



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nulový bod elektrických sítí - koncepce a konstrukční provedení

Autor práce: Radek Jana

Vedoucí práce: Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2012/2013**

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

Jméno a příjmení: **Radek JANA**
Osobní číslo: **E10B0024K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Nulový bod elektrických sítí - koncepce a konstrukční provedení**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Bakalářská práce Nulový bod elektrických sítí - koncepce a konstrukční provedení bude zaměřena na tyto body:

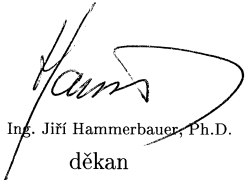
1. Popište provoz sítí s izolovaným uzlem.
2. Uveďte charakteristické vlastnosti sítí s odporově uzemněným uzlem sítě.
3. Uveďte, jakým způsobem se provádí kompenzace zemních kapacitních proudů.
4. Zkuste doložit tyto informace na vybraném konkrétním případě.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

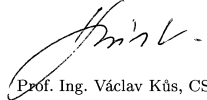
- 1. Skripta Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie.**
- 2. Internetové podklady.**
- 3. Další podklady dodá a určí konzultant.**

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato práce se zabývá možnostmi provozu uzlu transformátoru a vlivu, jaký má zapojení na příčné nesymetrické poruchy v distribuční soustavě.

Jedná se převážně o jednofázové zemní spojení a zemní zkrat. Cílem práce je nejprve zhodnotit jaké možnosti zapojení uzlu jsou a popsat chování při poruchách. Pro každý způsob provozu uzlu je namodelován obvod v programu LTspice a vyhodnocen grafy časových průběhů napětí a proudů. V poslední části je konkrétní síť vn a její zhodnocení z hlediska příčných poruch v závislosti na provozu uzlu transformátoru.

Klíčová slova

elektrické sítě, nulový bod, uzel transformátoru, zemní kapacitní proud, LTspice, zemní zkrat, zemní spojení

Abstract

Jana, Radek. *Electrical network zero point - concept and design* [*Nulový bod elektrických sítí - koncepce a konstrukční provedení*]. Pilsen, 2013. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Lucie Noháčová

This work deals with the possibilities of operation of node to ground the transformer and the effects of the involvement of the transverse unbalanced fault in the distribution system. It is a single-phase ground short-circuit and ground fault. The goal is to first assess what options are node connection and describe the behavior disorders. For each mode of operation node is modeled circuit in LTSpice program and time graph evaluation of voltage and current. The last part is a specific network of high-voltage and it is evaluation in terms of transverse faults depending on the operation of the transformer.

Keywords

electrical network, ground capacitive current, node of transformer, zero point, LTspice, short-circuit, ground fault

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 5. června 2013

Radek Jana

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratk	ix
1 Úvod	1
2 Elektrizací soustava	2
2.1 Parametry vedení	4
2.1.1 Venkovní vedení	5
2.1.2 Vnitřní vedení	5
2.1.3 Kabelová vedení	6
3 Poruchy v ES	8
3.1 Zkrat a zemní spojení	8
3.2 Metoda složkových soustav	10
3.3 Vyhodnocování zemních poruch	12
4 Sítě s přímo uzemněným uzlem transformátoru	13
5 Sítě s izolovaným uzlem transformátoru	15
5.1 Poruchy v izolované síti	16
5.1.1 Kovové zemní spojení	16
5.1.2 Odporové zemní spojení	16
6 Sítě s odporově uzemněným uzlem	19
6.1 Poruchy v neúčinně uzemněné síti	20
6.1.1 Kovové zemní spojení	20
6.1.2 Odporové zemní spojení	20
7 Sítě s kompenzovaným uzlem transformátoru	23
7.1 Poruchy v kompenzované síti	24
7.1.1 Kovové zemní spojení	24

7.1.2	Odporové zemní spojení	26
8	Rozvodná síť vn	27
8.1	Parametry pro výpočet	27
8.2	Účinně uzemněný uzel transformátoru	27
8.3	Neúčinně uzemněný uzel transformátoru	28
8.3.1	Neúčinně uzemněný uzel	29
8.3.2	Kompenzace zhašecí tlumivkou	29
8.4	Zhodnocení výsledků	30
9	Závěr	32
	Reference, použitá literatura	34
	Přílohy	36
A	Parametry programu LTspice	36

Seznam obrázků

2.1	Schéma ES [1]	2
2.2	Přenosová soustava ČR Převzato z [3] 	3
2.3	Průřez AlFe lanem Převzato z [7] 	5
2.4	Schéma zapouzdřeného vodiče	5
2.5	Kabel vn s hliníkovým jádrem Převzato z [9] 	6
3.1	Zkratky v ES [13]	9
3.2	Rozložení nesymetrické hvězdice fázorů na symetrické složky	10
3.3	Náhradní schéma pro složkovou soustavu	11
4.1	Časové průběhy fázových poruchových proudů při kovovém spojení se zemí ve fázi U_a	14
5.1	Jednofázové zemní spojení v izolované síti Převzato z [5] 	15
5.2	Časové průběhy fázových napětí v izolované síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s	17
5.3	Časové průběhy fázových proudů v nezatížené izolované síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s	17
5.4	Časové průběhy poruchových proudů a napětí při odporovém zemním spojení v izolované síti	18
6.1	Jednofázové zemní spojení v odporově uzemněné síti Převzato s úpravami z [5] 	19
6.2	Časové průběhy fázových proudů v nezatížené neúčinně uzemněné síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s	21
6.3	Časové průběhy fázových napětí v nezatížené neúčinně uzemněné síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s	21
6.4	Časové průběhy poruchových proudů a napětí při odporovém zemním spojení v neúčinně uzemněné síti	22
7.1	Jednofázové zemní spojení v kompenzované síti Převzato z [5] 	23
7.2	Časové průběhy fázových proudů v nezatížené kompenzované síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s	25
7.3	Časové průběhy fázových napětí v nezatížené kompenzované síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s	25

7.4	Časové průběhy poruchových proudů a napětí při odporovém zemním spojení v kompenzované síti	26
8.1	Okružní síť vn Převzato z [14] 	28
8.2	Náhradní schéma účinně uzemněné sítě	28
8.3	Náhradní schéma odporově uzemněné sítě	29
8.4	Náhradní schéma kompenzované sítě	29
8.5	Časové průběhy poruchového proudu pro účinně uzemněnou I_A , odporově uzemněnou I_B a kompenzovanou síť I_C	31
A.1	Náhradní schéma izolované sítě v programu LTspice	36
A.2	Náhradní schéma neúčinně sítě soustavy v programu LTspice	37
A.3	Náhradní schéma kompenzované sítě v programu LTspice	37

Seznam tabulek

2.1	Jmenovité hodnoty napětí ES v ČR [4]	3
2.2	Vybrané parametry kabelů vn [9]	7
5.1	Vstupní parametry pro simulaci izolované soustavy	16
6.1	Vstupní parametry pro simulaci neúčinně uzemněné soustavy	20
7.1	Vstupní parametry pro simulaci neúčinně uzemněné soustavy	24
8.1	Vlastnosti kabelu 22-AXEKVCVE [9]	27
8.2	Shrnutí vypočtených hodnot při poruše pro jednotlivé zapojení uzlů	31

Seznam symbolů a zkratek

ES	Elektrizační soustava
nn	Nízké napětí
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
zvn	Zvláště vysoké napětí
UCTE	Union for the coordination of transmission of electricity. Unie pro koordinaci přenosu elektřiny.
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
\bar{I}	Fázor proudu [A].
I_{kap}	Kapacitní proud [A].
I_L	Proud zhašecí tlumivkou [A].
I_a	Proud fáze A [A].
I_b	Proud fáze B [A].
I_c	Proud fáze C [A].
I_{por}	Poruchový proud [A].
\bar{U}	Fázor napětí [V].
U_f	Fázové napětí [V].
U_a	Napětí fáze A [V].
U_b	Napětí fáze B [V].
U_c	Napětí fáze C [V].
U_N	Napětí uzlu N vůči zemi [V].
U_1	Sousledná složka souměrné složkové soustavy [V].
U_2	Zpětná složka souměrné složkové soustavy [V].
U_0	Netočivá složka souměrné složkové soustavy, někdy také napětí uzlu transformátoru vůči zemi (vyplyne z textu) [V].
X	Reaktance (imaginární část impedance) [Ω].
X_N	Reaktance uzlu transformátoru [Ω].
C	Kapacita [F].
L	Indukčnost [H].
R	Rezistance (reálná část impedance) [Ω].
R_{por}	Přechodová rezistance poruchy [Ω].
R_N	Odpor uzlu transformátoru [Ω].

Z	Impedance $[\Omega]$.
Z_N	Impedance uzlu transformátoru $[\Omega]$.
G	Svod $\left[\frac{S}{km}\right]$.
B	Susceptance (imaginární část admitance) $\left[\frac{S}{km}\right]$.
S	Zdánlivý výkon $[VA]$.

1

Úvod

Ve své práci se zabývám nulovým bodem transformátoru, tedy možnostmi zapojení jeho uzlu ve vztahu k zemi. Tato problematika je důležitá z pohledu provozování elektrizační soustavy. Každá síť má jiné parametry a je pro ni vhodný jiný způsob provozu. Zapojení uzlu transformátoru zásadním způsobem ovlivňuje chování sítě při poruchových stavech. Jedná se převážně o příčné nesymetrické poruchy, tedy zemní zkrat v uzemněné soustavě a zemní spojení v ostatních typech sítí.

