metoda netočivé složky

Tato metoda spočívá ve stálém měření netočivé složky napětí a proudu. Poté co netočivá složka napětí \bar{U}_0 překročí nastavenou mez, provede ochrana s využitím netočivé složky proudu \bar{I}_0 výpočet admitance podle vztahu:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0} \quad (5.1)$$

Přírůstkovou metodou lze zvýšit přesnost při určování admitance. K výpočtu admitance se použijí přírůstky netočivé složky proudu a napětí mezi stavem před poruchou (prefault) a při poruše (fault):

$$\bar{Y}_0 = \frac{(\bar{I}_0_{fault} - \bar{I}_0_{prefault})}{-(\bar{U}_0_{fault} - \bar{U}_0_{prefault})} = \frac{\Delta \bar{I}_0}{-\Delta \bar{U}_0} \quad (5.2)$$

U vývodu bez poruchy je hodnota vypočtené admitance rovna celkové admitanci daného vývodu $\bar{Y}_{v_{yv}}$ se záporným znaménkem:

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{v_{yv}} = -(G_{v_{yv}} + jB_{v_{yv}}) \quad (5.3)$$

I u této metody dochází k závislosti citlivosti na velikosti netočivých složek proudu a napětí. Vypočtené hodnoty konduktance $G_{v_{yv}}$ a susceptance $B_{v_{yv}}$ mohou mít při nízkých hodnotách netočivých složek proudu a napětí kladné znaménko. Pro správné vyhodnocování je potřeba vhodná volba provozní charakteristiky.

Admitance vývodu s poruchou je rovna součtu celkové admitance vývodů bez poruchy \bar{Y}_{cN} a admitance zhášecí tlumivky \bar{Y}_{TL} :

$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{cN} + \bar{Y}_{TL}) \quad (5.4)$$

Výsledná konduktance má ve většině případů kladné znaménko, ale znaménko susceptance je závislé na stupni kompenzace sítě.

Ochrany využívající Admitanční metodu používají pro svou funkci pracovní charakteristiky. Pokud je vypočtená admitance uvnitř ohraničení charakteristiky, je vývod označený jako neporušený. Pokud vypočtená admitance překročí hranici charakteristiky, dojde k vybavení ochrany a vývod je označen za vývod s poruchou. Pro zvýšení citlivosti této metody je možné pro určování výsledné admitance využít násobků základní harmonické. Tyto vyšší harmonické jsou obsaženy v poruchovém proudu, ale nejsou kompenzovány zhášecí tlumivkou, protože ta je navržena jen na kompenzaci základní harmonické. Pro výpočet je možné použít nejvýraznější složku poruchového proudu, tedy 5. harmonickou nebo součet admitancí jednotlivých výrazných složek. [10]

Konduktanční metoda

Konduktanční metoda pracuje na podobném principu jako Admitanční metoda. Zde se však z netočivé složky proudu \bar{I}_0 a netočivé složky napětí \bar{U}_0 určuje pouze konduktance. Pro vývod bez poruchy platí:

$$G_0 = R_e \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = G_{vyyv} \quad (5.5)$$

Kde G_{vyyv} – netočivá konduktance chráněného vývodu.

Konduktance vývodu s poruchou je rovna součtu netočivé konduktance respektující svod ostatních vývodů bez poruchy a netočivé konduktance odpovídající zhášecí tlumivce:

$$G_0 = R_e \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (5.6)$$

kde G_{cN} - netočivá konduktance respektující svod ostatních vývodů bez poruchy, G_{TL} - netočivá konduktance odpovídající zhášecí tlumivce. [10]

Konduktanční metoda s měřením přírůstku

Tato metoda určuje konduktanci podobně jako předchozí metoda, ale pro výpočet používá přírůstky netočivé složky proudu a napětí mezi stavem před poruchou a při poruše. Tím dojde ke zvýšení přesnosti, díky minimalizaci chyb způsobených nesymetrií systému a chyb měření přístrojových transformátorů proudu. Pro vývod bez poruchy platí:

$$\Delta G_0 = R_e \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = G_{vyv} \quad (5.7)$$

Konduktance vývodu s poruchou:

$$\Delta G_0 = R_e \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (5.8)$$

Ochrana určuje směr poruchy porovnáváním přírůstků konduktance G_0 s kladnou a zápornou prahovou hodnotou podle dané pracovní charakteristiky. Tuto metodu je výhodné používat v kombinaci s automatikou připínání odporů. Na pracovní charakteristice ochrany je nastavena jedna popudová hodnota podle konduktance pomocného odporu. [10]

Metoda vyšších harmonických

U této metody je k určení vývodu se zemní poruchou využít signál daný sumací vyšších harmonických (3., 5. a 7. harmonické), které se vyskytují v poruchovém proudu kvůli nedokonalé kompenzaci zhášecí tlumivkou. Jako vývod s poruchou je označen vývod s největší úrovní tohoto signálu.

Je možné použít také metodu 5. harmonické, při které se po vzniku poruchy měří kromě úrovně signálu i jeho fáze. Vývod s poruchou má tedy opět největší úroveň signálu způsobeného touto harmonickou a má také opačnou fázi. Tato metoda je závislá na přesnosti měření a na frekvenční analýze. [10]

5.3 Dynamické metody

Metoda první půl-periody

Při této metodě dochází k vyhodnocování oscilografických průběhů netočivé složky proudu a napětí během první půl-periody přechodného děje, který vzniká při zemní poruše kvůli vybíjení kapacity fáze s poruchou a nabíjení kapacit neporušených fází, než dojde k jeho útlumu. Jako vývod s poruchou je označen vývod, u kterého jsou během první půlperiody naměřené složky netočivého proudu a napětí v protifázi. U ostatních vývodů, na kterých porucha nenastala, jsou netočivé složky ve fázi. Tato metoda je vhodná pro síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku, u kterých je funkční i pro oblouková zemní spojení. Vysokoimpedanční poruchy, které tlumí přechodný děj, způsobují problémy při určování správného vývodu. [7]

Metoda qu-diagramu

Tato metoda vyhodnocuje grafickou závislost netočivé složky proudu (představující náboj q_0) na netočivé složce napětí. [7] U vedení bez poruch je možné popsat vybíjecí proces těmito rovnicemi:

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eq}} \cdot \int_{t_0}^t i_0(\tau) d\tau = u_0(t_0) + \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \quad (5.9)$$

kde t_0 – čas vzniku zemní poruchy, C_{eq} – ekvivalentní kapacita mezi vodičem a zemí všech vedení bez poruchy v celé síti, i_0 – okamžitá hodnota netočivé složky proudu

Pro použití této metody se předpokládá, že okamžitá hodnota netočivé složky napětí v okamžiku vzniku zkratu $u_0(t_0)$, je rovna nule. Při uvažování tohoto předpokladu platí, že závislost netočivé složky proudu na netočivé složce napětí je ovlivňována pouze hodnotou kapacity C_{eq} . Pro vývod bez poruchy je výsledný qu-diagram ve tvaru přímky s gradientem C_{eq} . Pro vývod s poruchou tato závislost neplatí, protože vybíjecí proud má opačný směr. [7]

Metoda qu2-diagramu

Metoda qu2-diagramu je zdokonalením metody qu-diagramu. Využívá se zde filtru pro odstranění frekvenčního spektra netočivé složky napětí a proudu, které je způsobeno nesymetrií a nelineárním zatížením systému v bezporuchovém stavu. Díky tomu je možné vyhodnotit jen průběhy netočivých složek proudu a napětí, které vznikají během zemní poruchy. Tím nedochází ke zkreslení výsledného qu2-diagramu, což umožňuje snadnější určení gradientu. [7]

Metoda vyhodnocení částečných výbojů

Metoda vyhodnocení částečných výbojů je používána především pro izolované vodiče na venkovním vedení vysokého napětí. Tyto vodiče jsou velmi dobře izolovány, a proto je u nich detekce zemní poruchy obvyklými metodami obtížná. K detekci poruchy je u této metody použito sledování impulzních složek signálů částečných výbojů. Tyto výboje vznikají na povrchu zasaženého vodiče, ale také v izolaci. Správným vyhodnocením naměřených signálů je možné rozeznat poruchy, které jsou způsobeny pádem vodiče na zem nebo poškozením vodiče v důsledku pádu větve stromu na vedení. Nevýhodou této metody jsou vysoké nároky na přesnou měřicí techniku. [7]

Pulzní metoda

Při této metodě stačí měřit jen netočivou složku proudu. Během zemní poruchy se paralelně ke zhášecí tlumivce připojuje kapacitní baterie. Tato baterie mění na vývodu s poruchou proud tekoucí místem poruchy. Na ostatních vývodech se tato změna neprojevuje. Měření může být opakováno pomocí skupiny impulzů použitých pro připojení kapacitní baterie. Tyto impulzy je možné naměřit od místa kapacitní baterie až k místu poruchy. Měřením netočivé složky proudu je možné sledování podél vývodu. Pro správné určení vývodu se zemní poruchou i při vysokoimpedančních poruchách se používá asymetrická skupina impulzů. [10]

5.4 Metody vhodné pro odporově uzemněné sítě

U sítí uzemněných přes rezistor se pro určení vývodu se zemní poruchou využívá nadproudového kritéria. Vzhledem k velikosti odporu rezistoru, který ovlivňuje velikost poruchového proudu je potřeba, aby ochrany vyhodnocovaly součtový proud. Součtový proud je možné měřit v uzlu transformátorů proudu.

Aby ochrana správně vyhodnotila zemní poruchu musí být splněna podmínka, že minimální poruchový proud I_{min} musí být větší než nastavený rozběhový proud ochrany I_{nast} . Tuto podmínku lze zapsat následujícím vztahem:

$$I_{nast} < \frac{I_{pmin}}{k_c \cdot p_i} \quad (5.10)$$

kde k_c – koeficient citlivosti ochrany, p_i – převod proudového transformátoru.

Nastavený proud ochrany ale musí být větší než kapacitní proud vývodu I_C :

$$I_{nast} > I_C \cdot k_b \quad (5.11)$$

kde k_b – koeficient bezpečnosti, který by měl být $k_b = 1,3$. [10]

Při obloukových zemních poruchách v sítích uzemněných přes rezistor byla mez minimálního proudu při poruše na kabelovém vedení stanovena na:

$$I_{pmin} = \frac{0,7 \cdot U_f}{R_0 \cdot R_v} \quad (5.12)$$

kde R_v – odpor vedení.

Pro venkovní vedení platí vztah:

$$I_{pmin} = \frac{0,1 \cdot U_f}{R_0} \quad (5.13)$$

Velké kabelové nebo smíšené sítě mají velký vlastní kapacitní proud a tyto podmínky v nich není možné splnit, takže není možné ani správně nastavit ochrany. V těchto sítích proto

nemohou být použity jednoduché ochrany využívající nadproudového kritéria, ale musí být použity např. směrové nadproudové ochrany. [10]

5.5 Způsoby lokalizace místa zemní poruchy

Odpínání úseků postiženého vývodu

Jedním z nejstarších způsobů pro lokalizaci místa zemní poruchy, který zároveň patří k neefektivnějším, je odpínání úseku postiženého vývodu. Při této metodě dochází k postupnému odepínání částí vývodu, a to do doby, než ochrany přestanou poruchu signalizovat. Po zjištění, v jaké části vývodu porucha nastala, je na místo vyslána technická obsluha, která najde přesné místo, kde k poruše došlo a poruchu odstraní. Nevýhodou této metody jsou náročné dispečerské manipulace a také časté přerušování dodávky elektrické energie. I přesto je tato metoda stále využívána, především díky své jednoduchosti a spolehlivosti. [7]

Spojování postiženého vývodu do kruhu

Spojování postiženého vývodu do kruhu je jednodušší metoda než odpínání úseků postiženého vývodu. U této metody ale nastává problém, že vedení, která jsou napájena z jedné přípojnice napájecí rozvodny, není vždy možné spojit do kruhu. Metoda využívá k lokalizaci místa vzniku zemní poruchy přerozdělení netočivé složky proudu a následné dopočtení vzdálenosti místa vzniku poruchy. Metodu často není možné použít nejen kvůli neuskutečnitelnému spojení vývodů do kruhu, ale také kvůli rozdílům v provedení venkovních vedení jednotlivých vývodů. Rozdíly mezi vedeními vytvářejí především odlišné délky vedení, ale také parametry vodičů. [7]

Indikátory poruch pro venkovní vedení

Indikátory poruch jsou používány k určení směru zemní poruchy. Indikátory sledují napětíové a proudové poměry jednotlivých vodičů nebo netočivých složek proudu a napětí. Ty následně vyhodnocují pomocí již popsaných metod. Indikátory mohou být v různém provedení, podle daného vedení, na kterém jsou nainstalovány. Nejčastěji sledují elektrické a magnetické pole daného vedení. Indikátory mohou měřit sumaci elektrických a magnetických polí všech fází, nebo elektrická a magnetická pole jednotlivých fází. Indikátory, které provádějí sumaci těchto polí jsou konstrukčně jednoduché a mají také malé rozměry. Je možné je snadno instalovat na poruchové úseky vedení. Nevýhodou tohoto provedení je poměrně nízká citlivost.

Je také možné instalovat indikátory u dálkově ovládaných úsečníků. Tyto úsečníky jsou vybaveny dálkovou komunikací s dispečinkem napájecí rozvodny, díky tomu je možné dálkové

signalizování místa poruchy. Pokud není možné využití dálkové komunikace, mohou přístroje k indikaci poruchy použít rozpínací kontakty relé nebo optickou signalizaci. Napájení indikátorů může být řešeno akumulátorovou baterií, fotovoltaickým panelem nebo napájením přímo z vedení. Pro napájení může být využito i prostředků dálkově ovládaných úsečníků. [7]

Indikátory poruch pro kabelová vedení

Pro kabelová vedení jsou indikátory konstrukčně jednodušší a také přesnější, než je tomu u indikátorů pro venkovní vedení. Vyhodnocování zemní poruchy je zde řešeno pomocí signálu z průvlekového transformátoru proudu. Tento transformátor měří netočivou složku proudu. Úroveň tohoto proudu je vyhodnocována pomocí metody vyšších harmonických. K nalezení místa vzniku zemní poruchy je nutné sledování stavu jednotlivých indikátorů. [10]

Indikátory zkratového proudu

Indikátory zkratového proudu jsou používány v rozsáhlých kabelových sítích, které mají uzal uzemněný přes rezistor.

V každém indikátoru je řídicí jednotka a tři měřicí transformátory proudu, které jsou připojeny na jednotlivé fáze. Transformátory tak sledují průchod proudu fázemi. Když sledovaný proud překročí nastavenou mez, dojde k indikaci poruchy. Řídicí jednotky indikátorů zkratového proudu je možné napájet ze sítě nízkého napětí nebo z měřících transformátorů, které odebírají elektrickou energii z vedení, na němž jsou nainstalovány. [10]

5.6 Systém RCC (Residual Current Compensation)

Systém RCC vyvinutý firmou Swedish Neutral se skládá ze zařízení pro indikaci vývodu s poruchou, kompenzaci poruchového proudu a také systému pro lokalizaci místa vzniku zemní poruchy.

Systém využívá admitanční metodu tzn vypočítává admitanci jednotlivých vývodů a pokud se admitance některého vývodu dostane mimo pracovní charakteristiku, je tento vývod označen jako vývod s poruchou. Po tomto označení vývodu začne systém pomocí ladění zhášecích tlumivek kompenzovat poruchový proud. Tlumivky jsou automaticky laděny až do okamžiku, kdy admitance vývodu s poruchou dosáhne hodnoty admitance tohoto vývodu před vznikem poruchy.

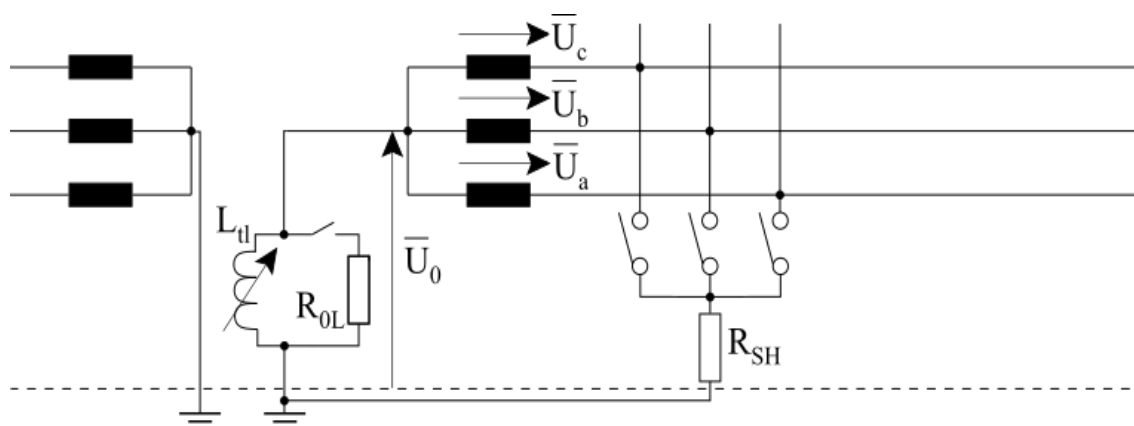
Systém RCC využívá k určení místa vzniku poruchy principu přerozdělování netočivé složky proudu. Vývod s poruchou je tedy nutné spojit do kruhu s neporušeným vývodem a místo vzniku poruchy je vypočteno z poměru admitancí těchto vývodů. Tím, že je nutné

vývody spojit do kruhu je použití tohoto systému omezeno stejným způsobem jako samotná možnost spojení vývodů do kruhu. Jednotlivé vývody totiž často vůbec nelze spojit do kruhu.