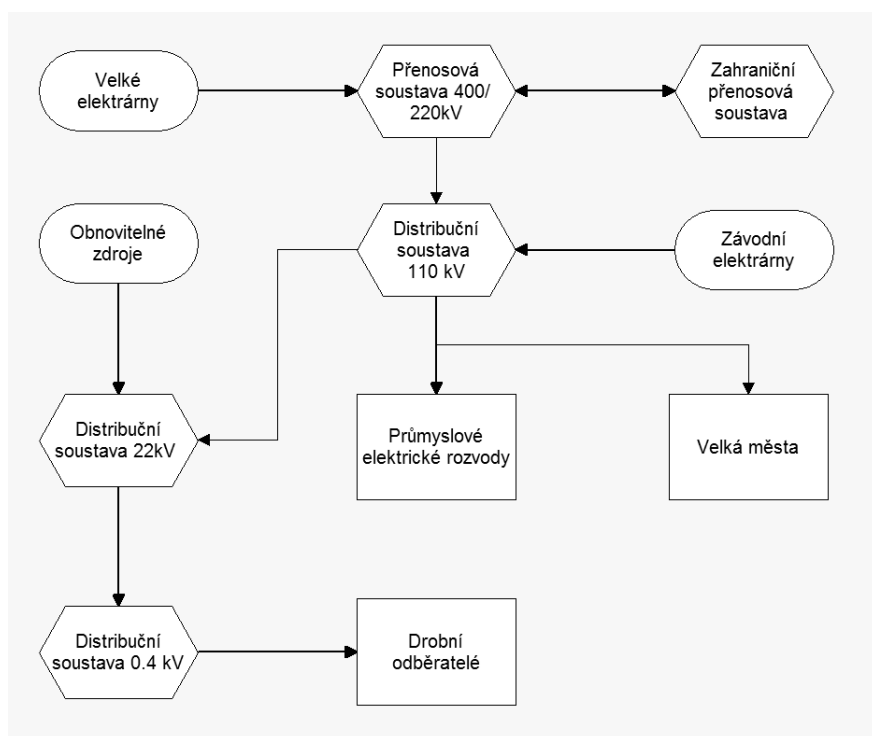
V první kapitole jsem nastínil co je to elektrizační soustava z pohledu distribuční a přenosové soustavy. Uvedl základní vlastnosti vedení, které přímo ovlivňují chování při poruše. V druhé kapitole se zabývám jaké poruchy se mohou v elektrizační soustavě objevit, možnostmi jejich řešení a indikace. V další části se zabývám jednotlivými druhy zapojení uzlu transformátoru a jeho vlastnostmi. Pro porovnání jednotlivých provedení jsem používal dostupnou literaturu a freeware program LTspice. V LTspice jsem vytvořil model pro každý typ provedení sítě a v práci demonstruji výsledné grafy zobrazující průběhy poruchových proudů a napětí. Poruchové stavy jsem volil jednofázová zemní spojení a jednofázové zkraty. Přechodový odpor poruchy jsem nastavil v hodnotách pro kovové a odporové spojení zvlášť.

V poslední kapitole se zabývám porovnáním jednotlivých způsobů provozu uzlu na konkrétní síti a porovnávám dosažené výsledky. Zde jsem pro výpočty poruchových stavů použil zjednodušené schéma pro každou síť. Výsledek jsem shrnul do jednoho grafu simulovaném v programu LTspice.

2

Elektrizační soustava

Elektrizační soustava je soubor prvků, které zajišťují výrobu, transformaci, přenos a rozložení elektrické energie mezi odběratel. Z hlediska mé práce je nejdůležitější efektivní přenos elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby, což ovlivňuje chování při poruchách. Základní funkce a rozdělení ES je uvedeno na schématickém obrázku 2.1.

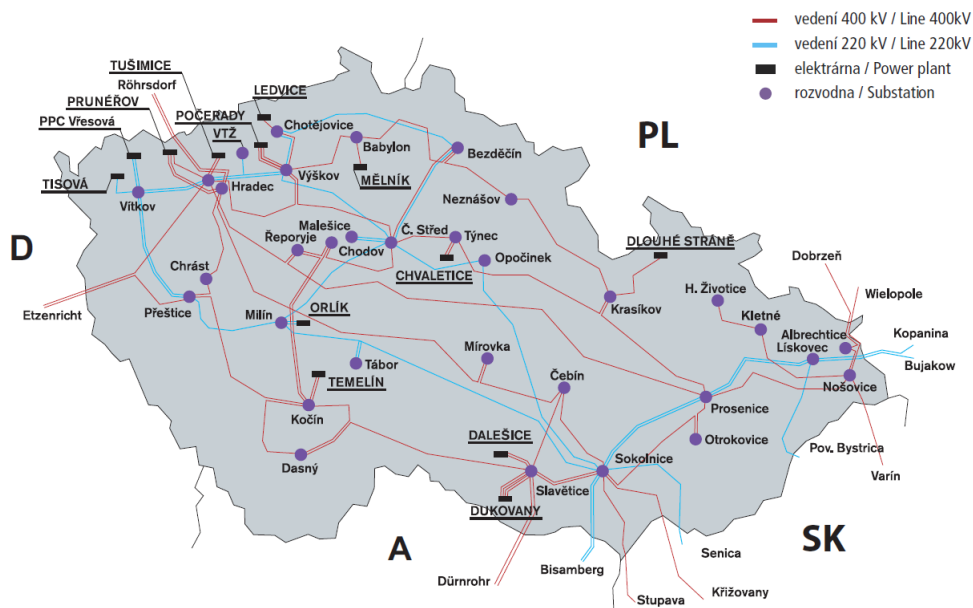


Obr. 2.1: Schéma ES [1]

Nadřazená soustava, jinak také přenosová je řešena okružním způsobem a je do ní přiváděna energie z velkých elektráren, slouží k přenosu největších výkonů a je propojena se zahraničními elektrizačními soustavami. V České republice má většina vedení přenosové soustavy napětí 400 kV, výjimečně 220 kV. Elektrizační soustavu v České republice spravuje firma ČEPS. Naše přenosová soustava je propojena s evropskou sítí UCTE [2]. Schéma přenosové soustavy je na obrázku 2.2. Do přenosové soustavy je připojena

Schéma sítě 400 a 220 kV

400 and 220kV transmission network of Czech power system



Obr. 2.2: Přenosová soustava ČR [Převzato z [3]]

distribuční (rozvodná) síť 110 kV, ta slouží k napájení větších odběrných míst, je řešena převážně paprskově. Jsou do ní připojeny i zdroje menších výkonů, které se v současnosti nazývají distribuované a patří mezi ně průmyslové elektrárny a obnovitelné zdroje vyšších výkonů využívající energii vody, větru, biomasy a slunce. Dále patří do distribuční sítě vn a nn sítě transformující napětí na nižší hodnoty podle potřeb odběratelů až na nn 0.4 kV napájející domácnosti. Tabulka 2.1 ukazuje jmenovité hodnoty napětí elektrizační soustavy u nás, uvádí se efektivní hodnota sdruženého napětí mezi fázemi. Dovolené odchylky od jmenovitého napětí jsou obvykle 5 %, u sítě 110 a 220 kV to může být i 10 %. [1] Elektrizační soustavu v České republice spravuje je firma ČEPS. [3]

Nízké napětí	(nn)	[kV]	0.4/0.23	0.5	0.69		
Vysoké napětí	(vn)	[kV]	3	6	10	22	35
Velmi vysoké napětí	(vvn)	[kV]	110		220		
Zvláště vysoké napětí	(zvn)	[kV]	400				

Tab. 2.1: Jmenovité hodnoty napětí ES v ČR [4]

Důležitým prvkem elektrizační soustavy je transformátor měnící napětí mezi sítěmi. Zapojení se označuje na primární straně velkým písmenem, na sekundární malým písmenem. Sekundární vinutí transformátoru je nejčastěji zapojeno do hvězdy Y, y, při nesoúměrných odběrech do výkonu 315 kVA do lomené hvězdy Z, z. Zapojení do lomené hvězdy je finančně náročnější při výrobě a provozní ztráty jsou o 10–15 % vyšší než u zapojení Yy. Zapojení sekundárního vinutí do trojúhelníka D, d, se používá jako blokový

transformátor. Distribuční transformátory mívají přepínač odboček k řízení výstupního napětí. [2] U transformátorů zapojených do hvězdy je způsob propojení uzlu se zemí rozhodující pro charakter a průběh zemních poruch vedení. Zapojení uzlu ovlivňuje velikosti výsledných poruchových proudů při spojení jedné, případně více fází se zemí, zejména při jednofázových poruchách. Zapojení má také vliv na velikosti napětí při poruchách mezi fázovým vodičem a zemí, to je důležité pro dimenzování izolace vodičů. Podle zapojení nulového bodu transformátoru rozlišujeme sítě:

- a) Izolované
- b) Kompenzované
- c) Účinně uzemněné
- d) Neúčinně uzemněné

Těmito sítěmi se ve své práci budu zabývat podrobněji. [5]

2.1 Parametry vedení

Abych se mohl zabývat výhodami a nevýhodami jednotlivých provedení uzlu transformátoru, je třeba respektovat vlastnosti vedení ke kterému je transformátor připojen. Odpor vedení lze pro výpočty poruchových stavů v soustavách vvn zcela zanedbat. Proudů při zemních spojeních dosahují přibližně jmenovitých hodnot, oproti mezifázovým poruchám dosahujícím i stonásobků jmenovitých hodnot. Odpor vedení je podstatný spíše pro ztráty ve vedení. Kapacita je pro zkratové proudy v uzemněných soustavách zanedbatelná, pro izolované a neúčinně uzemněné soustavy je tento parametr významnější. [4, 6] Základní parametry vedení potřebné pro výpočty poruchových stavů jsou:

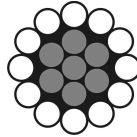
- R rezistance [Ω/km]
- X induktivní reaktance [Ω/km]
- B kapacitní susceptance [S/km]
- G svod [S/km]

[5]

Pro nastavení programu LTspice jsem bral v úvahu indukčnost zdroje, svod G, rezistanci a kapacitní susceptanci, která je dána kapacitou vedení. Indukčnost zdroje je v náhradním obvodu nezbytná z důvodu zamezení skokových změn proudů při spojení se zemí. Pro sítě kompenzované ještě indukčnost tlumivky a pro sítě neúčinně uzemněné odpor vývodu nulového bodu transformátoru. Ohmické odpory vedení jsem nemohl plně zanedbat, jinak by přechodový děj byl příliš dlouhý z důvodu rezonance indukčnosti a kapacity vedení. V reálné síti jsou přechodové děje rychle utlumené, zvláště v sítích vvn a nn. [6]

2.1.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení se používá v naprosté většině pro sítě zvn, vvn a vn, pokud vedou volnou krajinou. Jen výjimečně se budují pro sítě vn a nn ve městech. Konstrukčně jsou řešena z holých vodičů, převážně AlFe lan, která mají ocelové jádro a hliníkový obal jak ukazuje obrázek 2.3, zavěšených na stožárech. Investiční náklady těchto vedení jsou

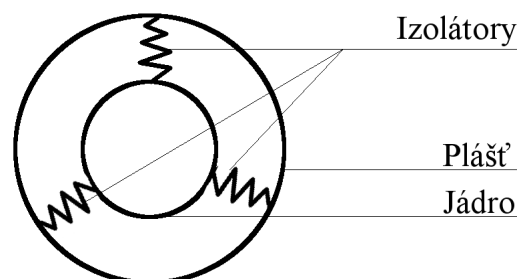


Obr. 2.3: Průřez AlFe lanem [Převzato z [7]]

menší, mají větší indukčnost a menší kapacitu, než kabely. Oproti kabelům mají větší úbytek napětí pro stejný průřez a délku vedení. Tato vedení jsou poruchovější, často se jedná o zemní spojení přechodného charakteru (větve, ptáci, úder blesku), poruchy se snáze vyhledávají. [1, 2]

2.1.2 Vnitřní vedení

Jako vnitřní vedení se používají holé vodiče z Al a Cu s různými profily. Často jsou obdélníkového průřezu, ale mohou být i trubkové. Toto vedení se instaluje např. v rozvodnách, je vhodné pro krátké vzdálenosti s velkými přenášenými výkony a zkratovými proudy. Vodiče jsou umístěny na izolátorech a je důležité dostatečně dimenzovat jejich mechanickou pevnost pro velké elektrodynamické síly při zkratových odporech. Další možností vnitřního vedení jsou zapouzdřené vodiče. Skládají se z jádra a obalu, přičemž oba materiály musí mít stejnou vodivost, z důvodu indukce do pláště a minimálního vyzařování magnetického pole vně pláště. Vnitřní výplň mezi pláštěm a jádrem může být vzduch, případně elektro-negativní plyn SF_6 . Instalují se například v elektrárnách, jako spojení mezi generátorem a blokovým transformátorem. Uspořádání zapouzdřeného vodiče ukazuje obrázek 2.4. [10]



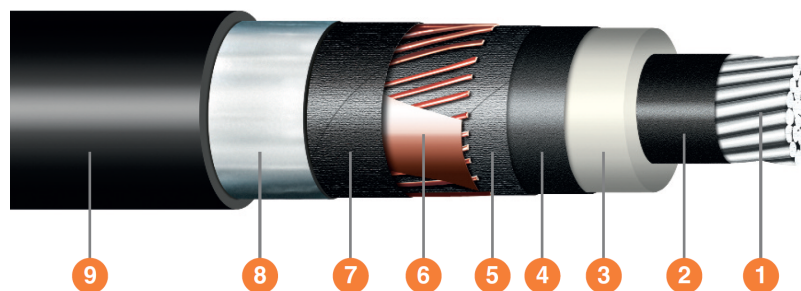
Obr. 2.4: Schéma zapouzdřeného vodiče

2.1.3 Kabelová vedení

Kabelová vedení mají vodivé jádro z mědi či hliníku, izolaci z gumy, PVC, nebo mohou být pancéřované. Dominují v městských a průmyslových sítích vn a nn, do velkých měst se používají kabely 110 kV. Trend zvyšující se spotřeby elektrické energie v centrech měst klade stále vyšší nároky na přenášené výkony a tím na zvyšování přenášeného napětí. [2] V ČR je například kabel 400 kV v PVE Dlouhé stráně, oceňovaná jako nejkologičtější stavba v Evropě. [8] Kabely mohou být jednožilové, nebo vícežilové. Izolace bývá obvykle vícevrstvá a tvoří ji například napuštěný papír, pryž, polyetylén (může být zesítěný), měkčené PVC. Plášť a stínění je tvořeno z hliníku, polyetylénu, olova, PVC. U kabelů pro vn a výše bývá obal vodivého jádra (někdy také duše) tvořen větším počtem vrstev. Oproti venkovnímu vedení mají opačné výhody a nevýhody. Kapacita je až 30x větší než u venkovních vedení. Poruchy jsou méně časté, ale obvykle trvalé. [1, 2]

Provedení vícevrstvého kabelu vn znázorňuje obrázek 2.5. Jednotlivé vrstvy jsou:

- 1 - Hliníkové jádro
- 2 - Vnitřní polovodivá vrstva
- 3 - Izolace ze zesítěného polyetylénu
- 4 - Vnější polovodivá vrstva
- 5 - Polovodivá vodoblokující páska
- 6 - Stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky
- 7 - Vodoblokující páska
- 8 - Al folie
- 9 - Vnější PE plášť



Obr. 2.5: Kabel vn s hliníkovým jádrem |Převzato z [9]|

Tento kabel je vhodný pro volné ukládání ve vzduchu, do země či do trubek z nemagnetického materiálu. Odolává vodě stříkající všemi směry i přechodnému zaplavení. [9]

Vybrané parametry kabelů, které jsou podstatné pro vyhodnocení provozu uzlu transformátory a nabízejí je firmy v České republice ukazuje tabulka 2.2. U jednožilových kabelů ovlivňuje indukčnost jsou-li instalovány v kabelovém kanálu, leží-li na látce vedle sebe, případně jsou vůči sobě do tvaru trojúhelníka. Indukčnost také ovlivňuje vzájemná vzdálenost žil. V tabulce 2.2 jsou pro jednožilové kabely uvedeny hodnoty pro umístění do trojúhelníku. [9]

Jmenovité napětí [kV]	Počet x průřez žil [mm ²]	Činný odpor při 20°C [Ω/km]	Činný odpor při 20°C [μF/km]	Indukčnost na vzduchu [mH/km]
6	3x50	0.387	0.18	0.24
6	1x300	0.060	0.78	0.27
22	1x300	0.100	0.32	0.33
35	1x300	0.100	0.24	0.36

Tab. 2.2: Vybrané parametry kabelů vn [9]

3

Poruchy v ES

Pro hodnocení jak provozovat uzel transformátoru je důležité, jak se bude chovat při poruchových stavech. Ty se obvykle rozdělují do skupin, podle toho kde vznikají. Jsou to poruchy vedení, transformátorů, elektrického rozvodného zařízení, případně společných zařízení. Poruchy mohou způsobovat problémy nadměrnými proudy, oteplení vodičů, ztráty, prodloužení vodičů a následný kontakt se zemí. Přepětím, které může vést k průrazu izolace a stupňování poruchy. [2] Poruchy přenosové soustavy mohou ovlivnit celou přenosovou soustavu Evropy, jako se stalo v roce 2003 v Itálii. Nadměrné zatížení přehřálo vedení vvn, které se prodloužilo, došlo ke kontaktu s vrcholky stromů a následnému výpadku celé elektrizační soustavy v Itálii. [11]

Pro mou práci přichází v úvahu poruchy na vedení, způsobené převážně nepříznivými přírodními vlivy. Jedná se atmosférické vlivy, např. námraza, silný vítr způsobující přetržení vedení, nebo častěji vegetace která může přijít do kontaktu s vedením. Tyto vlivy mohou způsobit zkrat, případně zemní spojení, rozdíl mezi těmito poruchami určuje způsob zapojení uzlu transformátoru. V kompenzovaných, izolovaných a odporově uzemněných sítích se jedná o zemní spojení a v sítích účinně uzemněným uzlem se jedná o zemní zkrat. [6] U neúčinně uzemněného uzlu transformátoru se rozdělení v literatuře liší, někdy se uvádí jednofázová zemní porucha jako zkrat, jindy jako zemní spojení. Já ve své práci používám zemní spojení.

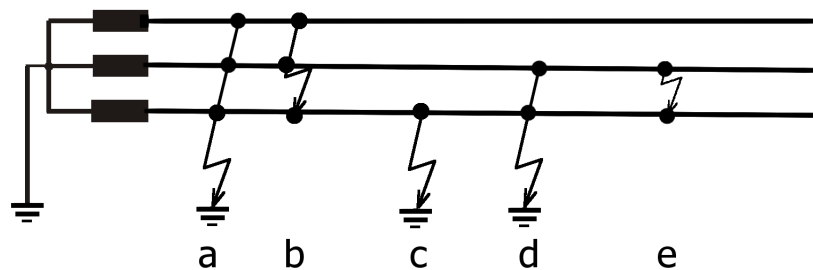
3.1 Zkrat a zemní spojení

Zkraty mohou být blízké, nebo vzdálené. Podmínkou pro vzdálené zkraty je, aby impedance transformátoru byla větší než dvojnásobek impedance soustavy přepočtené k místu zkratu. Blízký zkrat má příspěvek k počátečnímu rázovému zkratovému proudu alespoň dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, případně je příspěvek motorů větší o 5% než rázový zkratový proud dotčených motorů. Rázový zkratový proud je efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu. Nárazový zkratový proud je maximální hodnota stejnosměrné a střídavé složky zkratu. U blízkých zkratů je třeba více uvažovat přechodové děje alternátoru. [1, 4, 12]

Rozdíl vzdáleného či blízkého zkratu je patrný i v době přechodného děje. Blízký zkrat má významnou stejnosměrnou složku a přechodový děj se ustálí na mnohem menší hodnotě, než je rázový zkrat oproti vzdálenému zkratu.