Tento systém má však výhodu díky svému kombinovanému řešení a také díky schopnosti rychlého přizpůsobení změnám kapacity vedení vůči zemi při změnách konfigurace sítě. [10]

5.7 Přizemnění postižené fáze

Přizemnění postižené fáze se využívá především kvůli zvýšení bezpečnosti během jednofázové zemní poruchy. Při jednofázové poruše v sítích uzemněných přes zhášecí tlumivku protéká místem poruchy pouze zbytkový proud, který je menší než kapacitní proud sítě, ale přesto může být nebezpečný. Cílem přizemnění postižené fáze je tento proud co nejvíce omezit. Toto přizemnění slouží jako ochrana před nebezpečnými hodnotami dotykového a krokového napětí v místě vzniku poruchy. Dochází také ke snížení tepelného namáhání energetických zařízení, které vzniká z důvodu průchodu poruchového proudu.



Obr. 5.1: Přizemnění postižené fáze

Po vzniku zemní poruchy dojde k identifikaci vývodu s touto poruchou a lokalizaci místa vzniku poruchy. Následně je sepnutím spínače připojena postižená fáze k zemní soustavě rozvodny. Tímto přizemněním se vytvoří poruchovému proudu paralelní cesta, která má obvykle menší impedanci než místo vzniku poruchy. Poruchový proud se rozdělí mezi vodivé cesty v poměru impedancí jednotlivých cest. Často tak dochází k tomu, že se téměř celý poruchový proud uzavírá v rozvodně, kde je díky uzemňovací soustavě napájecí rozvodny bezpečně sveden do země, a do místa poruchy se dostane jen velice malý zbytkový proud, který nezpůsobí nebezpečné hodnoty krokových a dotykových napětí.

Fázi, na které nastala porucha, systém rozpozná díky vyhodnocení napěťových a proudových poměrů, které nastávají během poruchy. Při zemní poruše klesne napětí poškozené fáze na hodnotu, která je závislá na odporu poruchy. [10]

6 Výpočet aplikovaný na konkrétní situaci

Tento výpočet pracuje se zjednodušeným modelem sítě. Zjednodušený model však plně vyhovuje pro názornou demonstraci vlivu způsobu uzemnění uzlu na nesymetrii příčných parametrů sítě. Síť, na které je tento výpočet proveden nicméně není konkrétní reálná síť a její parametry tedy nevycházejí ze skutečné sítě. První část se věnuje vlivu nesymetrie na velikost napětí U_0 mezi uzlem sítě a zemí a na napětí jednotlivých fází vůči zemi, zatímco druhá část ukazuje vliv odporu poruchy na velikost těchto napětí. Veškeré výpočty jsem provedl v programu Excel. Modelovaná porucha je jednofázová. V přímo uzemněné síti a síti uzemněné přes uzlový odporník tedy jednofázový zemní zkrat a v izolované síti a v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku jde o jednofázové zemní spojení. Zadána je vysokonapěťová síť 22 kV a jedná se o smíšené vedení, tedy venkovní i kabelové. Zadané parametry sítě jsou tyto:

Tabulka 6.1: Parametry zadávané pro výpočet vlivu nesymetrie

Fázor natočení o $+120^\circ$	\bar{a}	$-0,5+0,866025403784439i$	-
Fázor natočení o -120°	\bar{a}^2	$-0,5-0,866025403784439i$	-
Jmenovité fázové napětí první fáze	\bar{E}	12700	V
Jmenovité fázové napětí druhé fáze	$\bar{E} \cdot \bar{a}$	$-6350+10998,5226280624i$	V
Jmenovité fázové napětí třetí fáze	$\bar{E} \cdot \bar{a}^2$	$-6350-10998,5226280624i$	V
Reaktance mezi uzlem sítě a zemí	X_0	8,24E+01	Ω
Odpor mezi uzlem sítě a zemí	$R_0; I_{R0} = 1\% I_{X0}$	8,24E+03	Ω
Impedance mezi uzlem sítě a zemí	\bar{Z}_0	$0,823917608239176+82,3917608239176i$	Ω
Jednofázový kapacitní proud sítě	I_{C1}	50	A
Reaktance jedné fáze vůči zemi	X_C	$-254,034118443435i$	Ω
Svodový odpor vedení	$R_S; I_{RS} = 2\% I_{XC}$	12701,7059221717	Ω
Jmenovitá impedance jedné fáze vůči zemi	\bar{Z}_L	$5,07865090850532-253,932545425265i$	Ω
Symetrie první fáze	Sym L1	1	-
Symetrie druhé fáze	Sym L2	0,9	-
Symetrie třetí fáze	Sym L3	1	-
Podélná impedance první fáze	\bar{Z}_{V1}	3+6i	Ω
Podélná impedance druhé fáze	\bar{Z}_{V2}	3+6i	Ω
Podélná impedance třetí fáze	\bar{Z}_{V3}	3+6i	Ω
Skutečná impedance první fáze vůči zemi	\bar{Z}_{L1}	$5,07865090850532-253,932545425265i$	Ω
Skutečná impedance druhé fáze vůči zemi	\bar{Z}_{L2}	$4,57078581765479-228,539290882738i$	Ω
Skutečná impedance třetí fáze vůči zemi	\bar{Z}_{L3}	$5,07865090850532-253,932545425265i$	Ω

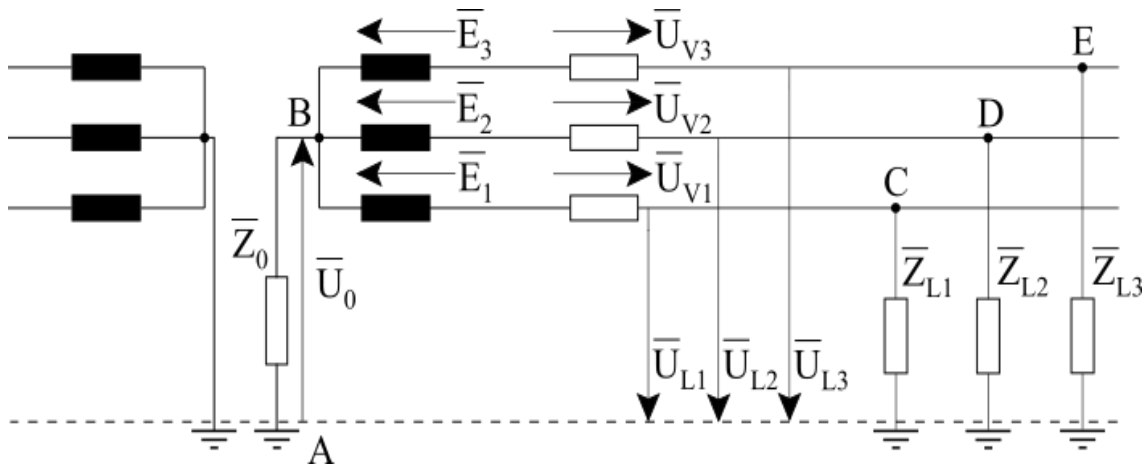
Prvními parametry jsou fázory natočení \bar{a} a \bar{a}^2 sloužící pouze pro vyjádření napětí druhé a třetí fáze pomocí napětí první fáze. Následuje jmenovitá hodnota fázového napětí první fáze a jmenovité hodnoty napětí druhé a třetí fáze dopočítané pomocí již zmíněných fázorů natočení.

Parametry X_0 a R_0 , z nichž je vytvořena paralelní kombinace \bar{Z}_0 , je zadán způsob uzemnění sítě. Při volbě uzemnění přes zhášecí tlumivku jsem zvolil reaktanci tlumivky a její odpor jsem nastavil stonásobný oproti reaktanci. V mém případě to byly hodnoty 82,4 Ω pro X_0 a 8240 Ω pro R_0 . Pro izolovanou síť je nutné oba tyto parametry zadat dostatečně velké, aby výpočet proběhl, jako by síť nebyla vůbec uzemněná. Pro tento případ jsem odpor i reaktanci nastavil na hodnotu $1 \cdot 10^{10}$ Ω . Pro přímo uzemněnou síť a síť uzemněnou přes uzlový odporník jsem nastavil \bar{Z}_0 rovnou hodnotě R_0 . Pro uzemnění přes odporník jsem zvolil hodnotu odporu odporníku 33,25 Ω . V případě přímo uzemněné sítě jsem zadal odpor uzemnění 0,1 Ω . V ideálním případě při přímém uzemnění nemá uzemnění žádný odpor, avšak výpočty nedokáží pracovat s nulovou hodnotou impedance \bar{Z}_0 .

Jednofázový kapacitní proud sítě jsem zadával ručně. Při výpočtu jsem pracoval s hodnotou 50 A. Z jeho hodnoty je automaticky vypočítána hodnota kapacitní reaktance jedné fáze vůči zemi. Kapacitním proudem I_{C1} je tedy zadávána nepřímě i kapacita vedení. Z velikosti kapacitní reaktance je přepočítán svodový odpor R_S , u kterého je možné nastavovat podle potřeby, kolik procent kapacitního proudu přes něj bude protékat. V mém případě jsem svodový odpor nastavil tak, aby přes něj protékala dvě procenta kapacitního proudu. Paralelní kombinací kapacitní reaktance X_C a svodového odporu R_S je vytvořena jmenovitá impedance jedné fáze vůči zemi \bar{Z}_L .

Symetriemi fází se nastavuje jejich symetrie oproti jmenovitým hodnotám. Je-li zadána hodnota symetrie druhé fáze 0,9, znamená to, že příčné parametry této fáze měly hodnotu 90 % příčných parametrů první, respektive třetí fáze. Jinými slovy, nastává na ní 10% nesymetrie. Symetrie jsou využity k výpočtu skutečných impedancí jednotlivých fází vůči zemi. Hodnot \bar{Z}_{L1} , \bar{Z}_{L2} a \bar{Z}_{L3} je dosaženo vynásobením jmenovité impedance jedné fáze vůči zemi \bar{Z}_L a symetrie příslušné fáze. V mém výpočtu jsem nastavoval nesymetrii jen u druhé fáze, zatímco první a třetí fáze zůstaly vždy symetrické.

Hodnoty \bar{Z}_{V1} , \bar{Z}_{V2} a \bar{Z}_{V3} udávající podélné impedance jednotlivých fází, respektují nejen podélné impedance vedení, ale spadá do nich i impedance transformátoru. Tyto hodnoty jsem zadával ručně. Při výpočtu vlivu nesymetrie tyto impedance nehrají příliš velkou roli.



Obr. 6.1: Zjednodušené schéma sítě

Prvním krokem mého výpočtu, bylo popsání zjednodušeného schématu sítě a zformulování rovnic pro jednotlivé uzly (A-E) pomocí metody uzlových napětí. Jelikož jsou ve výpočtu čtyři neznámé (U_0 , U_{L1} , U_{L2} , U_{L3}), vynechal jsem rovnici pro uzel A, a pro vytvoření soustavy čtyř rovnic o čtyřech neznámých jsem použil rovnice uzlů B-E.

Rovnice pro uzel B:

$$-\frac{\bar{E} - \bar{U}_{L1} - \bar{U}_0}{\bar{Z}_{V1}} - \frac{\bar{a} \cdot \bar{E} - \bar{U}_{L2} - \bar{U}_0}{\bar{Z}_{V2}} - \frac{\bar{a}^2 \cdot \bar{E} - \bar{U}_{L3} - \bar{U}_0}{\bar{Z}_{V3}} + \frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_0} = 0 \quad (6.1)$$

$$\frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_{V1}} + \frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_{V2}} + \frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_{V3}} + \frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_0} + \frac{\bar{U}_{L1}}{\bar{Z}_{V1}} + \frac{\bar{U}_{L2}}{\bar{Z}_{V2}} + \frac{\bar{U}_{L3}}{\bar{Z}_{V3}} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{V1}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_{V2}} + \frac{\bar{a}^2 \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_{V3}} \quad (6.2)$$

Rovnice pro uzel C:

$$\frac{\bar{E} - \bar{U}_{L1} - \bar{U}_0}{\bar{Z}_{V1}} - \frac{\bar{U}_{L1}}{\bar{Z}_{L1}} = 0 \quad (6.3)$$

$$-\frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_{V1}} - \frac{\bar{U}_{L1}}{\bar{Z}_{V1}} - \frac{\bar{U}_{L1}}{\bar{Z}_{L1}} = -\frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{V1}} \quad (6.4)$$

Rovnice pro uzel D:

$$\frac{\bar{a} \cdot \bar{E} - \bar{U}_{L2} - \bar{U}_0}{\bar{Z}_{V2}} - \frac{\bar{U}_{L2}}{\bar{Z}_{L2}} = 0 \quad (6.5)$$

$$-\frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_{V2}} - \frac{\bar{U}_{L2}}{\bar{Z}_{V2}} - \frac{\bar{U}_{L2}}{\bar{Z}_{L2}} = -\frac{\bar{a} \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_{V2}} \quad (6.6)$$

Rovnice pro uzel E:

$$\frac{\bar{a}^2 \cdot \bar{E} - \bar{U}_{L3} - \bar{U}_0}{\bar{Z}_{V3}} - \frac{\bar{U}_{L3}}{\bar{Z}_{L3}} = 0 \quad (6.7)$$

$$-\frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_{V3}} - \frac{\bar{U}_{L3}}{\bar{Z}_{V3}} - \frac{\bar{U}_{L3}}{\bar{Z}_{L3}} = -\frac{\bar{a}^2 \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_{V3}} \quad (6.8)$$

Tyto rovnice jsem následně zapsal do matic ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\bar{Z}_{V1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{V2}} + \frac{1}{\bar{Z}_{V3}} + \frac{1}{\bar{Z}_{V0}} \right) + \frac{1}{\bar{Z}_{V1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{V2}} + \frac{1}{\bar{Z}_{V3}} \\ -\frac{1}{\bar{Z}_{V1}} + \left(-\frac{1}{\bar{Z}_{V1}} - \frac{1}{\bar{Z}_{L1}} \right) + 0 + 0 \\ -\frac{1}{\bar{Z}_{V2}} + 0 + \left(-\frac{1}{\bar{Z}_{V2}} - \frac{1}{\bar{Z}_{L2}} \right) + 0 \\ -\frac{1}{\bar{Z}_{V3}} + 0 + 0 + \left(-\frac{1}{\bar{Z}_{V3}} - \frac{1}{\bar{Z}_{L3}} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_{L1} \\ \bar{U}_{L2} \\ \bar{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{V1}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_{V2}} + \frac{\bar{a}^2 \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_{V3}} \\ -\frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{V1}} \\ -\frac{\bar{a} \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_{V2}} \\ -\frac{\bar{a}^2 \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_{V3}} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

V Excelu jsem tyto matice zapsal do tabulky o čtyřech řádcích a pěti sloupcích, kde první čtyři sloupce byly použity k zápisu neznámých a v pátém sloupci se nacházela pravá strana. V této tabulce byla v každé ze čtyř rovnic použita jedna buňka pro jednu neznámou a pravou stranu každé rovnice tvořila také jedna buňka.

Tabulka 6.2: Příklad tabulky v Excelu se zadanými rovnicemi

	\bar{U}_0	\bar{U}_{L1}	\bar{U}_{L2}	\bar{U}_{L3}	Pravá strana
B	0,20-0,40i	0,07-0,13i	0,07-0,13i	0,07-0,13i	-3,18E-12-1,56E-13i
C	-0,07+0,13i	-0,07+0,13i	0	0	-846,67+1693,33i
D	-0,07+0,13i	0	-0,07+0,13i	0	-1043,14-1579,90i
E	-0,07+0,13i	0	0	-0,07+0,13i	1889,80-113,43i

Tuto soustavu rovnic jsem vyřešil pomocí Gaussovy eliminační metody, a vzniklá tabulka byla v následujícím tvaru:

Tabulka 6.3: Příklad tabulky v Excelu s výsledky soustavy rovnic

	\bar{U}_0	\bar{U}_{L1}	\bar{U}_{L2}	\bar{U}_{L3}	Pravá strana
B	1	0	0	0	-227,13+405,96i
C	0	1	0	0	13229,32-582,05i
D	0	0	1	0	-6132,62+10961,02i
E	0	0	0	1	-6415,30-11596,86i

Po přepsání do původních matic by tedy výsledky vypadaly následovně:

$$\begin{bmatrix} 1 + 0 + 0 + 0 \\ 0 + 1 + 0 + 0 \\ 0 + 0 + 1 + 0 \\ 0 + 0 + 0 + 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_{L1} \\ \bar{U}_{L2} \\ \bar{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -227,13 + 405,96i \\ 13229,32 - 582,05i \\ -6132,62 + 10961,02i \\ -6415,30 - 11596,86i \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Posledním krokem výpočtu bylo vytvoření tabulky s absolutními hodnotami a úhly napětí \bar{U}_{L1} , \bar{U}_{L2} , \bar{U}_{L3} , a následně dopočtenými hodnotami proudů jednotlivých fází \bar{I}_{L1} , \bar{I}_{L2} , \bar{I}_{L3} a \bar{I}_0 . Napětí \bar{U}_0 zde není zadáno v absolutní hodnotě, ale v procentní hodnotě. Hodnota \bar{U}_0 tedy udává, kolik procent ze jmenovitého fázového napětí sítě tvoří napětí \bar{U}_0 .

Tabulka 6.4: Příklad tabulky v Excelu s konečnými výsledky

	Komplexní hodnoty	Absolutní hodnoty (V)	Úhly (°)
\bar{U}_0	-439,07590286719-258,7504822745i	4,012963838	-149,4888594
\bar{U}_{L1}	13454,8625768601+95,7389863599001i	13455,20319	0,407685121
\bar{U}_{L2}	-5906,50798986371+11602,8494125813i	13019,71394	116,9786731
\bar{U}_{L3}	-6189,76335761602-10919,0677500098i	12551,4625	-119,5478836
\bar{I}_{L1}	0,682421189088835+52,9723229267083i	52,97671842	89,26192228
\bar{I}_{L2}	-46,3712474505176-22,4496058470814i	51,51967967	-154,1670897
\bar{I}_{L3}	42,495364595135-25,2255277829663i	49,41845064	-30,6936464
\bar{I}_0	-3,19346166629376+5,2971892966606i	6,18533846	121,0840793

Hodnoty napětí jednotlivých fází pocházejí z řešení soustavy rovnic. Napětí \bar{U}_0 pochází také z řešení soustavy rovnic, ale jak již bylo zmíněno výše, je převedeno na procentní hodnotu. Hodnoty proudů jednotlivých fází jsem získal vydělením jednotlivých napětí \bar{U}_{L1} , \bar{U}_{L2} , \bar{U}_{L3} příslušnými impedancemi daných fází vůči zemi \bar{Z}_{L1} , \bar{Z}_{L2} , \bar{Z}_{L3} . Hodnotu \bar{I}_0 jsem získal fázorovým součtem proudů \bar{I}_{L1} , \bar{I}_{L2} , \bar{I}_{L3} . Všechny tyto hodnoty vždy platí pouze pro zadanou impedanci \bar{Z}_0 . Tyto výsledky jsem použil v obou částech výpočtu.

6.1 Výpočet vlivu nesymetrie

Při tomto výpočtu jsem zjišťoval vliv nesymetrie druhé fáze na napětí \bar{U}_0 a na jednotlivá fázová napětí vůči zemi \bar{U}_{L1} , \bar{U}_{L2} , \bar{U}_{L3} . Nastavením hodnoty \bar{Z}_0 jsem zvolil způsob uzemnění a následně jsem volil nesymetrii. Symetrii jsem nastavoval na hodnoty 0,995, 0,990, 0,985, 0,980, 0,975, 0,950, 0,925 a 0,900. Po zadání symetrie následovalo automatické přepočítávání impedance \bar{Z}_0 v nastaveném rozsahu kolem zadané hodnoty, během něhož byly velikosti napětí U_0 , U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} a velikosti proudu I_{L0} protékajícího přes reaktanci X_0 a proudu I_{R0} protékajícího přes odpor R_0 včetně hodnot tohoto odporu i reaktance zaznamenávány do tabulky. Z hodnot z této tabulky jsem následně vytvořil grafy.

V případě přímo uzemněné sítě, jsem nastavil impedanci \bar{Z}_0 rovnou hodnotě R_0 , kterou jsem zvolil $0,1 \Omega$. Zaznamenával jsem hodnoty U_0 , U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} do tabulek podle hodnoty symetrie druhé fáze. Pro každou symetrii je v tabulkách jen jedna hodnota každého napětí, není tedy využito postupné automatické parametrizace prováděné změnou impedance \bar{Z}_0 .

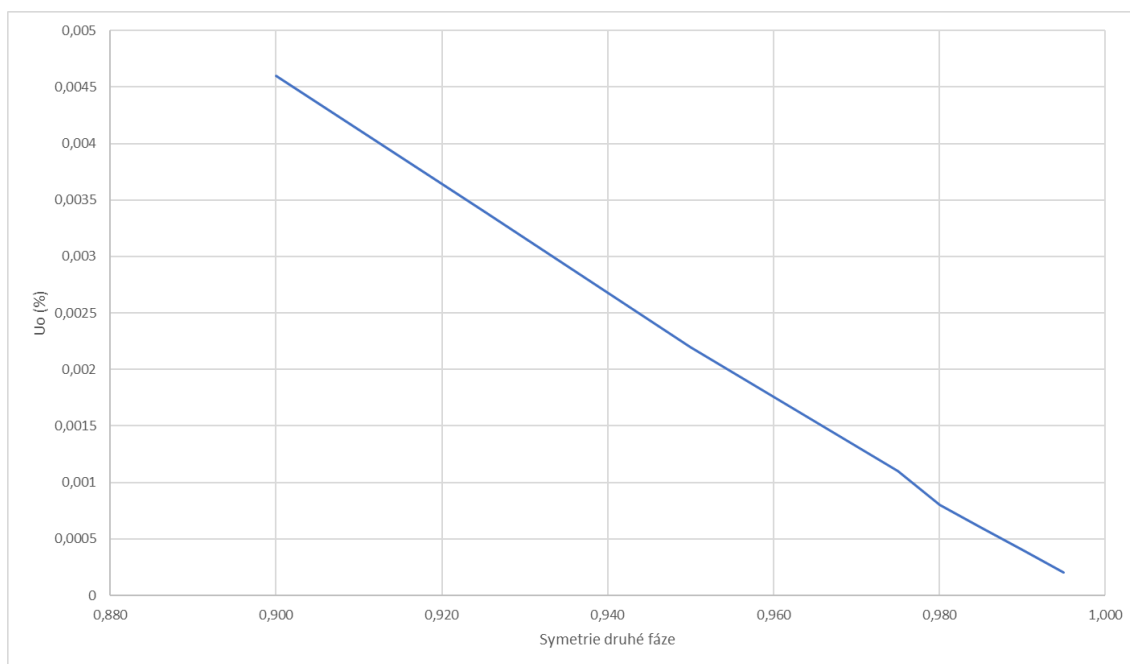
Tabulka 6.5: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v přímo uzemněné síti

Symetrie druhé fáze	U_0 (%)
0,995	0,0002
0,990	0,0004
0,985	0,0006
0,980	0,0008
0,975	0,0011
0,950	0,0022
0,925	0,0034
0,900	0,0046

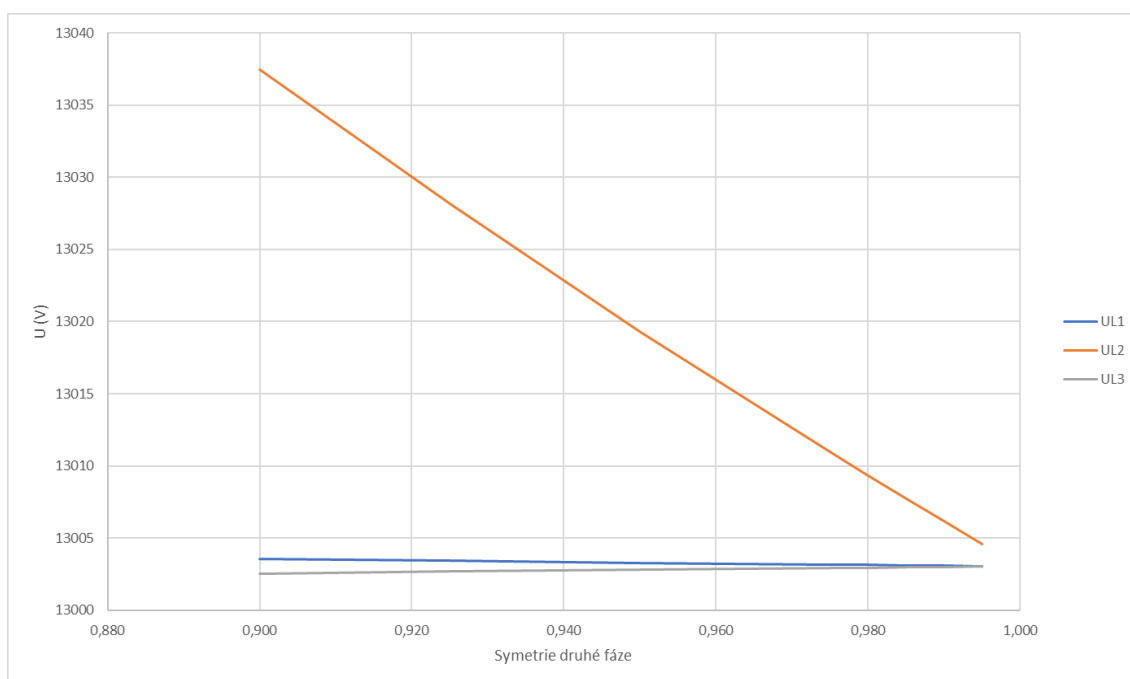
Tabulka 6.6: Velikosti napětí U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} v závislosti na symetrii v přímo uzemněné síti

Symetrie druhé fáze	U_{L1}	U_{L2}	U_{L3}
0,995	13003,07	13004,59	13003,02
0,990	13003,09	13006,16	13003,00
0,985	13003,11	13007,75	13002,97
0,980	13003,14	13009,35	13002,95
0,975	13003,16	13010,97	13002,93
0,950	13003,29	13019,32	13002,80
0,925	13003,43	13028,13	13002,68
0,900	13003,57	13037,45	13002,54

Pro přímo uzemněnou síť jsem vytvořil grafy U_0 , U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} v závislosti na symetrii druhé fáze. Napětí U_0 je v jednom grafu, zatímco napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} jsou společně ve druhém grafu.



Obr. 6.2: Závislost napětí U_0 na symetrii druhé fáze v přímo uzemněné síti



Obr. 6.3: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na symetrii druhé fáze v přímo uzemněné síti

Z obrázku 6.2 je patrná lineární závislost napětí U_0 na symetrii druhé fáze. Toto napětí zde dosahuje minimálních hodnot. Na obrázku 6.3 je vidět, že napětí druhé fáze U_{L2} , na které byla

symetrie nastavována, je na symetrii lineárně závislé a při zvyšující se nesymetrii roste. Napětí ostatních fází se se symetrií mění jen minimálně.

U izolované sítě, jsem u impedance \bar{Z}_0 použil paralelní kombinaci R_0 a X_0 , přičemž obě tyto hodnoty jsem nastavil na velikost $1 \cdot 10^{10} \Omega$. Stejně jako v případě přímo uzemněné sítě jsem i zde zapisoval do tabulek hodnoty U_0 , U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} v závislosti na symetrii druhé fáze. I v tomto případě jsem nevyužil postupné automatické parametrizace prováděné změnou impedance \bar{Z}_0 a pro každou hodnotu symetrie je zde opět jen jedna hodnota každého napětí.

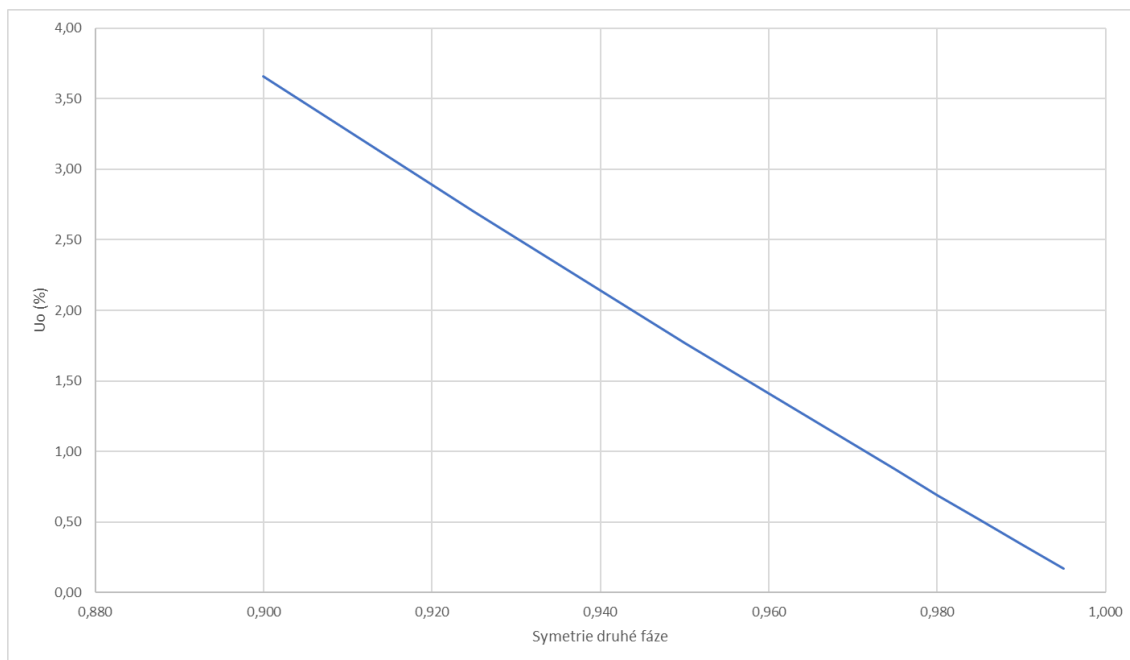
Tabulka 6.7: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v izolované síti

Symetrie druhé fáze	U_0 (%)
0,995	0,17
0,990	0,34
0,985	0,52
0,980	0,69
0,975	0,87
0,950	1,77
0,925	2,70
0,900	3,66

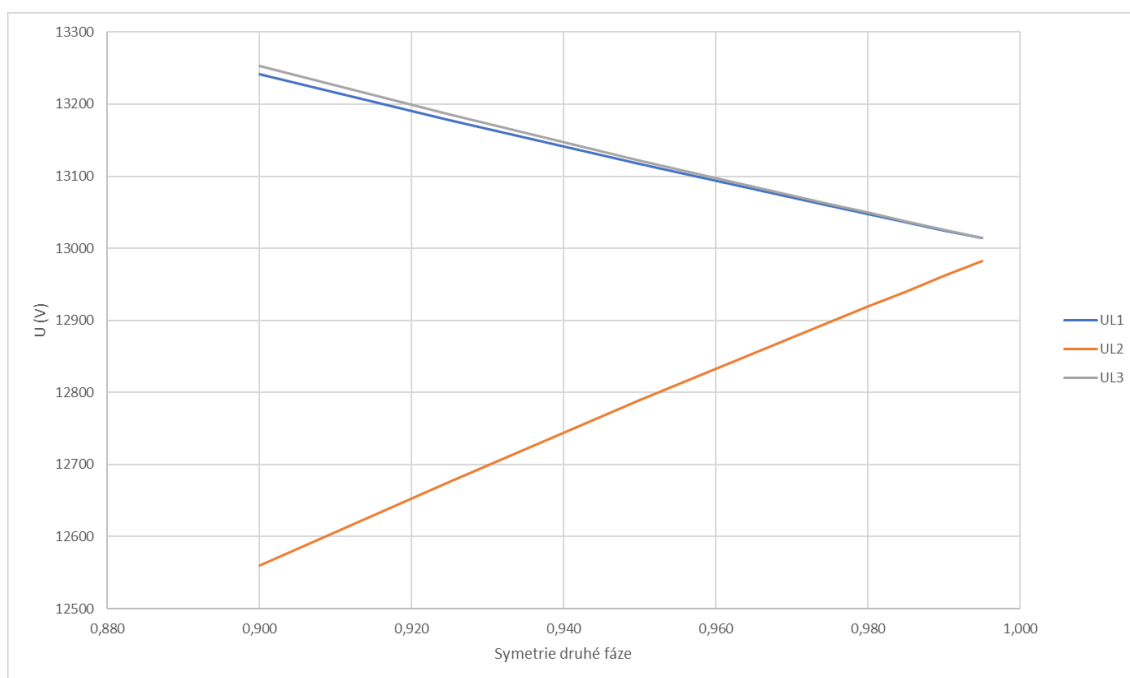
Tabulka 6.8: Velikosti napětí U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} v závislosti na symetrii v izolované síti

Symetrie druhé fáze	U_{L1} (V)	U_{L2} (V)	U_{L3} (V)
0,995	13013,94	12982,33	13014,43
0,990	13024,95	12961,48	13025,93
0,985	13036,06	12940,48	13037,53
0,980	13047,27	12919,34	13049,25
0,975	13058,59	12898,05	13061,08
0,950	13116,84	12789,34	13121,97
0,925	13177,95	12676,72	13185,89
0,900	13242,12	12559,98	13253,05

Z těchto tabulek jsem stejně jako u přímo uzemněné sítě vytvořil grafy napětí U_0 a napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} v závislosti na symetrii druhé fáze.



Obr. 6.4: Závislost napětí U_0 na symetrii druhé fáze v izolované síti



Obr. 6.5: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na symetrii druhé fáze v izolované síti

Na obrázku 6.4 je vidět, že stejně jako v přímo uzemněné síti, i zde je napětí U_0 lineárně závislé na symetrii druhé fáze. Napětí U_0 zde však dosahuje vyšších hodnot oproti přímo uzemněné síti. Obrázek 6.5 ukazuje, že v izolované síti působí velikost symetrie druhé fáze na všechny tři fáze. Na druhou fázi ovšem změna symetrie působí přibližně dvojnásobně více oproti první a třetí fázi. Oproti přímo uzemněné síti se zde však napětí U_{L2} se zvyšující se nesymetrií snižuje. Napětí U_{L1} a U_{L3} při zvyšování nesymetrie rostou.

Nejrozsáhlejší byl výpočet vlivu nesymetrie u sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku. V tomto případě jsem mohl využít postupnou automatickou parametrizaci prováděnou změnou impedance \bar{Z}_0 . Reaktanci tlumivky X_0 jsem zde nastavil na 82,4 Ω , což odpovídá rezonančnímu stavu tlumivky s uvažovanou sítí a následně jsem tuto hodnotu reaktance nastavil o pět procent vyšší, pět procent nižší, deset procent vyšší a o deset procent nižší. Z těchto hodnot následně vycházela postupná automatická parametrizace prováděná změnou impedance \bar{Z}_0 .