Typy zkratů ukazuje obrázek 3.1, jedná se o:

- a) Trojfázový zkrat souměrný úplný
- b) Trojfázový zkrat souměrný
- c) Jednofázový zkrat (Pouze účinně uzemněné soustavy)
- d) Dvoufázový zemní zkrat (Pouze účinně uzemněné soustavy)
- e) Dvoufázový zkrat



Obr. 3.1: Zkraty v ES [13]

Poměrný výskyt jednotlivých zkratů v elektrizační soustavě je (a, b) 1%, (c) 90%, (d) 7% a (e) 2%. [13] Zkraty souměrné se projevují ve všech fázích stejně a jsou obvykle třífázové. Zkraty nesouměrné se projevují v jednotlivých fázích rozdílně a mohou být jednofázové či dvoufázové, pro jejich řešení je nutné uvažovat souslednou, zpětnou i netočivou složku složkové soustavy, viz kapitola 3.2. Zemní spojení rozlišujeme také podle:

- doby trvání
 - mžiková (do 0.5 s)
 - krátkodobá (do 5 minut)
 - přerušovaná (mnohdy obtížně vyhledatelná mžiková porucha)
 - trvalá
- velikosti přechodového odporu v místě poruchy
 - kovová (0Ω)
 - oblouková (10–100 Ω)
 - odporová (100–1000 Ω)

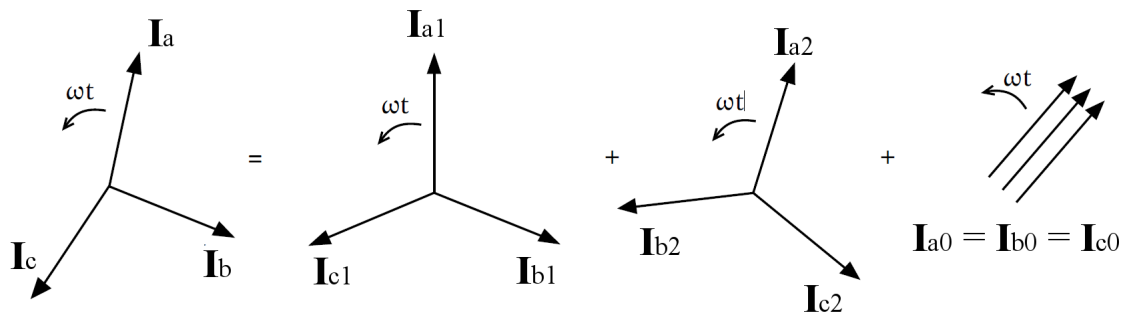
Velikost přechodového odporu má přímý vliv na přechodový děj a poruchové proudy. [1]

3.2 Metoda složkových soustav

Pro výpočty nesymetrických poruchových stavů lze použít metoda složkových soustav a rozložení do matice \mathbf{F} dle tvůrce Fortescue. Metoda funguje na principu symetrizace parametrů, kdy se jednotlivé fáze rozloží do tří symetrických soustav:

- sousledná - značí se indexem 1
- zpětná - značí se indexem 2
- netočivá - značí se indexem 0

Princip rozložení nesouměrné hvězdice proudů na tři symetrické soustavy ukazuje obrázek 3.2. Jednotlivé rovnice pro rozklad fázorů znázorňují vztahy 3.1.



Obr. 3.2: Rozložení nesymetrické hvězdice fázorů na symetrické složky

$$\begin{aligned}\bar{I}_a &= \bar{I}_{a1} + \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{a0} \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_{b1} + \bar{I}_{b2} + \bar{I}_{b0}\end{aligned}\quad (3.1)$$

$$\bar{I}_c = \bar{I}_{c1} + \bar{I}_{c2} + \bar{I}_{c0}$$

Pokud si zvolíme fázi a jako referenční, můžeme soustavu rovnic přepsat do tvaru 3.2.

$$\begin{aligned}\bar{I}_a &= \bar{I}_{a1} + \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{a0} \\ \bar{I}_b &= \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{I}_0\end{aligned}\quad (3.2)$$

$$\bar{I}_c = \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{I}_0$$

Kde fázor \bar{a} určuje pootočení fáze, je definován vztahem 3.3 a 3.4.

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

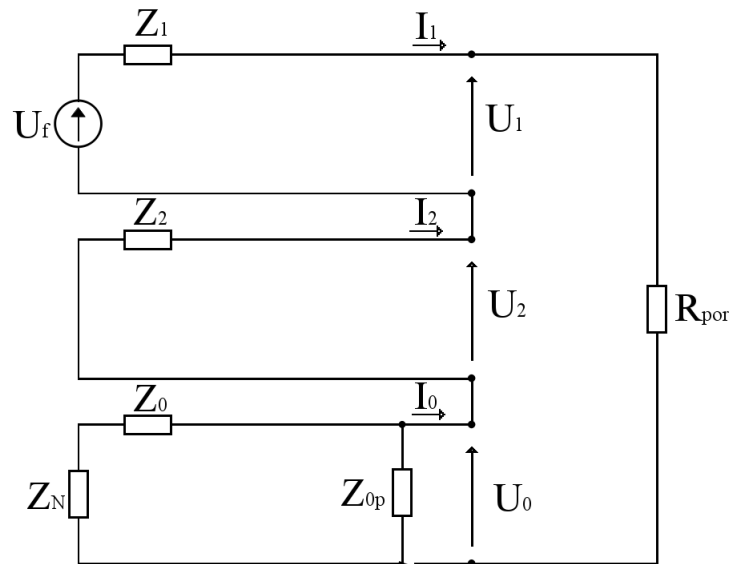
$$\bar{a}^2 = e^{j240^\circ} = e^{j-120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.4)$$

Dle výše uvedeného a zdroje [13], lze složkové proudy převést do maticového tvaru 3.5.

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{I} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Z rovnice 3.5 lze odvodit vztah 3.6, na jehož základě lze propojit náhradní složkové schéma které znázorňuje obrázek 3.3.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{1}{3}\bar{I}_a \quad (3.6)$$



Obr. 3.3: Náhradní schéma pro složkovou soustavu

Jednotlivé prvky v náhradním schématu mají následující význam:

- Z_1 impedance sousledné složky
- Z_2 impedance zpětné složky
- Z_0 příčná impedance vedení pro netočivou složku
- Z_{0p} podélná impedance vedení pro netočivou složku
- Z_N impedance uzlu transformátoru
- R_{por} odpor poruchy

Pro impedance sousledné a zpětné složky obvykle platí $Z_1 = Z_2$ a určují je parametry transformátoru a vedení. Parametry pro nulovou složku se obvykle měří přímo na vedení, případně se udávají 3x větší než Z_1 a Z_2 . Prvek Z_{0p} je definován kapacitou vedení svodem G. Prvek Z_N určuje impedanci uzlu transformátoru, pro izolovanou soustavu je jeho velikost $Z_N = \infty$, pro účinně uzemněnou soustavu $Z_N = 0$ a pro kompenzovanou určuje Z_N velikost indukčnosti, případně odporu. Odpor poruchy R_{por} má velikost definovanou v kapitole 3.1.[4, 13]

3.3 Vyhodnocování zemních poruch

U sítí s malým rozsahem, které lze provozovat s poruchou, stačí obvykle pouze informace o zemním spojení. U sítí které nejsou dimenzované na provoz s poruchou je správné a včasné vyhodnocení poruchy nezbytné pro jejich bezproblémový chod. Pro vyhodnocení poruch v sítích vn je důležité napětí uzlu U_N , pokud překročí hodnotu 33% z U_f je porucha vyhodnocena jako zemní spojení. Ke zjištění U_N se používá pomocné vinutí transformátorů napětí spojených do otevřeného trojúhelníka a musí platit 3.7. [14]

$$\overline{U}_o = \frac{\overline{U}_1 + \overline{U}_2 + \overline{U}_3}{3} \quad (3.7)$$

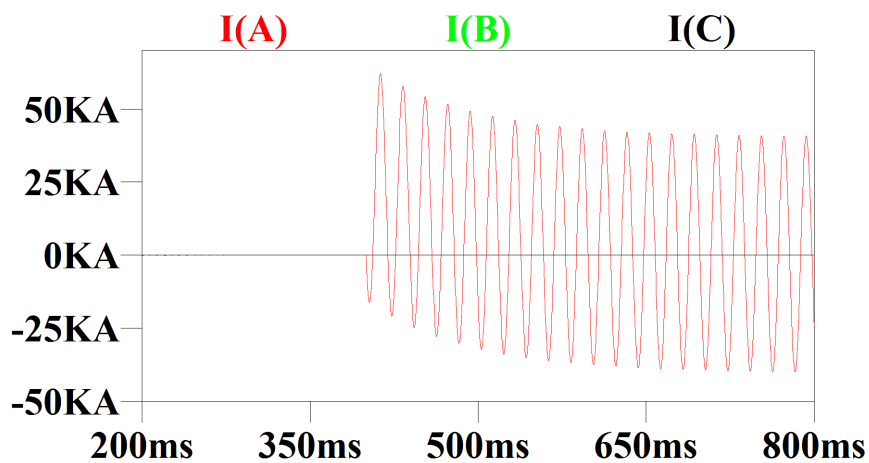
Při zkratových poruchách se síť obvykle automaticky odpíná, u sítí vvn se může odpínat i jednopólově jen postižená fáze. Pro obnovení dodávky energie bývá automatika pro opětovné zapínání, která má rychlý a pomalý cyklus. Pro rychlý cyklus se síť zapíná po 0.2–0.6 s, pokud se po opětovném zapnutí porucha neprojeví, vedení zůstává zapnuto. Při trvajícím poruše se vedení opětovně zapne až po 3 minutách, což je pomalý cyklus. Pokud porucha stále trvá, vedení se odpojí trvale a závadu musí řešit technický pracovník. [13]

4

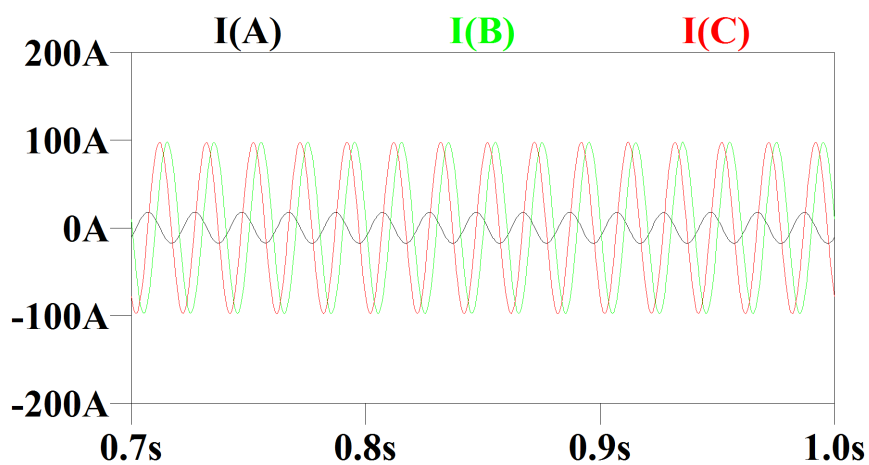
Sítě s přímo uzemněným uzlem transformátoru

Popis účinně uzemněné sítě není konkrétním bodem mého zadání, ale pro názornost významu kompenzace a omezování kapacitních proudů musí být uveden. Uzemněný nulový bod je převážně využit v sítích vvn, zvn a v rozvodech nn. Ekonomickou výhodou tohoto zapojení je, že při spojení se zemí zůstává na jednotlivých fázích fázové napětí a je možné síť dimenzovat na fázová napětí. Například u sítě 400 kV by dimenzování na sdružená napětí znamenalo instalovat izolátory s elektrickou pevností o 170 kV větší. Což by nadměrně zvyšovalo hmotnost a konstrukce stožáru by musela být masivnější. Výhodou tohoto zapojení uzlu je jasné vyhodnocení poruchy. Naopak nevýhodou jsou velké zkratové proudy při spojení se zemí a vedení se musí okamžitě odpojit, to lze udělat v sítích vvn i jednopólově. [2, 4]

Používání izolovaných nebo kompenzovaných uzlů u sítí vvn a zvn by při zemním spojení a snaze provozovat síť i s poruchou, vedlo k nebezpečnému krokovému napětí a možnému ohrožení zdravý lidí i zvířat. Smyslem kompenzace, kterým se budu zabývat v dalších kapitolách, je omezit poruchové proudy při kontaktech fáze se zemí. Jak ukazuje obrázek 4.1 poruchový proud v uzemněné síti 22 kV má hodnotu 60 kA, pokud by nedošlo k okamžitému odpojení, síť by byla extrémně přetížená. Oproti tomu kompenzovaná síť má poruchový proud malý a lze provozovat i s poruchou. Při stejných parametrech sítě dosahuje poruchový proud po ustálení přechodového děje dokonce menší hodnoty, než je kapacitní proud před poruchou.



(a) Uzemněná síť



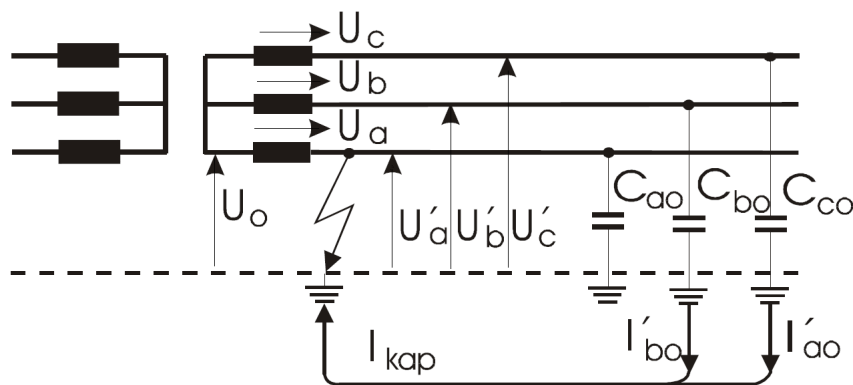
(b) Kompenzovaná síť

Obr. 4.1: Časové průběhy fázových poruchových proudů při kovovém spojení se zemí ve fázi U_a

5

Sítě s izolovaným uzlem transformátoru

Izolované sítě se v ČR provozují obvykle pro vysoké napětí od 6 do 35 kV. Tyto sítě nemají mezi uzlem transformátoru a jednotlivými fázemi žádné vodivé spojení s e zemí. Toto zapojení je vhodné pro menší sítě s malými kapacitními proudy do 20 A. [12] V ČR se takové sítě provozují obvykle v oblastech vn od 6 do 35 kV včetně. Při nezátížené, případně souměrně zatížené síti jsou svodové a kapacitní poměry na jednotlivých fázích prakticky stejné, viz obr. 5.3 před poruchou jejíž počátek je v čase 0.4 s. Napětí na fázích jsou pootočená o 120 stupňů a jejich součet je nulový, to umožňuje spolehlivě vyhodnocovat poruchy. Při zemním spojení nastanou podmínky dle obrázku 5.1. Při malých



Obr. 5.1: Jednofázové zemní spojení v izolované síti |Převzato z [5]|

přechodových odporech vzroste napětí uzlu proti zemi na fázové a napětí zdravých fází vzroste vůči zemi na napětí sdružené. Poruchový proud bude čistě kapacitní a jeho velikost je dána vztahem 5.1 [2], kapacitní charakter poruchového proudu způsobuje problémy při zhášení oblouku.

$$I_{por} = 3\omega \cdot C_0 \cdot U_f \quad [A] \quad (5.1)$$

$$\overline{U}_N = \overline{U}_f \cdot \frac{1/R_{por}}{1/R_{por} + j \cdot 3\omega \cdot C} \quad [V] \quad (5.2)$$

Pro napětí uzlu vůči zemi platí vztah 5.2. Při spojení jedné fáze se zemí lze síť dále provozovat, což je výhodné, ale veškeré zařízení izolované sítě musí být dimenzováno na sdružené napětí. Tyto vyšší náklady kompenzuje absence nákladů na zhášecí tlumivku, automatiku ladění a připínání k odporu k tlumivce. [1]

5.1 Poruchy v izolované síti

Pro simulaci jsem stanovil výstupní parametry dle tabulky 5.1, některé parametry jsem zanedbal, viz 2.1. Kompletní schéma zapojení obvodu v programu LTspice obsahuje příloha A.1. Kapacita vedení odpovídá přibližně délce 3.4 km kabelu AXEKCY, 22 kV,

L zdroje	10 mH
C vedení	1 μ F
G vedení	4 M Ω
R vedení	50 Ω
U_{max} fázové	18 kV

Tab. 5.1: Vstupní parametry pro simulaci izolované soustavy

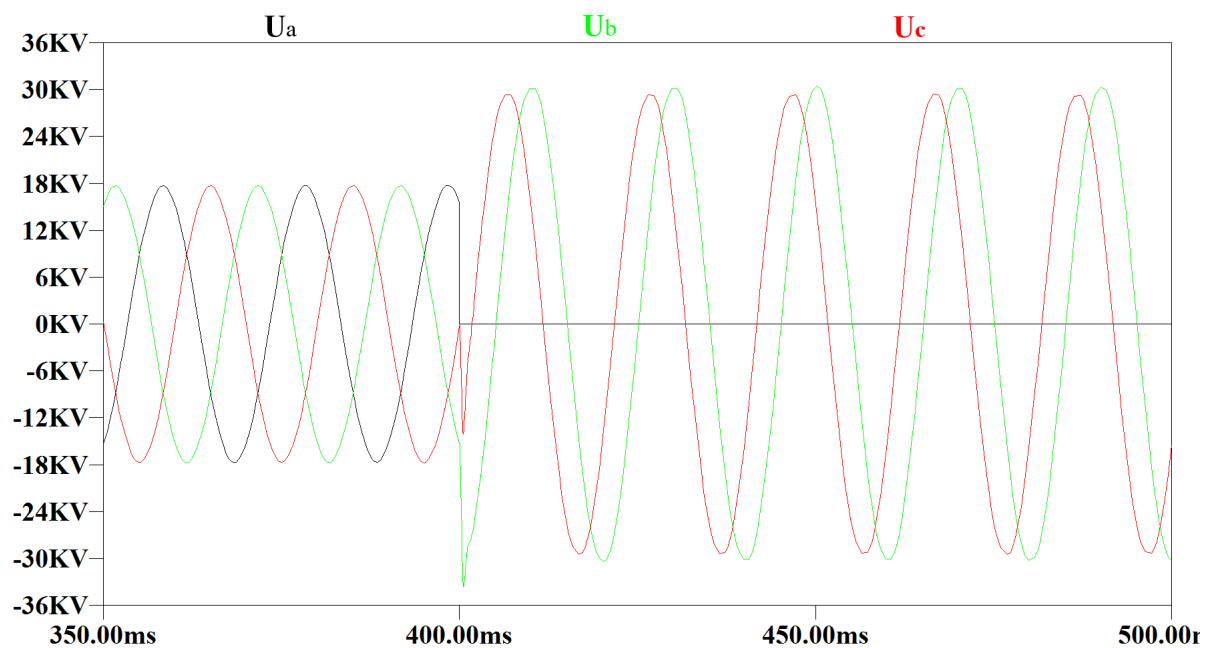
240 mm², nebo 200 km venkovního vedení AlFe lana 240 mm². [1] Tato konfigurace odpovídá kapacitním proudům 5 A pro každou fázi a je splněn požadavek pro izolovanou síť $I_{kap} < 20$ A, daný normou. [2]