Pro každou hodnotu reaktance jsem vyzkoušel všechny velikosti symetrie druhé fáze, se kterými jsem počítal. Pro všechny kombinace reaktance a symetrie druhé fáze jsem zaznamenával do tabulek hodnoty napětí U_0 , tedy napětí na zhášecí tlumivce pro mnou zadanou hodnotu reaktance X_0 , a napětí U_{0max} , což je maximální dosažená hodnota napětí U_0 během procesu ladění tlumivky v okolí zadané reaktance X_0 . Z tabulek je tedy patrné, jaký vliv má symetrie druhé fáze a rozladění tlumivky na to, jaká velikost napětí U_0 bude při daném stavu na tlumivce, oproti hodnotě, které by bylo možné dosáhnout při použití vyladěné tlumivky.

Tabulka 6.9: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při reaktanci zvýšené o 10 % oproti vyladěnému stavu

Rozladěná tlumivka (+10 % X_0)		
Symetrie druhé fáze	U_0 (pro X_0) (%)	U_{0max} (%)
0,995	1,75	4,02
0,990	3,45	8,07
0,985	5,12	12,12
0,980	6,76	16,17
0,975	8,36	20,19
0,950	15,85	41,16
0,925	22,60	62,80
0,900	28,69	85,04

Tabulka 6.10: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při reaktanci zvýšené o 5 % oproti vyladěnému stavu

Rozladěná tlumivka (+5 % X_0)		
Symetrie druhé fáze	U_0 (pro X_0) (%)	U_{0max} (%)
0,995	2,79	3,99
0,990	5,44	8,04
0,985	8,03	12,12
0,980	10,54	16,23
0,975	12,96	20,32
0,950	23,92	41,28
0,925	33,16	62,83
0,900	40,98	84,97

Tabulka 6.11: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při vyladěném stavu

Vyladěná tlumivka $X_0 = 82,4 \Omega$ (při symetrii 0,995)		
Symetrie druhé fáze	U_0 (pro X_0) (%)	U_{0max} (%)
0,995	4,01	4,01
0,990	8,06	8,06
0,985	12,13	12,13
0,980	16,20	16,20
0,975	20,24	20,24
0,950	39,43	41,16
0,925	55,61	62,72
0,900	68,05	84,91

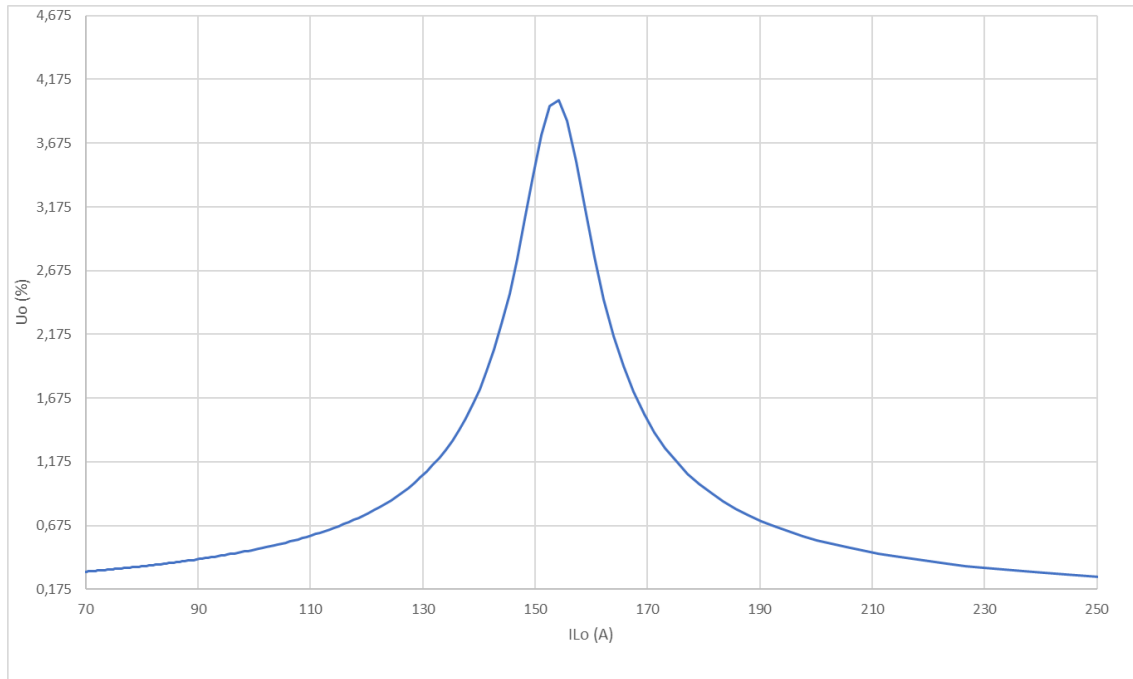
Tabulka 6.12: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při reaktanci snížené o 5 % oproti vyladěnému stavu

Rozladěná tlumivka (-5 % X_0)		
Symetrie druhé fáze	U_0 (pro X_0) (%)	U_{0max} (%)
0,995	2,45	4,00
0,990	5,02	8,04
0,985	7,71	12,12
0,980	10,53	16,23
0,975	13,50	20,32
0,950	30,65	41,27
0,925	52,19	62,82
0,900	78,07	85,00

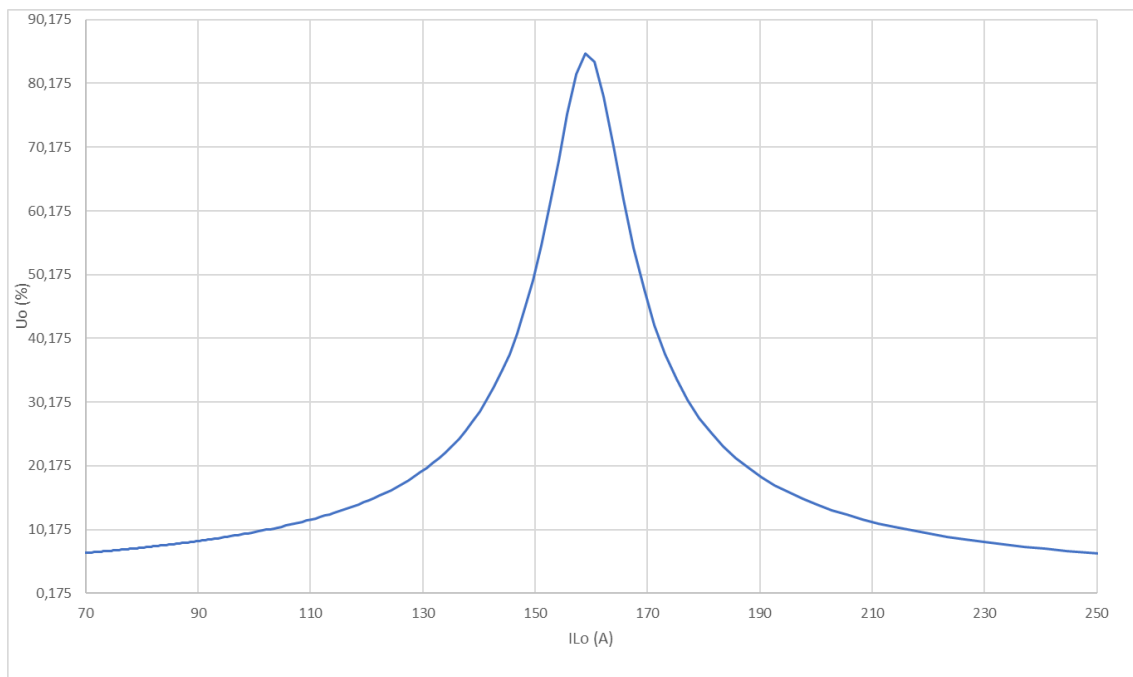
Tabulka 6.13: Velikosti napětí U_0 v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku při reaktanci snížené o 10 % oproti vyladěnému stavu

Rozladěná tlumivka (-10 % X_0)		
Symetrie druhé fáze	U_0 (pro X_0) (%)	U_{0max} (%)
0,995	1,41	4,01
0,990	2,86	8,06
0,985	4,38	12,13
0,980	5,95	16,22
0,975	7,58	20,28
0,950	16,77	41,16
0,925	28,09	62,61
0,900	42,29	84,59

Hodnoty získané díky postupné automatické parametrizaci prováděné změnou impedance \bar{Z}_0 jsem do tabulky nezaznamenával. Tyto hodnoty jsem, vzhledem k jejich velkému množství, využil k tvorbě grafů závislosti napětí U_0 na velikosti proudu I_{L0} protékajícího přes reaktanci X_0 , neboli rezonančních křivek vedení, a grafů závislosti napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na tomto proudu.

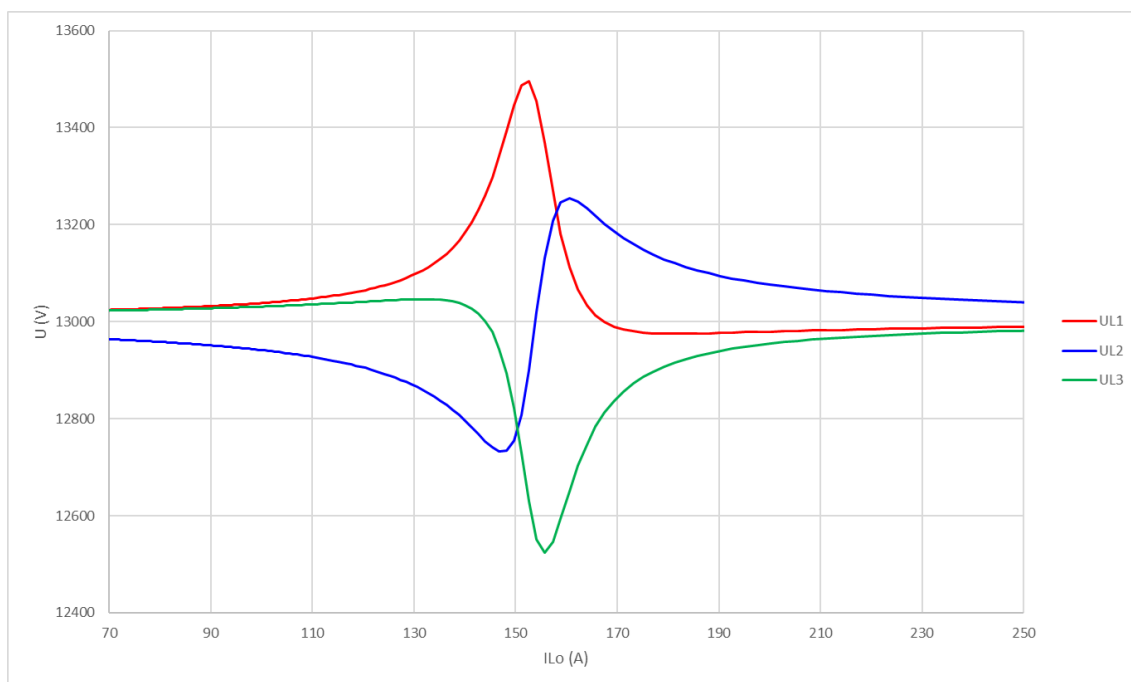


Obr. 6.6: Závislost napětí U_0 na proudu tlumivkou pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,995 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku

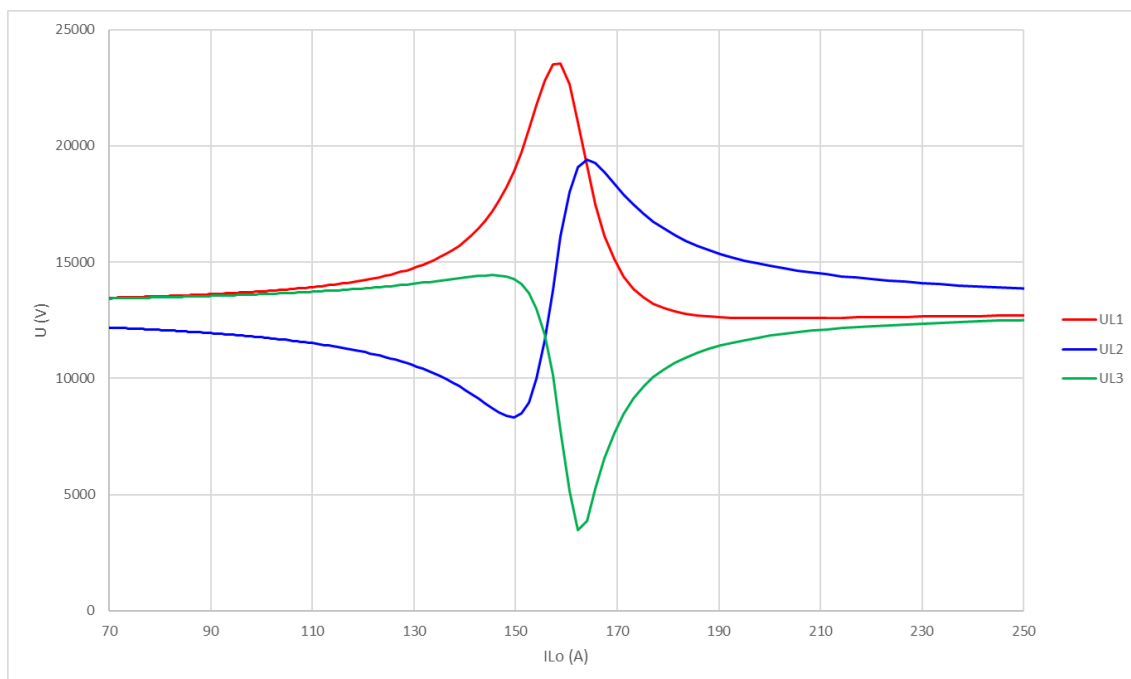


Obr. 6.7: Závislost napětí U_0 na proudu tlumivkou pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku

Vzhledem k velkému množství grafů, v této části práce ukazují ze všech grafů pro zhášecí tlumivku pouze dva grafy pro U_0 a dva grafy pro U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} , a to vždy pro nejmenší a největší nesymetrii, přičemž tyto grafy platí pro vyladěnou zhášecí tlumivku.



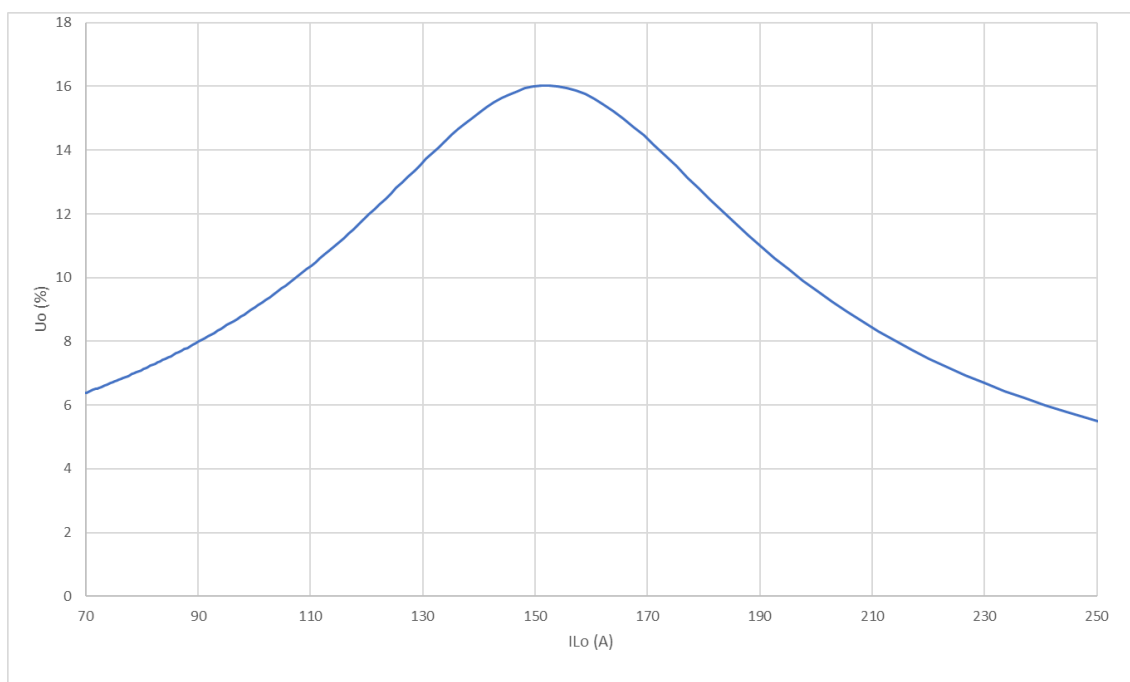
Obr. 6.8: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu tlumivkou pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,995 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku



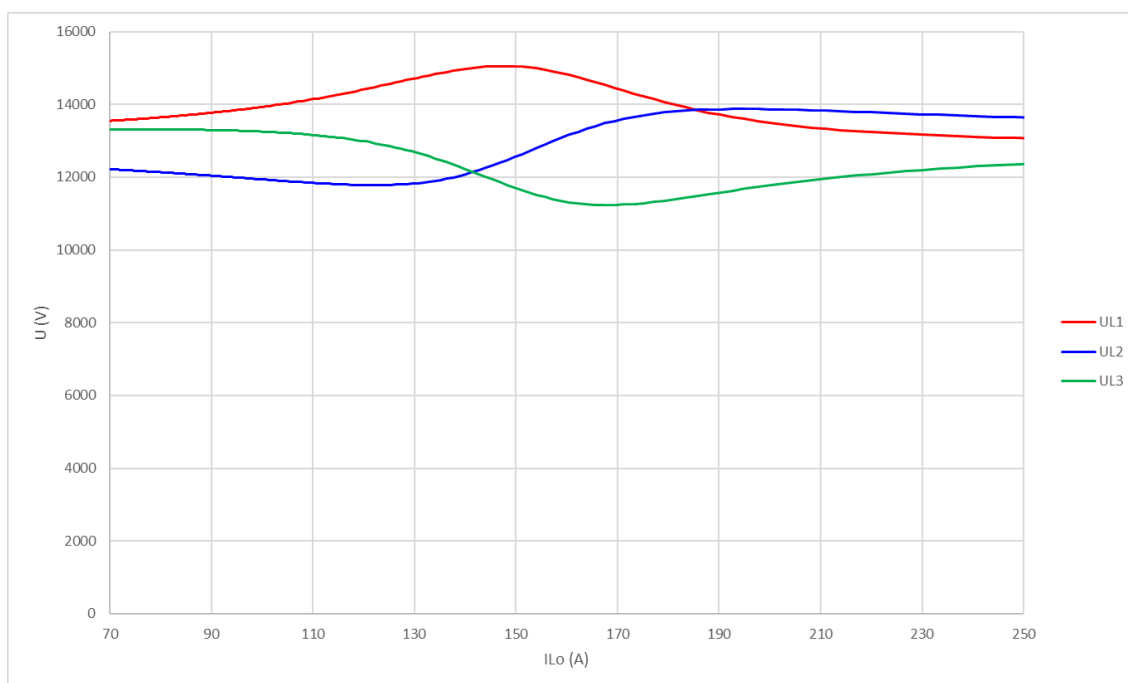
Obr. 6.9: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu tlumivkou pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku

Na obrázku 6.6 je vidět, že při symetrii 0,995 je v případě vyladěné tlumivky napětí $U_{0\ max}$, neboli maximální dosažená hodnota napětí U_0 , nad hodnotou 4 %. Z obrázku 6.7 je však patrné, že při symetrii 0,9, neboli při 10% nesymetrii druhé fáze, přesahuje hodnota $U_{0\ max}$ 84 %. Toto je patrné také z tabulky 6.11. Pokud je symetrie druhé fáze 0,995, nevzniká příliš velké napětí U_0 , ale v případě, že symetrie je pouze 0,9, se na zhášecí tlumivce objeví napětí přesahující 84 % jmenovitého fázového napětí sítě. Vliv nesymetrie je patrný i na obrázcích 6.8 a 6.9. Na těchto obrázcích jsou dobře patrné rozdíly mezi napětími jednotlivých fází v rezonanční oblasti. Při symetrii 0,995 jsou při vyladěné tlumivce rozdíly mezi napětími jednotlivých fází maximálně stovky voltů. Pokud však nastane symetrie druhé fáze jen 0,9 mohou být při vyladěné tlumivce rozdíly mezi napětími jednotlivých fází v řádech kilovoltů. Pokud provozujeme síť s vyladěnou tlumivkou, mohou tedy mezi fázemi nastávat značné rozdíly, které je však možné snížit podladěním nebo přeladěním tlumivky.

U nesymetrických sítí je možné snížit napětí U_0 na vyladěné tlumivce například připnutím odporu do pomocného vinutí zhášecí tlumivky. Tím dojde ke zvýšení tlumení sítě, což způsobí snížení napětí U_0 během rezonance, a také snížení rozdílů mezi napětími U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} . Tím však dojde ke snížení citlivosti na vysokoohmové zemní poruchy. Při velkých nesymetriích se nejedná o vhodné řešení. V těchto případech je vhodnější odstranit příčinu nesymetrie.



Obr. 6.10: Závislost napětí U_0 na proudu tlumivkou při zvýšeném tlumení sítě pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku



Obr. 6.11: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu tlumivkou při zvýšeném tlumení sítě pro vyladěnou tlumivku a symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku

Na obrázku 6.10 je vidět, že při dvacetinásobném zvýšení tlumení sítě, při symetrii druhé fáze 0,9 a vyladěné tlumivce, dosahuje napětí U_0 během rezonance hodnoty 16 %. To je oproti symetrii 0,9 při původním malém tlumení, při kterém dosahovalo napětí U_0 během rezonance téměř 85 %, značný rozdíl. Značný je také rozdíl ve tvaru rezonanční křivky U_0 při porovnání s jejím tvarem během původního malého tlumení. Z obrázku 6.11 je patrné, že při zvýšení tlumení došlo i ke snížení rozdílů mezi napětími jednotlivých fází vůči zemi. Zároveň je patrné, že ke změnám ve velikosti těchto napětí dochází v širším intervalu proudu I_{L0} . I tyto změny jsou patrné především při porovnání těchto průběhů s průběhy při původním malém tlumení.

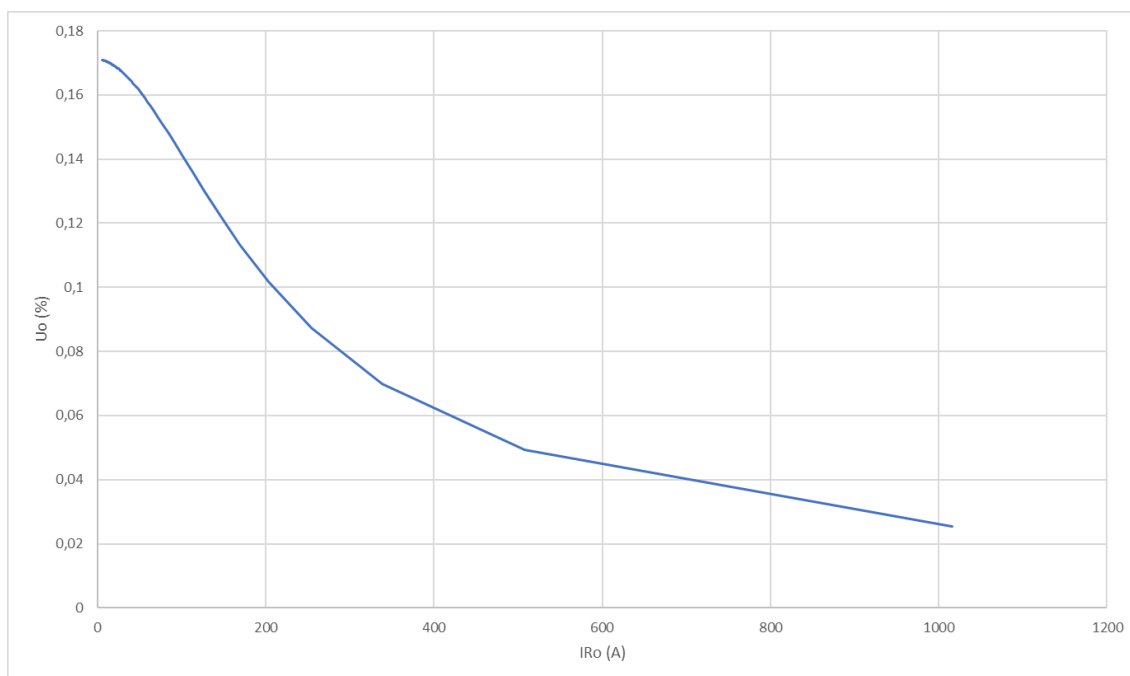
Jako poslední jsem během výpočtu vlivu nesymetrie provedl výpočet pro uzemnění přes uzlový odporník. Impedance \bar{Z}_0 byla v tomto případě rovna odporu uzemnění R_0 . Zde jsem, stejně jako v případě uzemnění přes zhášecí tlumivku, využil postupné automatické parametrizace prováděné změnou impedance \bar{Z}_0 . Následně byla vypočtena řada velikostí jmenovitých proudů I_{R0} celé vytvořené řady odporů.

Pro danou řadu odporů R_0 jsem vyzkoušel všechny mnou použité hodnoty symetrie druhé fáze. Pro každou hodnotu symetrie jsem do tabulky zaznamenal maximální hodnotu napětí U_0 tedy U_{0max} . Tato maximální hodnota vždy nastala při nejvyšší hodnotě odporu R_0 , tedy při nejnižší hodnotě proudu I_{R0} .

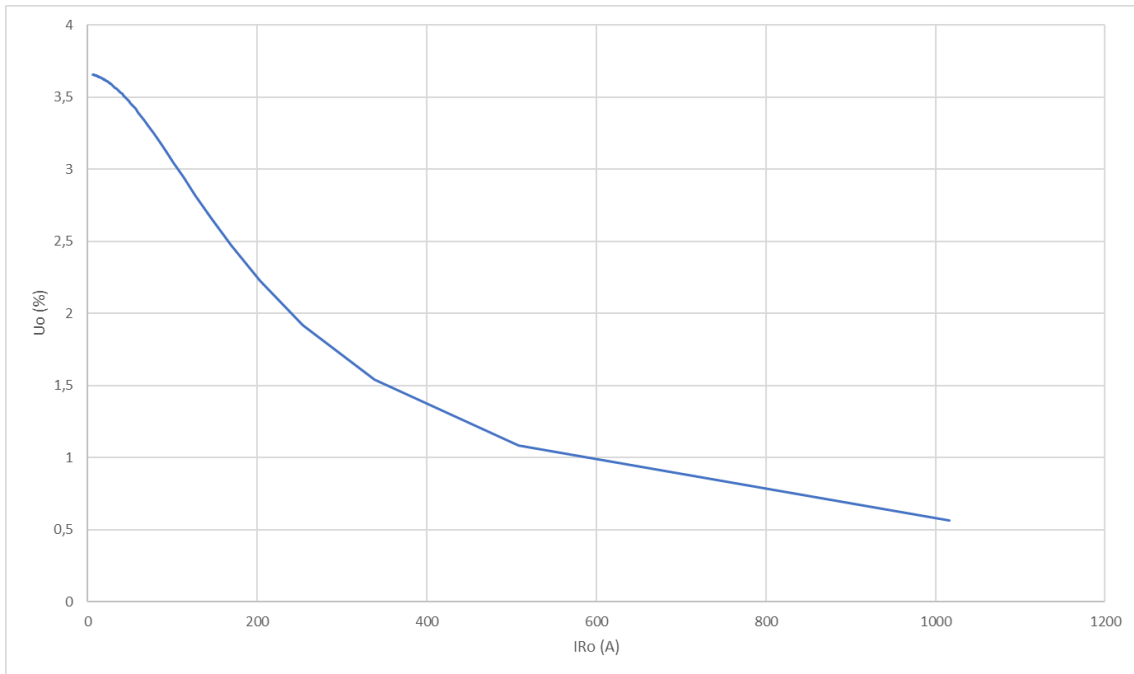
Tabulka 6.14: Velikosti napětí $U_{0\max}$ v závislosti na symetrii v síti uzemněné přes uzlový odporník

Symetrie druhé fáze	$U_{0\max}$ (%)
0,995	0,17
0,990	0,34
0,985	0,52
0,980	0,69
0,975	0,87
0,950	1,77
0,925	2,70
0,900	3,66

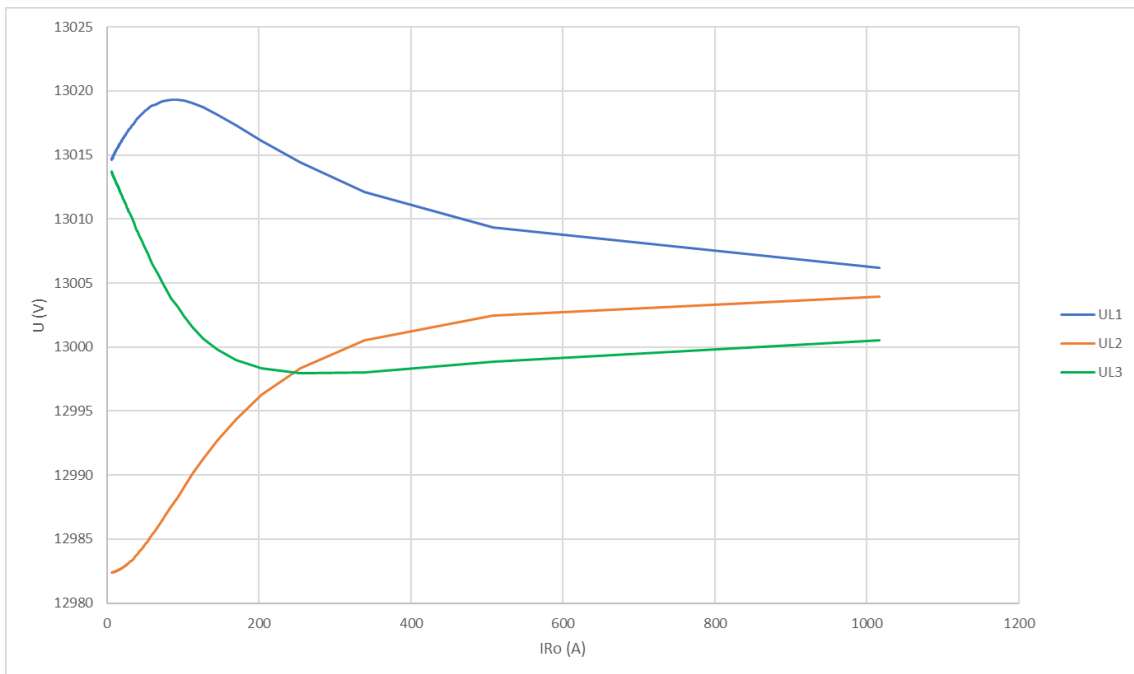
Hodnoty získané postupnou automatickou parametrizací prováděnou změnou impedance \bar{Z}_0 jsem do tabulky nezaznamenával. Tyto hodnoty jsem, vzhledem k jejich velkému množství, využil k tvorbě grafů závislosti napětí U_0 na velikosti proudu I_{R0} protékajícího přes odpor R_0 a grafů závislosti napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na tomto proudu. Jedná se tedy o závislosti napětí na jmenovitém proudu odporníku.



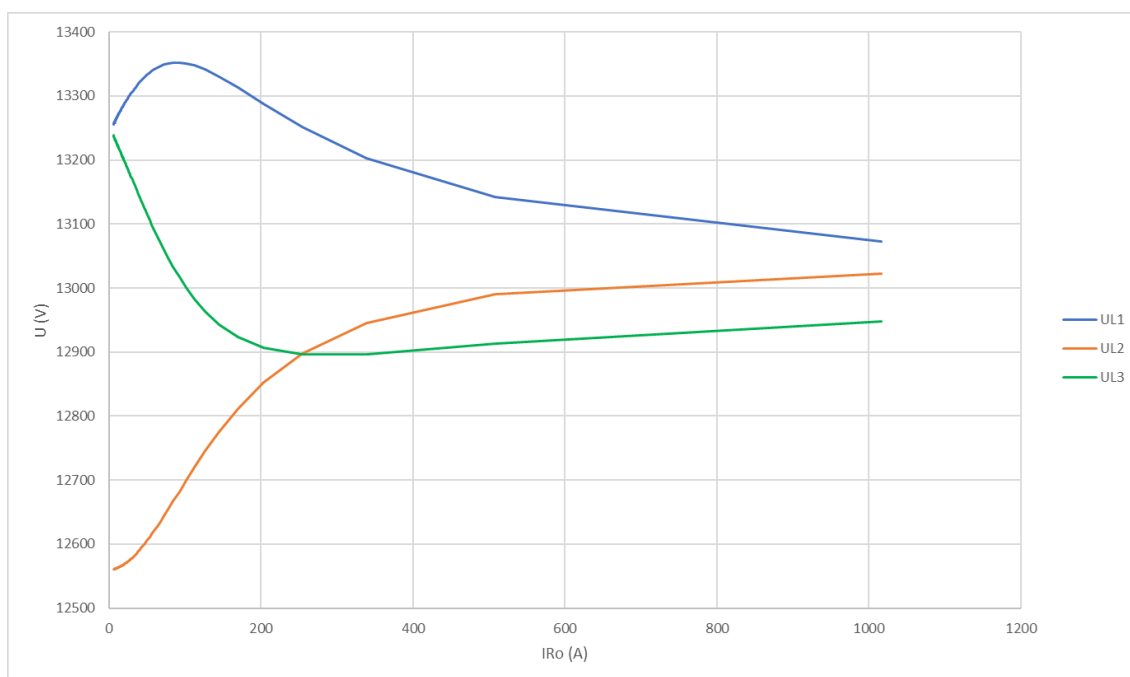
Obr. 6.12: Závislost napětí U_0 na proudu odporníkem pro symetrii druhé fáze 0,995 v síti uzemněné přes uzlový odporník



Obr. 6.13: Závislost napětí U_0 na proudu odporníkem pro symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes uzlový odporník



Obr. 6.14: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu odporníkem pro symetrii druhé fáze 0,995 v síti uzemněné přes uzlový odporník



Obr. 6.15: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na proudu odporů pro symetrii druhé fáze 0,9 v síti uzemněné přes uzlový odpor

Vzhledem k poměrně velkému množství grafů, v této části práce ukazují ze všech grafů pro uzlový odpor pouze dva grafy pro U_0 a dva grafy pro U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} , a to vždy pro nejmenší a největší nesymetrii.