5.1.1 Kovové zemní spojení

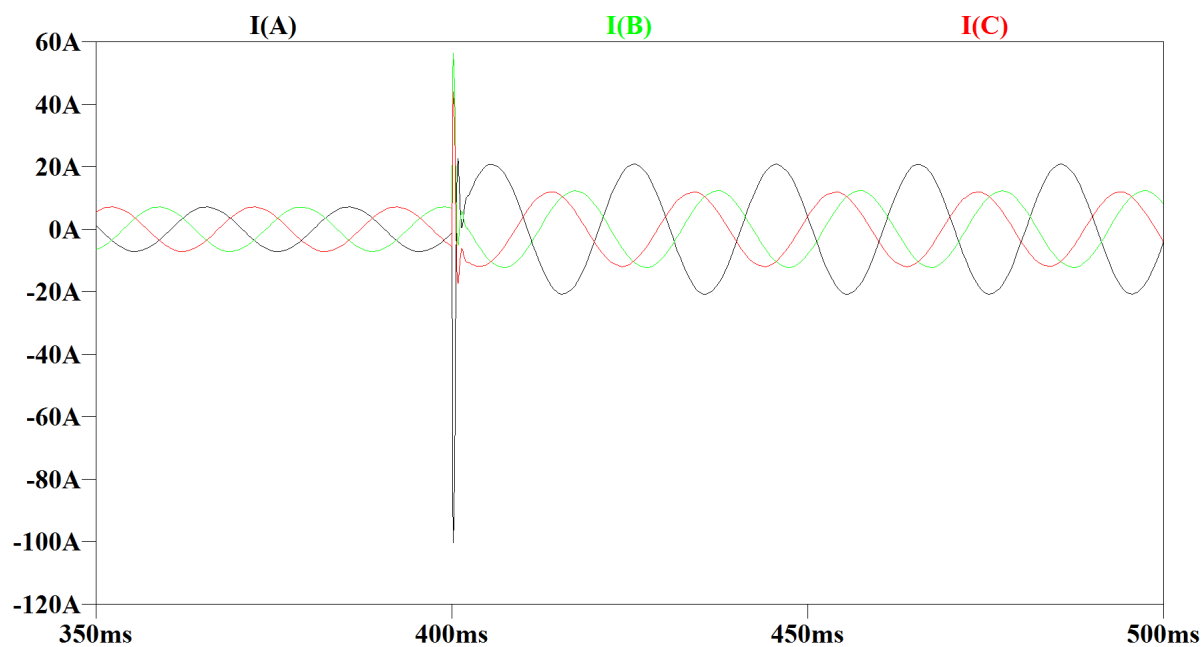
Pro zemní spojení kovového charakteru jsem nastavil hodnotu přechodového odporu poruchy $R_z = 10^{-3}\Omega$. Dle předpokladů se po přechodovém ději ustálilo napětí U_b a U_c na hodnotě 22 kV, to je sdruženého, napětí $U_a = 0$ a $U_N = 12.7$ kV. Průběhy napětí ukazují obrázek 5.2. Poruchový proud protékající fází U_a , je součtem kapacitních proudů zdravých fází. Velikost $I_p = 14.8$ A odpovídá přibližně vztahu 5.1, odchylku způsobuje indukce zdroje a svod G. Průběh proudů ukazuje graf 5.3. Graf ukazuje směry proudů do uzlu a je třeba si představit, že výsledný poruchový proud ve fázi U_a je otočený o 180°. Malá velikost poruchového proudu umožňuje provozovat síť i se zemním spojením.

5.1.2 Odporové zemní spojení

Pro zemní spojení odporového charakteru jsem nastavil hodnotu přechodového odporu poruchy $R_z = 700\Omega$. Výsledný poruchový proud se ustálí na hodnotě $I_p = 10.48$ A, což je menší hodnota než u kovového spojení a rázový proud zemního spojení je také menší.



Obr. 5.2: Časové průběhy fázových napětí v izolované síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s



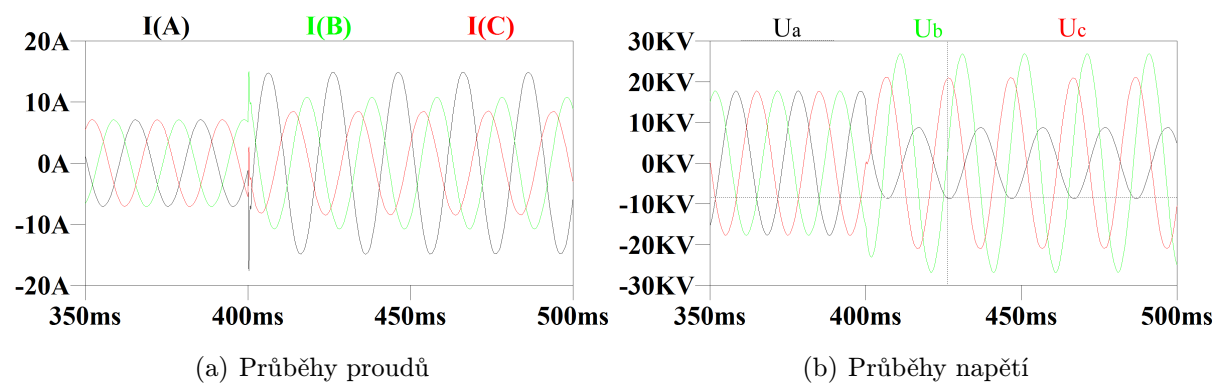
Obr. 5.3: Časové průběhy fázových proudů v nezátížené izolované síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s

Poruchový proud s nekovovým spojením odpovídá vztahu 5.3. [15]

$$\overline{I_{por}} = \overline{U_f} \frac{3 \cdot j \cdot \omega \cdot C}{3 \cdot j \cdot \omega \cdot C \cdot R_{por} + 1} \quad [A] \quad (5.3)$$

Fázová napětí se nezmění tak razantně jako u kovového zemního spojení. Napětí na fázích U_b a U_c vzrostou a napětí U_a se zmenší na 6.1 kV . Průběhy jsou znázorněny na obrázku 5.4. Napětí U_0 vzroste na 7.32 kV , čímž překročí $33\% U_f$ a porucha se hodnotí jako zemní spojení, viz 5.4.

$$U_0 = 7.32 > 0.33 \cdot U_f = 4.2 \quad [kV] \quad (5.4)$$

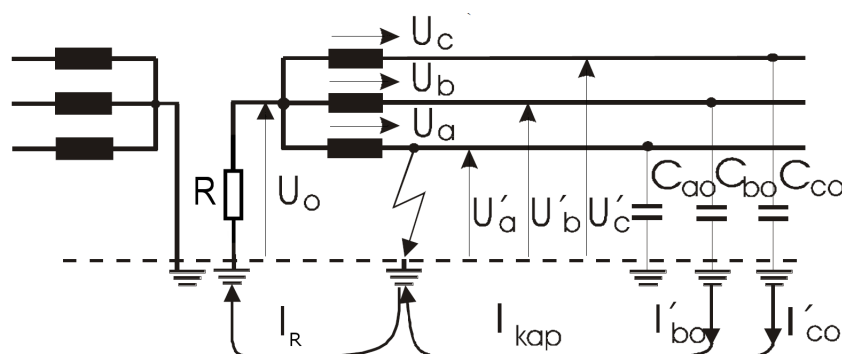


Obr. 5.4: Časové průběhy poruchových proudů a napětí při odporovém zemním spojení v izolované síti

6

Sítě s odporově uzemněným uzlem

Sítě s odporově uzemněným uzlem, nebo také neúčinně uzemněné, mají uzel transformátoru uzemněný přes malou impedanci jak ukazuje obrázek 6.1. Tyto sítě je vhodné



Obr. 6.1: Jednofázové zemní spojení v odporově uzemněné síti [Převzato s úpravami z [5]]

budovat tam, kde jsou příliš velké kapacitní proudy, častou jsou to sítě 22 kV. Jsou vhodné pro kabelové sítě, kde jsou poruchy obvykle trvalé a nelze je provozovat se zemním spojením, které by nadměrně namáhalo izolace zdravých fází a mohlo by vést ke stupňování poruchy. Také se instalují tam, kde by zhášecí tlumivka dosahovala extrémních výkonů a byla by nevhodná. Odpor slouží k omezení poruchových proudů a jeho velikost je řádově desítky Ω , musí platit 6.1, tlumí také přepětí. V těchto sítích lze snadno vyhodnotit zemní poruchu, což umožňuje vysoký proud v postižené fázi. [14]

$$I_{RN} = \frac{U_f}{R_N} \geq I_{kap} \quad [A] \quad (6.1)$$

Odporová síť umožňuje přesné vyhodnocování poruch, součtový proud je několikanásobně vyšší, než u vývodu bez poruchy a síť se při poruše vypíná, což není moc výhodné. Nevýhodou je také investice do odporníku, který je dimenzován na krátkodobé zatížení. Velikost odporu se značí v ampérech a jeho hodnota bývá 300–1000 A. Při poruchách se na uzlu transformátoru objeví fázové napětí. Velikost poruchového proud je dána vztahem 6.2,

který jde zjednodušit na 6.3. [1, 2, 10]

$$I_{por} = U_f \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} + (3\omega \cdot C)^2} \quad [A] \quad (6.2)$$

$$I_{por} = \sqrt{I_R^2 + I_{kap}^2} \quad [A] \quad (6.3)$$

6.1 Poruchy v neúčinně uzemněné síti

Pro simulaci jsem stanovil výstupní parametry dle tabulky 6.1, kompletní schéma zapojení obsahuje příloha A.2. Porucha začíná v čase $t = 0.4 \text{ s}$. Model sítě pro tuto kapitolu simu-

L vedení	1 mH
C vedení	10 μF
R vedení	6 Ω
G vedení	4 M Ω
U_{max} fázové	18 kV

Tab. 6.1: Vstupní parametry pro simulaci neúčinně uzemněné soustavy

luje síť s větší kapacitou vedení, než je v kapitole 5. Konfigurace modelu odpovídá kapacitním proudům 39 A, takováto síť by odpovídala přibližně délce 34 km kabelu AXEKCY, 22 kV, 240 mm², nebo 2000 km venkovního vedení AlFe lana 240 mm². [1]. Dle vztahu 6.1 by měl mít odporník pro uzel transformátoru $R_N \leq 320 \Omega$, protože odporník se volí maximálně v desítkách ohmů, pro simulaci jsem nastavil $R = 30 \Omega$, což je odporník 420 A. Pro napětí U_N v síti se zemním spojením platí 6.4, tento vztah určuje charakter poruchy. [1]

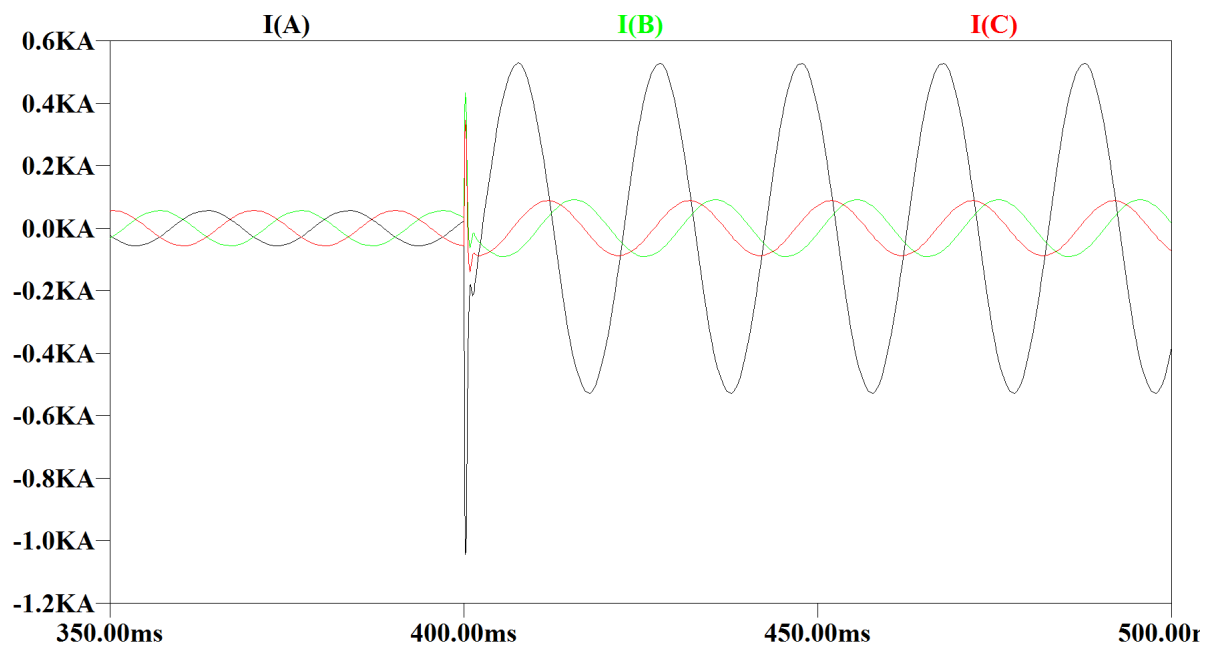
$$\overline{U_N} = \overline{U_f} \cdot \frac{R}{R + R_{por} - jR_{por} \cdot R \cdot 3\omega \cdot C} \quad [V] \quad (6.4)$$

6.1.1 Kovové zemní spojení

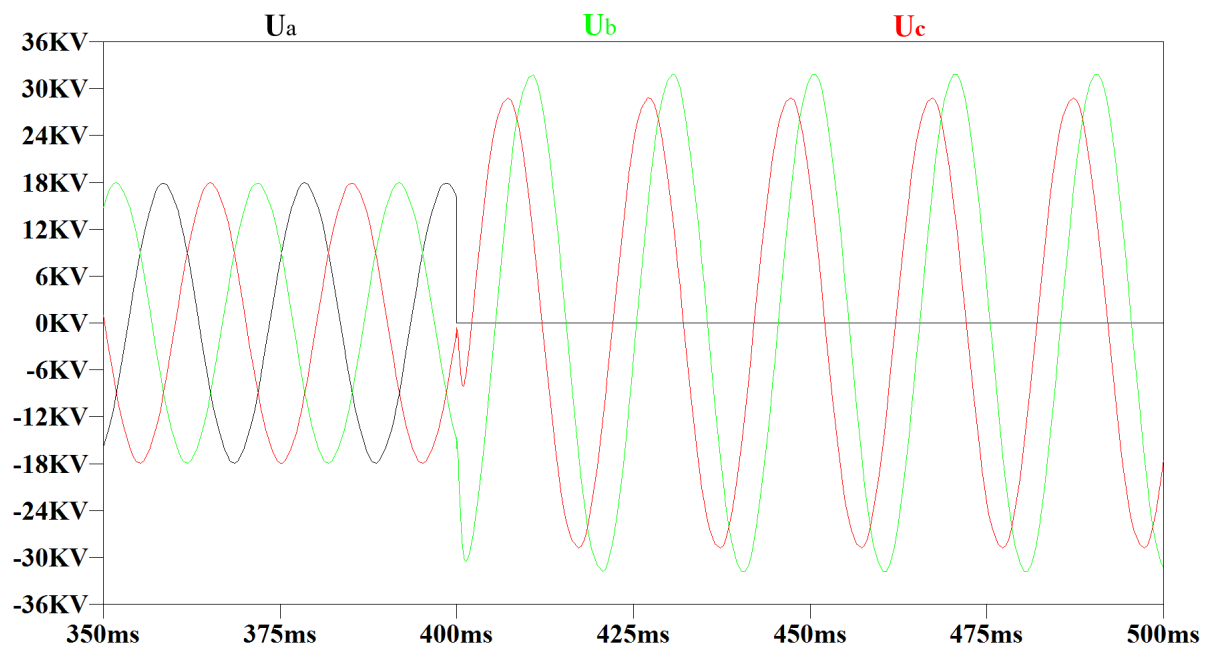
Poruchový proud se ustálí na hodnotě $I_a = 373.4 \text{ A}$. Napětí fází U_b a U_c proti zemi vzrostou na hodnotu sdruženého napětí a napětí U_a klesne na nulu. Napětí uzlu vůči zemi vzroste na $U_0 = U_f = 12.7 \text{ kV}$. Protože na zdravých fázích vzroste napětí na sdružené, naroste jejich proud na hodnotu 64 A, oproti stavu před poruchou.

6.1.2 Odporové zemní spojení

Pro zemní spojení odporového charakteru jsem nastavil hodnotu přechodového odporu poruchy $R_z = 700 \Omega$. Z grafů je patrné, že u kovového spojení se zemí, se porucha neprojevuje tak zásadně. Napěťové a proudové poměry jsou velice podobné jako u sítě s izolovaným



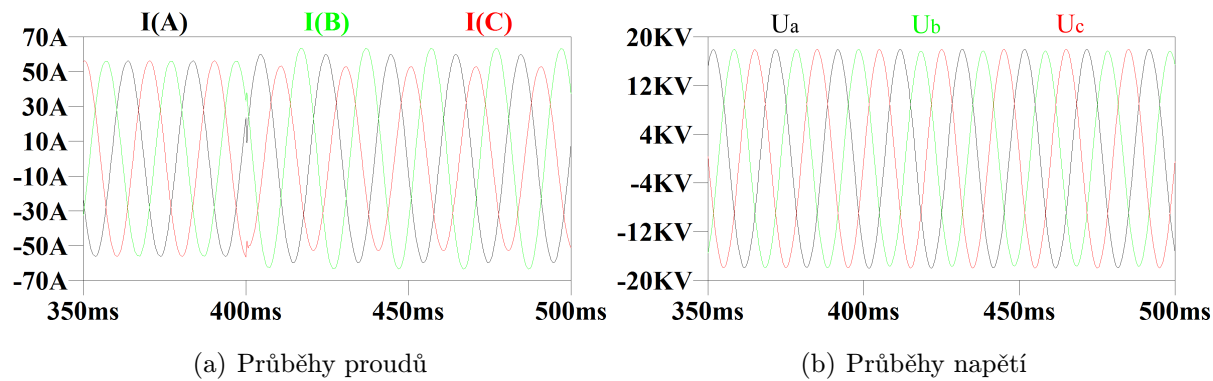
Obr. 6.2: Časové průběhy fázových proudů v nezatížené neúčinně uzemněné síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s



Obr. 6.3: Časové průběhy fázových napětí v nezatížené neúčinně uzemněné síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4 s

uzlem. Tato porucha nebude vyhodnocena jako zemní spojení, protože U_0 nepřekročí 33 % z U_f , pro tento obvod a poruchu platí 6.5. [1]

$$U_0 = 0.48 < 0.33 \cdot U_f = 4.2 \quad [kV] \quad (6.5)$$

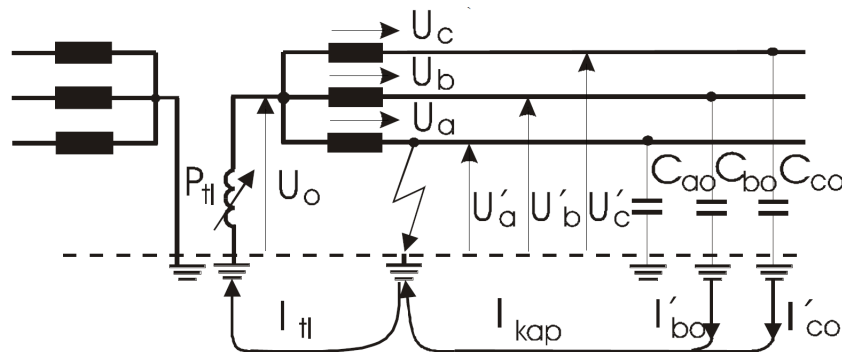


Obr. 6.4: Časové průběhy poruchových proudů a napětí při odporovém zemním spojení v neúčinně uzemněné síti