Na obrázcích 6.12 a 6.13 je vidět, že při symetrii druhé fáze 0,995 je maximum napětí U_0 na hodnotě 0,17 % a při symetrii 0,9 je hodnota U_{0max} 3,66 %. Toto je vidět i v tabulce 6.14. Grafy jsou ovšem vytvořené v závislosti na jmenovitém proudu I_{R0} uzlovým odporníkem. Je na nich tedy kromě maxima také vidět, že při vyšším jmenovitém proudu odporníku velikost napětí U_0 při dané nesymetrii klesá. Jinými slovy, pokud je pro uzemnění sítě použit odporník s velkým jmenovitým proudem, proud \bar{I}_0 , protékající vlivem dané nesymetrie odporníkem, vytvoří na tomto odporníku nižší velikost napětí U_0 než by vytvořil na odporníku s malou jmenovitou hodnotou proudu. Z obrázků 6.14 a 6.15 je vidět, že při změně nesymetrie se při daném jmenovitém proudu odporníku mění hodnoty napětí jednotlivých fází. Dochází zde také ke změně rozsahu, ve kterém se napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} při zvyšování proudu I_{R0} pohybují. Na těchto obrázcích je také vidět, že použití odporníku s nízkou hodnotou proudu I_{R0} může být problematické z důvodu velkých rozdílů v napětích U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} . Z tohoto pohledu je tedy žádoucí použití odporníku s vyšší jmenovitou hodnotou proudu I_{R0} .

6.2 Výpočet vlivu odporu poruchy

Většina parametrů zde zůstává stejná, jako při výpočtu vlivu nesymetrie. Změnily se jen hodnoty podélných impedancí jednotlivých fází \bar{Z}_{V1} , \bar{Z}_{V2} a \bar{Z}_{V3} , které zde mají již větší vliv než v případě výpočtu nesymetrie. Přibyl zde však parametr R_p , tedy odpor poruchy, který je zadáván ručně a není závislý na žádném jiném parametru. Vzhledem k tomu, že je zde modelována porucha na první fázi, mění se s odporem poruchy impedance první fáze vůči zemi \bar{Z}_{L1} .

Tabulka 6.15: Parametry zadávané pro výpočet vlivu odporu poruchy

Fázor natočení o +120°	\bar{a}	-0,5+0,866025403784439i	-
Fázor natočení o -120°	\bar{a}^2	-0,5-0,866025403784439i	-
Jmenovité fázové napětí první fáze	\bar{E}	12700	V
Jmenovité fázové napětí druhé fáze	$\bar{E} \cdot \bar{a}$	-6350+10998,5226280624i	V
Jmenovité fázové napětí třetí fáze	$\bar{E} \cdot \bar{a}^2$	-6350-10998,5226280624i	V
Reaktance mezi uzlem sítě a zemí	X_0	8,24E+01	Ω
Odpor mezi uzlem sítě a zemí	$R_0; I_{R0} = 1 \% I_{X0}$	8,24E+03	Ω
Impedance mezi uzlem sítě a zemí	\bar{Z}_0	0,823917608239176+82,3917608239176i	Ω
Jednofázový kapacitní proud sítě	I_{C1}	50	A
Reaktance jedné fáze vůči zemi	X_C	-254,034118443435i	Ω
Odpor poruchy	R_p	600	Ω
Svodový odpor vedení	$R_S; I_{RS} = 2 \% I_{XC}$	12701,7059221717	Ω
Jmenovitá impedance fáze s poruchou (první fáze) vůči zemi	\bar{Z}_{L1}	91,2060301507536-215,418379333315i	Ω
Jmenovitá impedance jedné fáze bez poruchy vůči zemi	\bar{Z}_L	5,07865090850532-253,932545425265i	Ω
Symetrie první fáze	Sym L1	1	-
Symetrie druhé fáze	Sym L2	0,995	-
Symetrie třetí fáze	Sym L3	1	-
Podélná impedance první fáze	\bar{Z}_{V1}	1+2i	Ω
Podélná impedance druhé fáze	\bar{Z}_{V2}	1+2i	Ω
Podélná impedance třetí fáze	\bar{Z}_{V3}	1+2i	Ω
Skutečná impedance první fáze vůči zemi	\bar{Z}_{L1}	5,07865090850532-253,932545425265i	Ω
Skutečná impedance druhé fáze vůči zemi	\bar{Z}_{L2}	4,57078581765479-228,539290882738i	Ω
Skutečná impedance třetí fáze vůči zemi	\bar{Z}_{L3}	5,07865090850532-253,932545425265i	Ω

Při výpočtu vlivu odporu poruchy, jsem zjišťoval vliv tohoto odporu na napětí \bar{U}_0 a na jednotlivá fázová napětí vůči zemi \bar{U}_{L1} , \bar{U}_{L2} , \bar{U}_{L3} . Zde jsem pracoval s hodnotou symetrie druhé fáze o stálé velikosti 0,995. Ostatní fáze zůstaly symetrické. I zde jsem nastavením

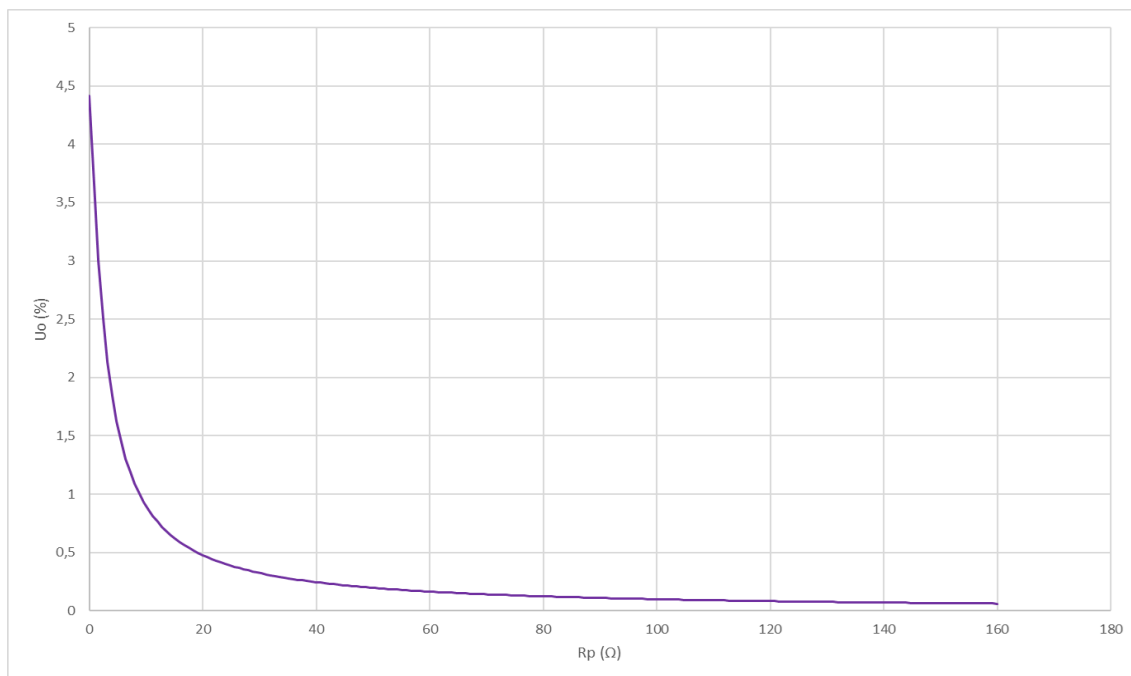
hodnoty impedance \bar{Z}_0 zvolil způsob uzemnění sítě. Následně jsem zvolil odpor poruchy. U každého způsobu uzemnění sítě jsem před začátkem zaznamenávání hodnot zvolil maximální odpor poruchy. Tento maximální odpor poruchy jsem volil tak, aby při něm zaručeně došlo k poklesu velikosti napětí U_0 pod stanovenou mez. U sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku a u izolované sítě byla tato mez stanovena na 20 %, u sítě uzemněné přes uzlový odporník na 5 %. U přímo uzemněné sítě jsem maximální odpor volil tak, aby při něm zaručeně došlo k poklesu velikosti proudu I_0 pod úroveň 100 A. Po tomto nastavení následovala postupná automatická parametrizace prováděná změnou odporu poruchy R_p od hodnoty 0,0001 Ω (ve výpočtu nelze pracovat s nulovou hodnotou) až do zadané maximální hodnoty tohoto odporu. Během tohoto procesu byly do tabulky zaznamenávány hodnoty velikosti napětí U_0 , U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} a dále také velikosti proudů I_0 , I_{L1} , I_{L2} a I_{L3} . Z hodnot z této tabulky jsem následně vytvořil grafy.

V přímo uzemněné síti jsem nastavil impedanci \bar{Z}_0 rovnou hodnotě R_0 , kterou jsem zvolil 0,1 Ω . V závislosti na odporu poruchy jsem do tabulky zaznamenával velikost napětí U_0 a velikost proudu I_0 , na kterém je změna odporu poruchy patrná více, než na napětí U_0 . Tabulka obsahuje jen několik hodnot U_0 a I_0 z velkého množství hodnot získaného během postupné automatické parametrizace prováděné změnou odporu poruchy. Slouží tedy pouze k získání základní představy o průběhu napětí U_0 a proudu I_0 v závislosti na odporu poruchy R_p .

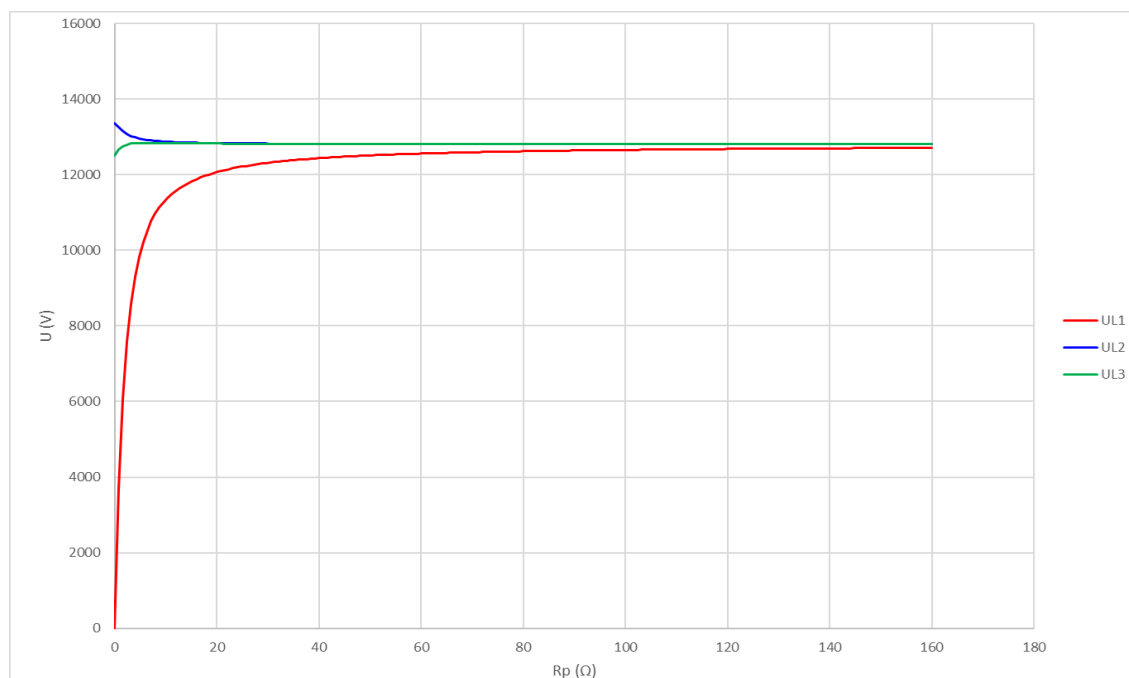
Tabulka 6.16: Velikosti napětí U_0 a proudu I_0 v závislosti na odporu poruchy v přímo uzemněné síti

Odpor poruchy R_p [Ω]	U_0 (%)	I_0 (A)
160	0,06	78,83
80	0,12	157,77
60	0,17	209,75
40	0,25	312,18
20	0,48	606,99
10	0,90	1140,79
5	1,58	2002,42
1	3,48	4417,37

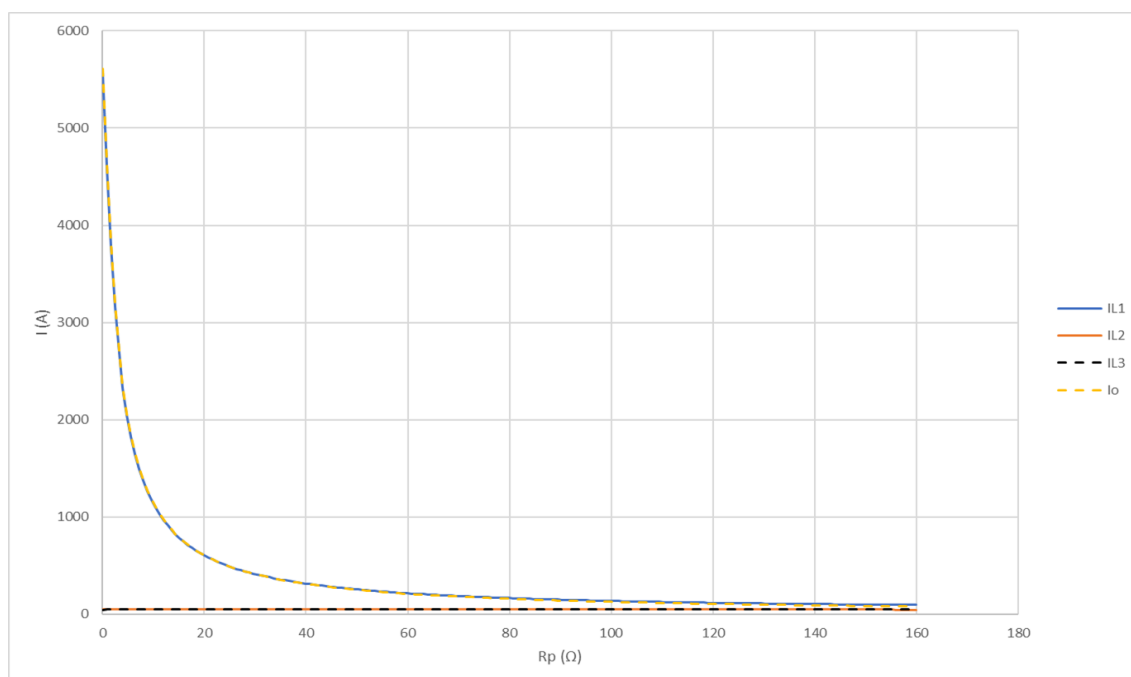
Vzhledem k velkému množství hodnot, které vznikly automatickou změnou odporu poruchy R_p , jsem nemohl do tabulek zaznamenat všechny hodnoty. Využil jsem je k vytvoření grafů závislosti U_0 na odporu poruchy R_p , závislosti proudu I_0 na odporu poruchy a k vytvoření grafu závislosti velikosti napětí jednotlivých fází vůči zemi U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy R_p .



Obr. 6.16: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy v přímo uzemněné síti



Obr. 6.17: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy v přímo uzemněné síti



Obr. 6.18: Závislost proudů I_0 , I_{L1} , I_{L2} a I_{L3} na odporu poruchy v přímo uzemněné síti

Na obrázku 6.16 je vidět, že pro odpor poruchy blíží se k nule dosahuje napětí U_0 téměř k hodnotě 4,5 %, ale se zvyšujícím se odporem poruchy prudce klesá. Za povšimnutí stojí také srovnání s tabulkou 6.16, ze které je vidět, že při hodnotě odporu poruchy 1 Ω dosahuje napětí U_0 hodnoty 3,48 %. Z toho je patrné, že z téměř nulové hodnoty odporu poruchy stačí jeho zvýšení o 1 Ω , a dojde k poklesu napětí U_0 přibližně o 1 %. Dále je na obrázku 6.17 patrné, že napětí neporušených fází se při téměř nulovém odporu poruchy odchyluje od své jmenovité hodnoty jen minimálně a při zvyšování hodnoty R_p dochází k jeho ustálení na jmenovité hodnotě. Napětí fáze s poruchou U_{L1} se z prakticky nulové hodnoty zvyšuje spolu se zvyšováním odporu poruchy R_p . Na obrázku 6.18, který zobrazuje závislost proudů I_0 , I_{L1} , I_{L2} a I_{L3} na odporu poruchy je vidět, že velikosti proudů neporušených fází se během zvyšování odporu poruchy nemění. Tyto proudy se vzhledem ke své téměř stejné velikosti v grafu překrývají. Dále je z tohoto obrázku vidět, že dochází i k překrývání proudů I_0 a I_{L1} , jejichž hodnoty se liší o řádově jednotky ampér. K poklesu proudu I_0 pod stanovenou mez 100 A došlo poté, co odpor poruchy překročil hodnotu 125,6 Ω .

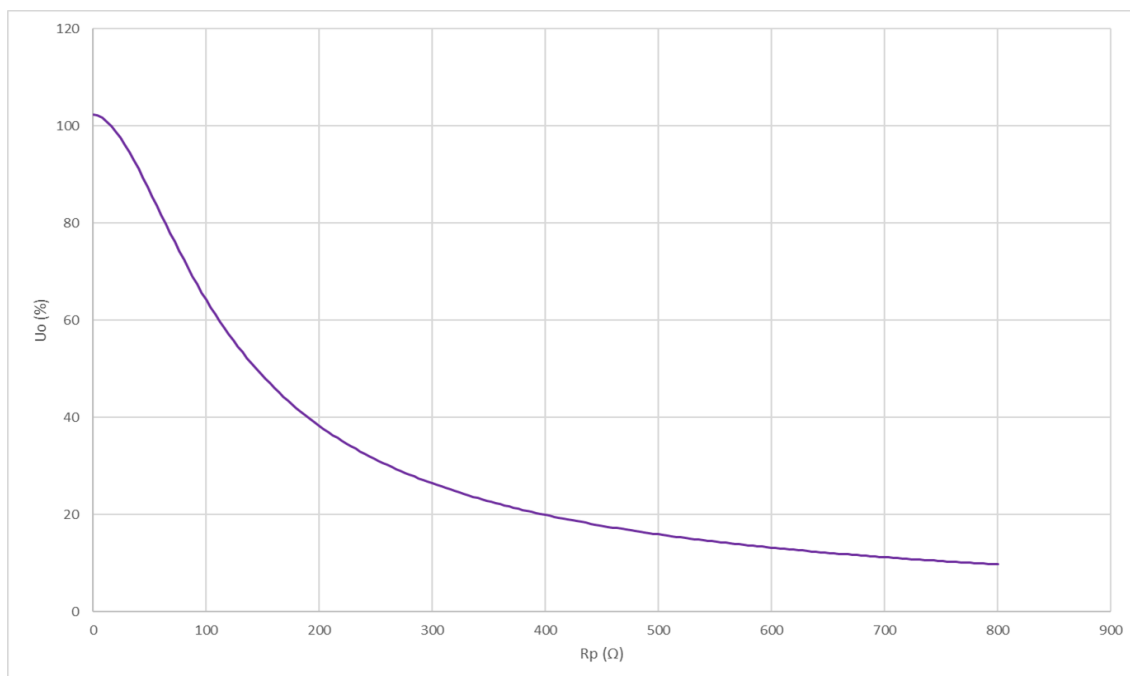
V případě izolované sítě jsem u impedance \bar{Z}_0 použil paralelní kombinaci R_0 a X_0 , přičemž obě tyto hodnoty jsem nastavil na velikost $1 \cdot 10^{10} \Omega$. Na rozdíl od přímo uzemněné sítě jsem zde do tabulky zapisoval jen hodnoty velikosti napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy. Tabulka obsahuje jen několik hodnot U_0 z velkého množství hodnot získaného během postupné

automatické parametrizace prováděné změnou odporu poruchy. Slouží tedy pouze k získání základní představy o průběhu napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy R_p .

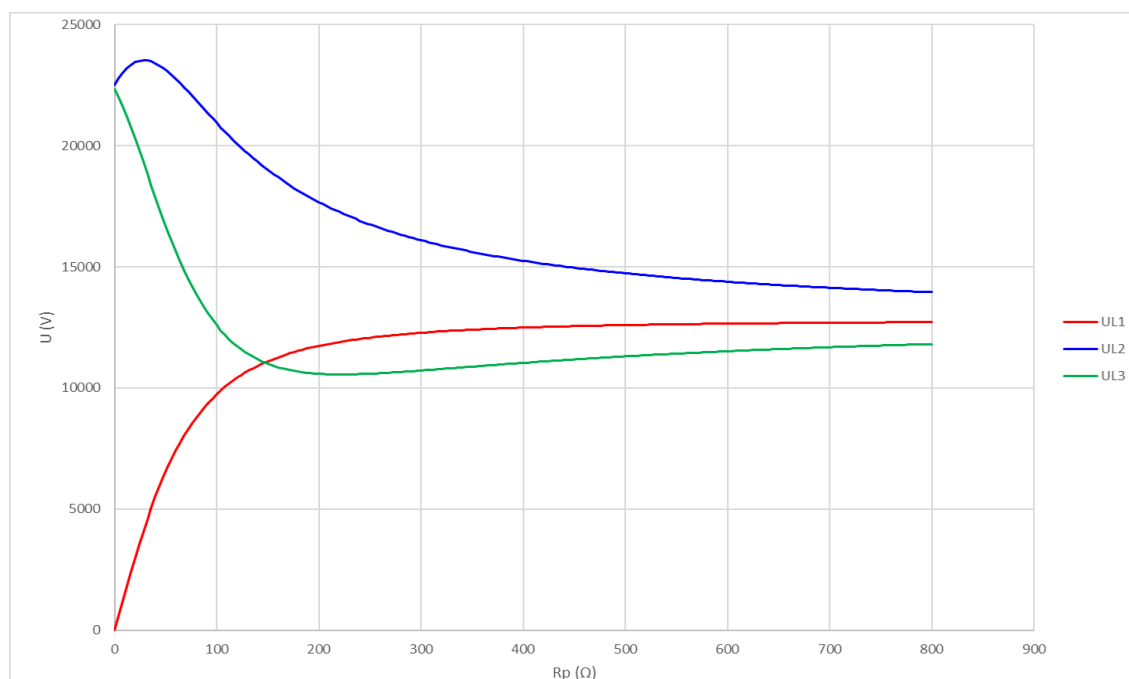
Tabulka 6.17: Velikosti napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy v izolované síti

Odpor poruchy R_p (Ω)	U_0 (%)
800	9,76
600	13,21
400	19,96
300	26,43
200	38,28
100	64,17
10	101,30
1	102,35

Vzhledem k velkému množství hodnot, které vznikly automatickou změnou odporu poruchy R_p , jsem do tabulek nezaznamenával všechny hodnoty. Tyto hodnoty jsem využil k vytvoření grafu závislosti U_0 na odporu poruchy R_p a k vytvoření grafu závislosti velikosti napětí jednotlivých fází vůči zemi U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy R_p .



Obr. 6.19: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy v izolované síti



Obr. 6.20: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy v izolované síti

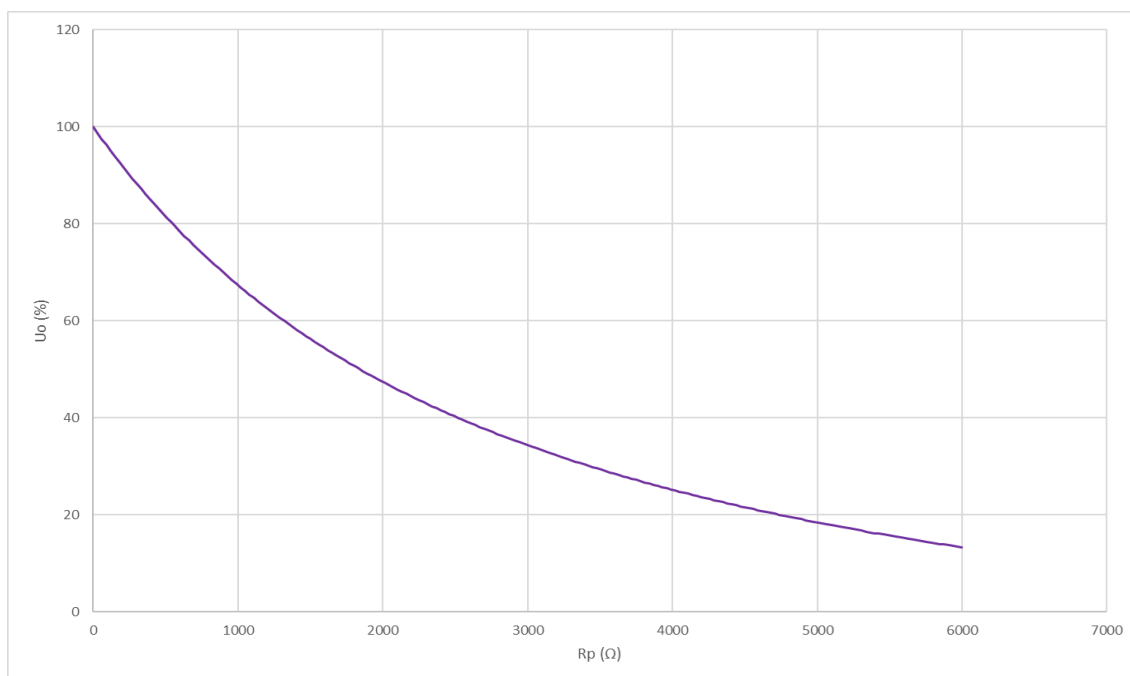
Na obrázku 6.19 je vidět, že při odporu poruchy blízcím se nule, napětí U_0 přesahuje hodnotu 100 %. To je zřejmě způsobeno výpočtem ve zjednodušeném modelu sítě. Dále je však vidět, že napětí U_0 při zvyšujícím se odporu poruchy R_p klesá. K poklesu U_0 pod stanovenou mez 20 % došlo po překročení hodnoty 396 Ω u odporu poruchy. Dále je z obrázku 6.20 patrné, že zatímco napětí U_{L3} , jehož hodnota přesahuje 22 kV při odporu poruchy blízcím se nule, při zvyšování odporu poruchy klesá, napětí U_{L2} , které má při odporu poruchy blízcím se k nule stejnou hodnotu jako napětí U_{L3} , při zvyšování odporu poruchy napřed stoupá, a až po dalším zvyšování odporu poruchy začne klesat. Napětí U_{L1} fáze s poruchou, od téměř nulové hodnoty při odporu poruchy blízcím se k nule, roste spolu se zvyšováním odporu poruchy.

U sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku jsem stejně jako u izolované sítě pro impedanci \bar{Z}_0 použil paralelní kombinaci R_0 a X_0 , přičemž hodnota reaktance byla v mém případě 82,4 Ω . V tomto výpočtu jsem pracoval pouze s vyladěnou tlumivkou. Do tabulky jsem zde zaznamenával hodnoty velikosti napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy. Tabulka obsahuje jen několik hodnot U_0 z velkého množství hodnot získaného během postupné automatické parametrizace prováděné změnou odporu poruchy. Slouží tedy, stejně jako v izolované síti, pouze k získání základní představy o průběhu napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy R_p .

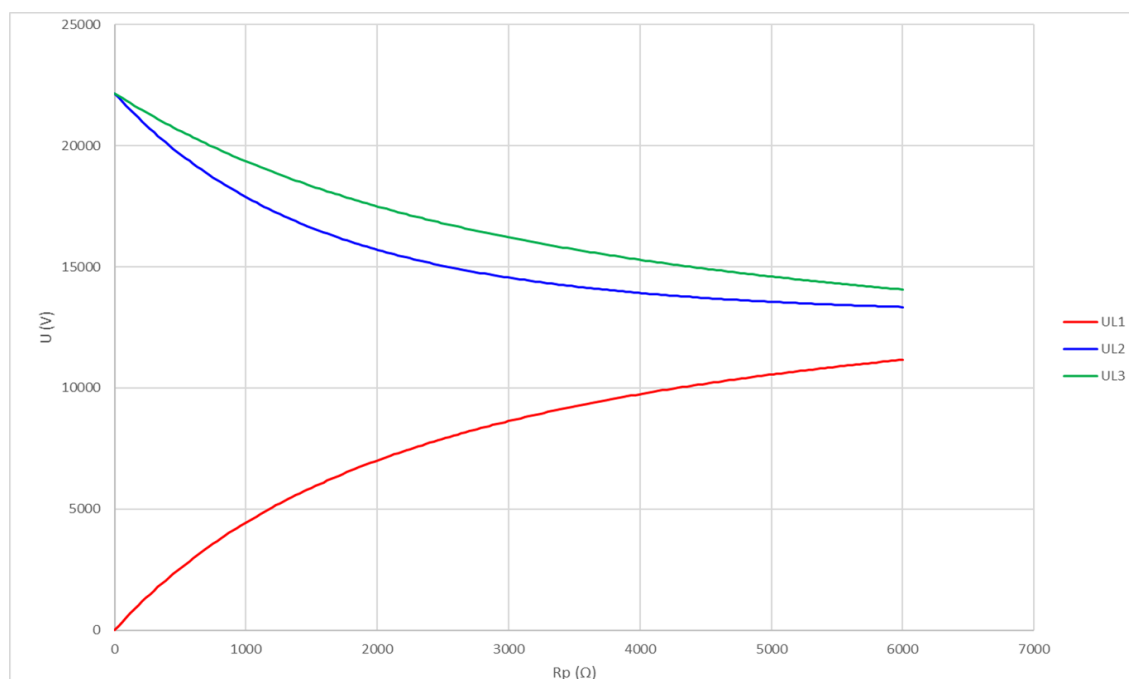
Tabulka 6.18: Velikosti napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku

Odpor poruchy R_p (Ω)	U_0 (%)
6000	13,43
4000	25,19
2500	40,27
1500	56,26
800	72,56
500	81,49
100	95,82
1	99,88

Kvůli velkému množství hodnot, které vznikly automatickou změnou odporu poruchy R_p , jsem do tabulek nezaznamenával všechny hodnoty, ale využil jsem je k vytvoření grafu závislosti U_0 na odporu poruchy R_p a k vytvoření grafu závislosti velikosti napětí jednotlivých fází vůči zemi U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy R_p .



Obr. 6.21: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku



Obr. 6.22: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku

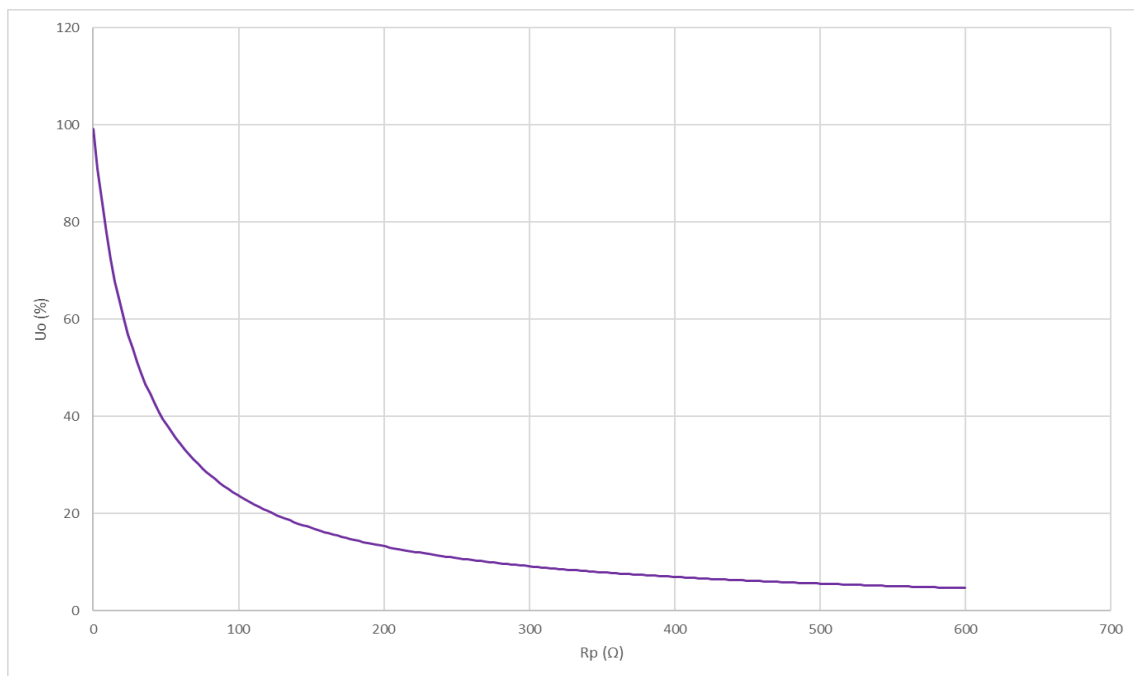
Z obrázku 6.21 je patrné, že i v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku napětí U_0 klesá při zvyšování odporu poruchy. Na rozdíl od ostatních sítí zde ale dochází k pozvolnějšimu poklesu. I zde byla, stejně jako u izolované sítě, mez poklesu U_0 stanovena na 20 %. Ale zatímco v izolované síti k poklesu pod tuto mez došlo po překonání hodnoty 396Ω odporu poruchy R_p , v síti uzemněné přes zhášecí tlumivku k tomuto poklesu došlo až po zvýšení odporu poruchy nad hodnotu 4740Ω . Na obrázku 6.22 je vidět, že napětí U_{L2} a U_{L3} , tedy napětí neporušených fází, mají při odporu poruchy blízcím se nule velikost přesahující 22 kV a při zvyšování odporu poruchy dochází k jejich pozvolnému poklesu. Napětí U_{L1} fáze s poruchou roste, od přibližně nulové hodnoty při odporu poruchy blízcím se k nule, spolu se zvyšujícím se odporem poruchy R_p . Toto napětí roste při zvyšování odporu poruchy pomaleji než v ostatních případech.

Poslední případ, u kterého jsem zjišťoval vliv odporu poruchy byla síť uzemněná přes uzlový odporník. Zde jsem, stejně jako u přímého uzemnění, nastavil impedanci \bar{Z}_0 rovnou hodnotě R_0 , kterou jsem zvolil $33,25 \Omega$. I zde jsem, stejně jako v předchozích případech, zapisoval do tabulky napětí U_0 . Tabulka obsahuje jen několik hodnot U_0 z velkého množství hodnot získaného během postupné automatické parametrizace prováděné změnou odporu poruchy. Slouží tedy, stejně jako v předchozích případech, pouze k získání základní představy o průběhu napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy R_p .

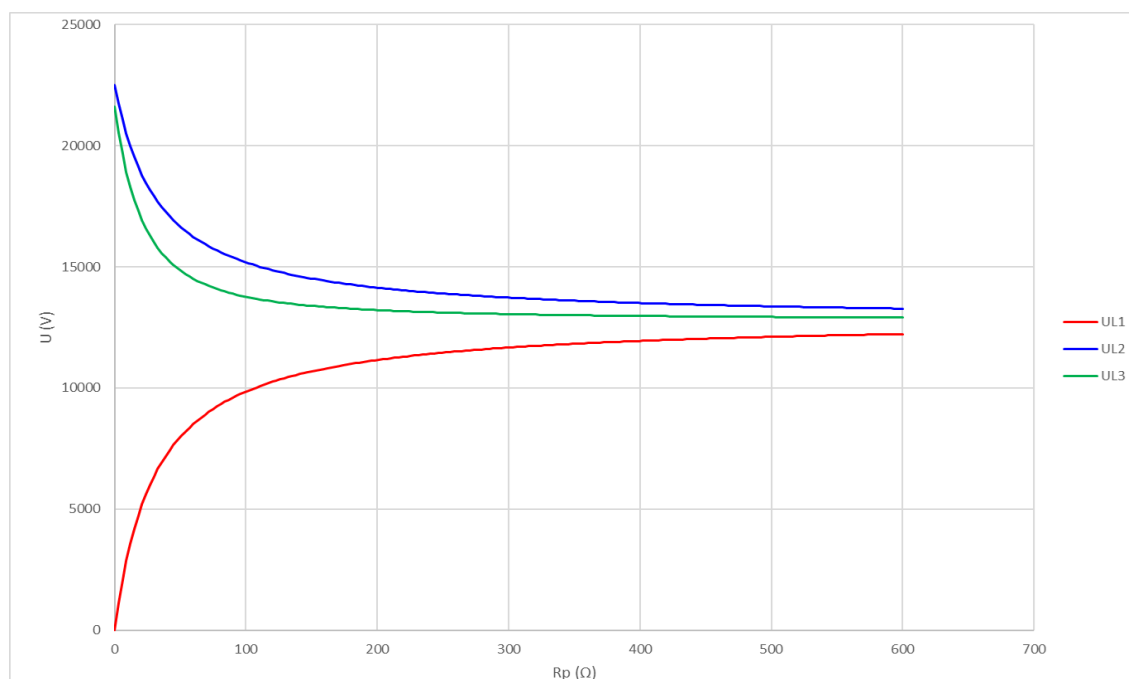
Tabulka 6.19: Velikosti napětí U_0 v závislosti na odporu poruchy v síti uzemněné přes uzlový odporník

Odpor poruchy R_p (Ω)	U_0 (%)
600	4,67
300	9,18
200	13,30
100	23,72
80	28,06
40	44,02
10	75,84
1	96,21

I zde došlo k vytvoření velkého množství hodnot, které vznikly automatickou změnou odporu poruchy R_p . Do tabulek jsem tedy nezaznamenával všechny hodnoty, ale využil jsem je k vytvoření grafu závislosti U_0 na odporu poruchy R_p a k vytvoření grafu závislosti velikosti napětí jednotlivých fází vůči zemi U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy R_p .



Obr. 6.23: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy v síti uzemněné přes uzlový odporník



Obr. 6.24: Závislost napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na odporu poruchy v síti uzemněné přes uzlový odporník

Z obrázku 6.23 je vidět, že při uzemnění přes odporník, napětí U_0 klesá při zvyšování odporu poruchy R_p . Dochází zde ke strmějšímu poklesu napětí U_0 v porovnání se sítí uzemněnou přes zhášecí tlumivku nebo s izolovanou sítí, ale jedná se o méně strmý pokles než v případě přímo uzemněné sítě. Pro pokles napětí U_0 zde byla stanovena mez 5 %. Pod tuto mez napětí kleslo při zvýšení velikosti odporu poruchy R_p nad 558 Ω . Na obrázku 6.24 je vidět, že napětí druhé a třetí fáze U_{L2} a U_{L3} , jejichž hodnoty se při odporu poruchy blízcím se k nule pohybují kolem 22 kV, při zvyšování odporu poruchy poměrně rychle klesají a přibližují se ke svým jmenovitým hodnotám. Napětí U_{L1} fáze s poruchou roste, stejně jako ve všech předchozích případech, spolu se zvyšováním velikosti odporu poruchy R_p .

6.3 Shrnutí výpočtu a porovnání

V první části jsem zjišťoval vliv nesymetrie vedení na napětí U_0 mezi uzlem sítě a zemí a na napětí jednotlivých fází vůči zemi pro různá uzemnění sítě. Symetrii jsem měnil u druhé fáze, zatímco první a třetí fáze zůstaly symetrické. V obou případech jsem počítal se zjednodušeným modelem sítě. Zjednodušený model však plně vyhovuje pro názornou demonstraci vlivu způsobu uzemnění uzlu na nesymetrii příčných parametrů sítě.

Pro uzemnění uzlu sítě přes zhášecí tlumivku, jsem vyzkoušel průběhy napětí pro vyladěnou tlumivku a následně i pro nevladěnou. Pro nevladěnou tlumivku jsem nastavil

reaktanci tlumivky o pět procent nižší, pět procent vyšší, deset procent nižší a následně o deset procent vyšší oproti vyladěnému stavu. Ve všech těchto případech má křivka závislosti U_0 konkávní tvar, přičemž maximum této křivky nastává během paralelní rezonance tlumivky s příčnými kapacitami sítě a zvyšuje se spolu se zvyšující se nesymetrií. Pokud je tedy tlumivka správně vyladěna a nastane paralelní rezonance s příčnými kapacitami sítě, bude napětí U_0 , které se na tlumivce objeví, maximální při dané konfiguraci sítě. Pokud bude ale tlumivka rozladěna, napětí U_0 bude dosahovat nižších hodnot. Při malých nesymetriích jsou hodnoty U_0 na přeladěné i podladěné tlumivce téměř stejné. Při větších nesymetriích (např. 5 %) je vyššího napětí dosaženo na podladěné tlumivce. Toto platí při rozladění o pět i deset procent. Pokud by tedy při vyladěné tlumivce nastala na vedení taková nesymetrie, že by hodnota napětí U_0 překročila stanovenou mez, bylo by signalizováno zemní spojení. Zatímco pokud by tento stav nastal při nevyladěné tlumivce, ochrany by na nesymetrii nereagovaly správně. V oblasti rezonance dochází také ke značným výchylkám v průbězích napětí jednotlivých fází vůči zemi. Rozdíly v napětích jednotlivých fází jsou při rezonanci největší, proto je možné tlumivku podladit, aby se dosáhlo nižších rozdílů mezi napětími jednotlivých fází. Hodnoty těchto výchylek se také zvyšují spolu se zvyšující se nesymetrií. Na tvar průběhu těchto napětí nemá vyladění tlumivky vliv.

Napětí U_0 se u sítě uzemněné přes odporník zvyšuje při zvyšující se nesymetrii. V této síti je však napětí U_0 , oproti síti uzemněné přes zhašecí tlumivku, mnohem méně závislé na nesymetrii sítě. Pro síť uzemněnou přes odporník platí, že napětí U_0 se snižuje při používání odporníků s vyšším jmenovitým proudem.

U přímo uzemněné sítě se napětí U_0 téměř neprojeví, protože mezi uzlem sítě a zemí není téměř žádná impedance. V méj simulaci jsem pro přímo uzemněnou síť nastavil mezi uzlem a zemí odpor $0,1 \Omega$, takže se napětí U_0 při výpočtech nepatrně projevilo, a to velikostí menší než setina procenta jmenovitého fázového napětí sítě. Pro tuto síť jsem tedy vytvořil grafy U_0 a napětí jednotlivých fází vůči zemi v závislosti na symetrii druhé fáze.

V izolované síti se při rostoucí nesymetrii také zvyšuje hodnota U_0 . V tomto případě neprotéká mezi zemí a uzlem sítě žádný proud, vytvořil jsem tedy stejně jako u přímo uzemněné sítě grafy U_0 a napětí jednotlivých fází vůči zemi v závislosti na nesymetrii druhé fáze.

V druhé části, jsem zjišťoval vliv odporu poruchy na velikost napětí U_0 a na velikost napětí jednotlivých fází vůči zemi. Symetrie druhé fáze byla nastavena na 0,995. Příčné parametry druhé fáze tedy měly hodnotu 99,5 % příčných parametrů první, respektive třetí fáze. První a třetí fáze zůstaly symetrické.

V síti uzemněné přes vyladěnou zhášecí tlumivku se při zvyšování odporu poruchy snižuje napětí U_0 , které při kovovém zemním spojení dosahuje téměř sta procent. U tohoto způsobu uzemnění jsem sledoval, kdy dojde k poklesu napětí U_0 pod hodnotu 20 % jmenovitého fázového napětí sítě. K tomuto poklesu došlo poté, co se odpor poruchy zvýšil nad hodnotu 4740 Ω , což je zdaleka nejvíce ze všech zkoušených způsobů uzemnění. Fázová napětí druhé a třetí fáze přesahují při kovovém zemním spojení 22 kV a se zvyšujícím se odporem poruchy dochází k jejich snižování. Napětí postižené fáze je při kovovém zemním spojení téměř rovno nule a při zvyšování odporu poruchy se zvyšuje.

U izolované sítě dochází také k postupnému poklesu napětí U_0 zvyšováním odporu poruchy. V tomto případě ovšem napětí U_0 při kovovém zemním spojení převyšuje hodnotu 100 % jmenovitého fázového napětí sítě, toto je zřejmě způsobeno uvažováním zjednodušeného modelu sítě během výpočtu. I zde jsem sledoval, při jakém odporu poruchy napětí U_0 klesne pod 20 %. K poklesu U_0 pod stanovenou mez došlo při zvýšení odporu poruchy nad hodnotu 396 Ω , tedy výrazně méně než při uzemnění přes zhášecí tlumivku. Fázová napětí druhé a třetí fáze překračují při kovovém zemním spojení 22 kV. Zatímco napětí třetí fáze začíná se zvyšujícím se odporem poruchy klesat, napětí druhé fáze se nejprve zvyšuje a až při dalším zvýšení odporu poruchy začne také klesat. Napětí postižené první fáze se opět zvyšuje od téměř nulové hodnoty.

V síti uzemněné přes uzlový odporník napětí U_0 při zvyšování odporu poruchy také klesá. Zde jsem sledoval pokles napětí U_0 pod 5 % jmenovitého fázového napětí sítě. K tomuto poklesu došlo při zvýšení odporu poruchy nad hodnotu 558 Ω . Pokles U_0 je zde strmější než v předchozích dvou případech. Se zvyšujícím se odporem poruchy dochází také ke strmějšímu snižování napětí jednotlivých fází vůči zemi. V tomto případě dosahuje při kovovém zemním spojení napětí druhé a třetí fáze hodnoty kolem 22 kV. Napětí postižené první fáze i zde začíná téměř v nule a s růstem odporu poruchy dochází k jeho zvyšování.

V případě přímo uzemněné sítě není možné rozlišovat, zda došlo k poruše podle napětí U_0 , proto jsem zde sledoval proud I_0 , konkrétně hodnotu odporu poruchy, při které I_0 klesne pod hodnotu 100 A. K tomuto poklesu došlo při hodnotě odporu poruchy 125,6 Ω . Při kovovém zemním zkratu měl však tento proud hodnotu více než 5600 A. Napětí druhé a třetí fáze se při kovovém zemním zkratu změnila o stovky voltů, což je nejnižší výchylka od jmenovité hodnoty napětí ze všech zkoušených způsobů uzemnění. Dojde zde velice rychle k ustálení těchto napětí na hodnotě napětí fází vůči zemi ve stavu bez poruchy. I v tomto případě se napětí první fáze zvyšuje z téměř nulové hodnoty spolu se zvyšováním odporu poruchy.

7 Závěr

V této práci jsem se zaměřil na způsoby uzemnění uzlu sítě. V první části jsem popsal jednotlivé způsoby uzemnění uzlu sítě. Věnoval jsem se zde napěťovým a proudovým poměrům při použití různých způsobů uzemnění a vlivu těchto poměrů na volbu způsobu uzemnění. U každého způsobu uzemnění uzlu sítě je uvedeno, pro jaké sítě se daný způsob používá v České republice, jaká impedance se v daném případě vyskytuje mezi uzlem sítě a zemí, uvedeny jsou napěťové a proudové poměry při poruše a také výhody a nevýhody daného způsobu uzemnění uzlu sítě. Součástí je také srovnání těchto jednotlivých způsobů. V této části také popisuji funkci zhášecí tlumivky, která je v naší elektrizační soustavě používána pro uzemnění značné části sítí vysokého napětí.

V následující části jsem se zabýval způsoby vyhodnocování zemních poruch v elektrických sítích při různých způsobech uzemnění jejich uzlu. Popisuji zde, podle jakých veličin rozpoznávají ochrany, při daném způsobu uzemnění uzlu sítě, zda došlo v síti k poruše. K tomuto popisu připojuji také základní odvození metody souměrných složek. Uvádím zde také výčet základních ochranných elektrických sítí, včetně popisu jejich funkce. Součástí tohoto výčtu je příklad dělení ochranných požadavky kladené na ochrany a popis funkcí základních členů ochranných. S tímto tématem souvisí také metody detekce zemní poruchy. Pokud nastane v síti porucha, je kromě jejího rozpoznání nutná také její lokalizace. V této části mé práce se zaměřuji na popis metod, které je možné použít k lokalizaci poruchy, v závislosti na způsobu uzemnění uzlu sítě, ve které porucha nastala.

V praktické části mé práce se zaměřuji na doložení informací z teoretické části mé práce na modelovém případu. Jako modelový případ bylo zadáno smíšené vedení vysokého napětí. Můj výpočet měl dvě hlavní části. První část byl výpočet vlivu nesymetrie, ve kterém jsem zjišťoval, jaký vliv má nesymetrie příčných impedancí jednotlivých fází na napětí jednotlivých fází vůči zemi a na napětí mezi uzlem sítě a zemí. Tento výpočet jsem provedl pro všechny způsoby uzemnění uzlu sítě, které jsem zmínil v teoretické části mé práce. Druhou část tvořil výpočet vlivu odporu poruchy. Zde jsem zjišťoval, jaký vliv má odpor poruchy na napětí jednotlivých fází vůči zemi a na napětí mezi uzlem sítě a zemí. I tento výpočet jsem provedl pro všechny zmíněné způsoby uzemnění. Poslední část mé práce tedy obsahuje srovnání jednotlivých způsobů uzemnění uzlu sítě z hlediska vlivu nesymetrie příčných impedancí jednotlivých fází vůči zemi a z hlediska vlivu odporu poruchy na napětí v síti.

Při výpočtu vlivu nesymetrie docházelo u všech způsobů uzemnění během rostoucí nesymetrie ke zvyšování napětí mezi uzlem sítě a zemí. Nesymetrie měla vliv také na napětí jednotlivých fází vůči zemi. U všech způsobů uzemnění uzlu sítě docházelo během růstu nesymetrie ke zvětšování rozdílů mezi velikostmi napětí jednotlivých fází vůči zemi. U sítě uzemněné přes zhašecí tlumivku však tyto hodnoty závisí také na vyladění tlumivky. Při dané konfiguraci sítě bude napětí mezi uzlem sítě a zemí maximální při vyladěné tlumivce, tedy během paralelní rezonance tlumivky s příčnými kapacitami sítě. Pokud bude tlumivka rozladěna, napětí mezi uzlem sítě a zemí bude dosahovat nižších hodnot. Během rezonance nastávají také největší rozdíly mezi napětími jednotlivých fází vůči zemi. Při uzemnění přes zhašecí tlumivku tedy rozdíly mezi velikostmi napětí jednotlivých fází vůči zemi a velikost napětí mezi uzlem sítě a zemí závisí nejen na nesymetrii sítě, ale také na vyladění tlumivky. U sítě uzemněné přes uzlový odporník závisí tato napětí kromě nesymetrie také na jmenovitém proudu použitého odporníku.

Během výpočtu vlivu odporu poruchy nastával u všech způsobů uzemnění při zvětšování odporu poruchy pokles napětí mezi uzlem sítě a zemí. Napětí postižené fáze vůči zemi mělo u všech typů uzemnění téměř nulovou hodnotu, pokud se odpor poruchy blížil nule. Zároveň zde pro všechny způsoby uzemnění docházelo během zvyšování odporu poruchy k růstu napětí postižené fáze vůči zemi. Strmost poklesu napětí mezi uzlem sítě a zemí a strmost nárůstu napětí postižené fáze vůči zemi se však u jednotlivých způsobů uzemnění lišila. Velikost napětí nepostižených fází vůči zemi měla vždy nejvyšší odchylku od své jmenovité hodnoty při odporu poruchy blížícím se k nule. Při postupném zvyšování odporu poruchy docházelo ke snižování této odchylky.

Tyto podstatné informace jsem shrnul a porovnal jsem jednotlivé způsoby provozu uzlu sítě. Tyto informace mohou sloužit k ucelenému náhledu na problematiku provozu elektrických sítí z hlediska způsobu uzemnění jejich uzlu.

Použitá literatura

- [1] TESAŘOVÁ, Miloslava, ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-703-3.
- [2] MERTLOVÁ, Jiřina, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla, TAJTL, Tomáš. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-307-2.
- [3] SCHEJBAL, Konstantin, MERTLOVÁ, Jiřina. *Elektroenergetika II*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1998. ISBN 80-7082-451-4.
- [4] MERTLOVÁ, Jiřina, NOHÁČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [5] ŠTROBLOVÁ, Milada, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. *Elektrické sítě městské a průmyslové*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1994. ISBN 80-7082-154-X.
- [6] MÜHLBACHER, Jan. *Metody řešení přechodných jevů v elektrizačních soustavách I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1993. ISBN 80-7082-087-X.
- [7] TOMAN, Petr, DRÁPELA, Jiří, MIŠÁK, Stanislav, ORSÁGOVÁ, Jaroslava, PAAR, Martin, TOPOLÁNEK, David, a kol. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [8] SOUŠEK, Vlastimil. *Způsob provedení uzemnění uzlu distribučních sítí*. Plzeň, 2010. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Lucie NOHÁČOVÁ.
- [9] RATAJ, Martin. *Elektrické ochrany v elektrizační soustavě ČR*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jan BÍNA.
- [10] VOZKA, Aleš. *Zemní ochrany v distribuční síti*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Lucie NOHÁČOVÁ.
- [11] PERCINA, Drahomír. *Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení*. Brno, 2011. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Petr TOMAN.
- [12] ŽÁK, František. *Energetický regulační úřad. Ústní konzultace*. Praha, 2020.