7

Sítě s kompenzovaným uzlem transformátoru

Tyto sítě mají uzel transformátoru připojen k zemi přes zhášecí tlumivku (Petersenova cívka), případně s paralelním odporem. Při poruchách protéká proud činného charakteru. Je to dáno opačným orientováním induktivního proudu tlumivky, oproti kapacitním proudům. Schéma sítě při poruše je na obrázku 7.1. Cílem je, aby proud tlumivky byl



Obr. 7.1: Jednofázové zemní spojení v kompenzované síti |Převzato z [5]|

stejně velký jako kapacitní proud, ladí se tedy na paralelní rezonanci. Ladění probíhá obvykle automaticky, podle změn kapacitních proudů v závislosti na spínání a odpínání vedení. Realizuje se změnou velikosti vzduchové mezery v jádře tlumivky, jádrem pohybuje elektromotor a nastavuje se s určitým rozladěním, obvykle na 98–99 % I_c . Neustálá potřeba mít obvod ve vyladěném stavu je s cenou kompenzačního zařízení největší nevýhodou tohoto způsobu provozu sítě. Maximální vhodný kapacitní proud je pro venkovní vedení 100 A, pro smíšená 300 A a pro kabelová 450 A. Problematické je vyhodnocení poruchových stavů při dobrém vykompenzování sítě. Činný charakter poruchového proudu umožňuje bezproblémovější samozhášení při obloukových spojeních se zemí. Výsledný poruchový proud je dán vztahem 7.1 [6].

$$\overline{I_{por}} = \overline{U_f} \cdot \left[3 \cdot G + j \cdot \left(3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega \cdot L} \right) \right] \quad [A] \quad (7.1)$$

Pro napětí U_N v síti se zemním spojením platí 7.6, tento vztah je podstatný pro vyhodnocení poruchy. [1]

$$\overline{U}_N = \overline{U}_f \cdot \frac{1/R}{1/R + j \cdot (1/(\omega \cdot L) - 3\omega \cdot C)} \quad [V] \quad (7.2)$$

Ze vztahu 7.1 plyne, že pokud chceme mít vykompenzovanou síť, dá se indukčnost zhášecí tlumivky vypočítat dle vztahu 7.5.

$$L > \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} \quad [H] \quad (7.3)$$

Nejdůležitější hodnotou cívky je její zdánlivý výkon, vyrábějí se jmenovité výkony 125–12700 kVA . Velikost zdánlivého výkonu zhášecí tlumivky je dána vztahem 7.4.

$$S = I_{kap} \cdot U_f \quad [VA] \quad (7.4)$$

7.1 Poruchy v kompenzované síti

Parametry vedení jsou stejné jako v kapitole 6 a udává je tabulka 7.1, náhradní schéma použité pro simulaci ukazuje příloha A.3. Před poruchou jsou kapacitní proudy na hod-

L vedení	1 mH
C vedení	10 μF
R vedení	6 Ω
G vedení	4 $M\Omega$
U_{max} fázové	18 kV

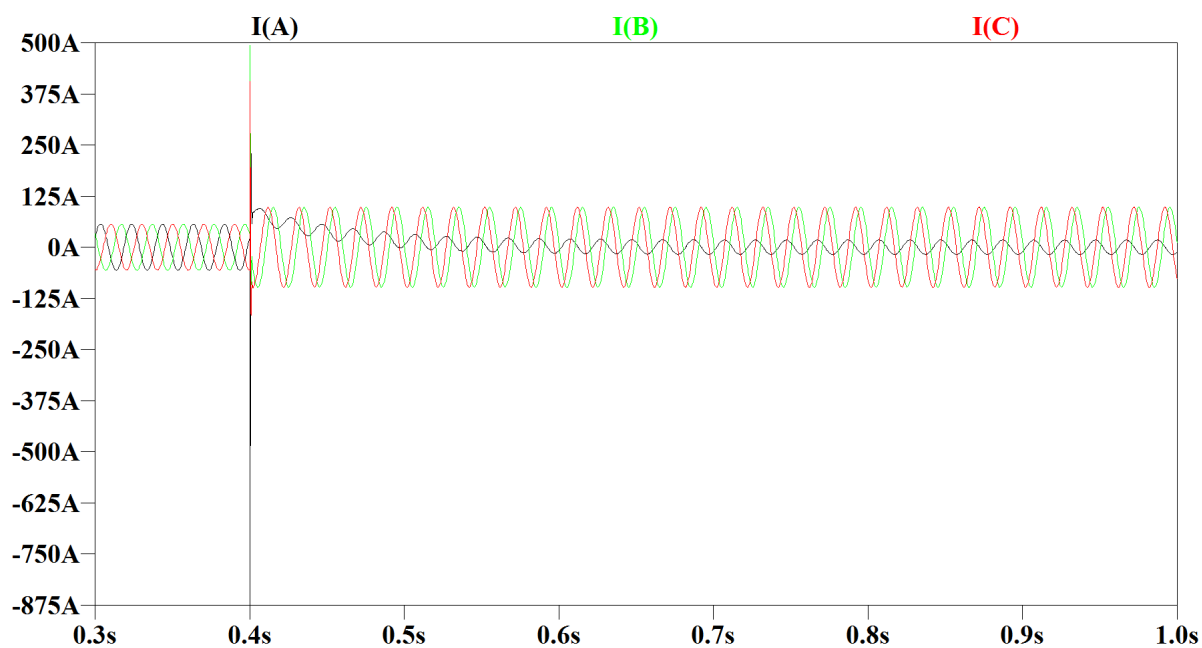
Tab. 7.1: Vstupní parametry pro simulaci neúčinně uzemněné soustavy

notách 39 A a fázová napětí jsou 12.7 kV , $U_0 = 0V$. Ze vztahu 7.5 jsem si určil velikost indukčnosti pro zhášecí tlumivku. Pro simulaci jsem zvolil indukčnost 350 mH .

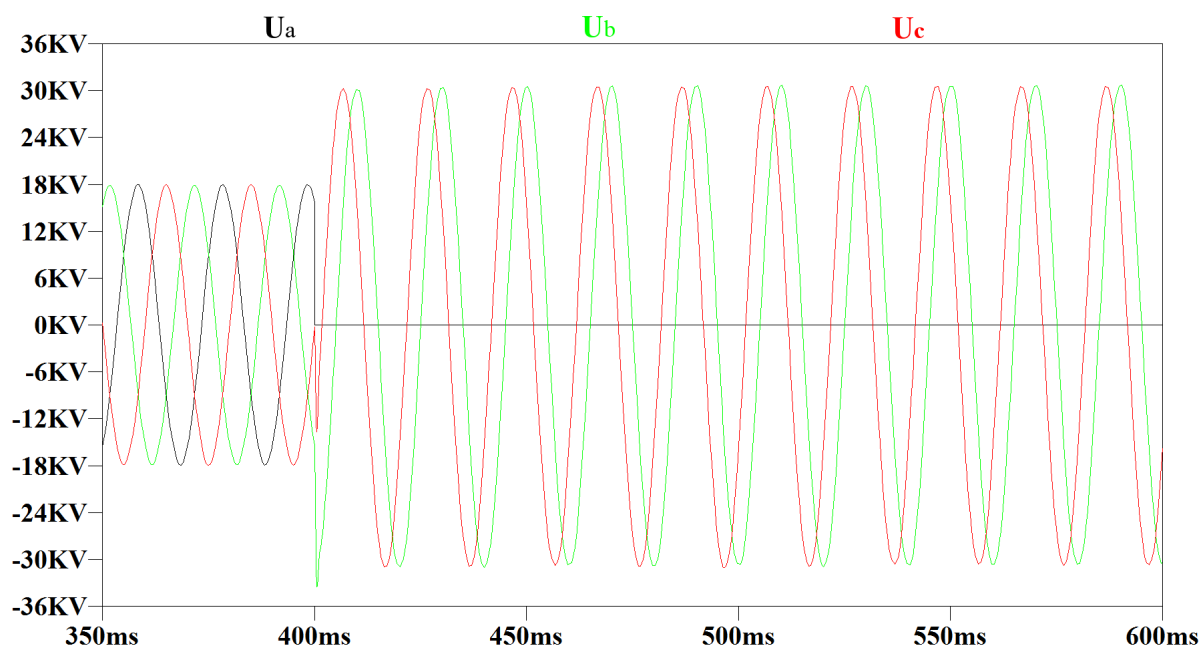
$$L > \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot (2\pi \cdot 50)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-5}} \doteq 0.337 H \quad (7.5)$$

7.1.1 Kovové zemní spojení

Při poruše jsem nastavil odpor $R_p = 0.001 \Omega$, což odpovídá kovovému zemnímu spojení. Napětí U_b a U_c vzroste na hodnotu sdruženého, což je 22 kV , $U_c = 0V$ a na uzlu vznikne napětí $U_0 = 12.3 kV$. Poruchový proud se ustálí na hodnotě 12.5 A . Kapacitní proudy ve fázích U_b a U_c vzrostou z důvodu zvýšeného fázového napětí na 97 A . Rázový zkratový proud dosáhne v maximu hodnoty 902 A , jak je patrné z obrázku 7.2. Poruchový proud má oproti předchozím zapojením uzlu transformátoru významnější podíl stejnosměrné složky. Časové průběhy napětí ukazuje obrázek 7.3.



Obr. 7.2: Časové průběhy fázových proudů v nezátížené kompenzované síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4s

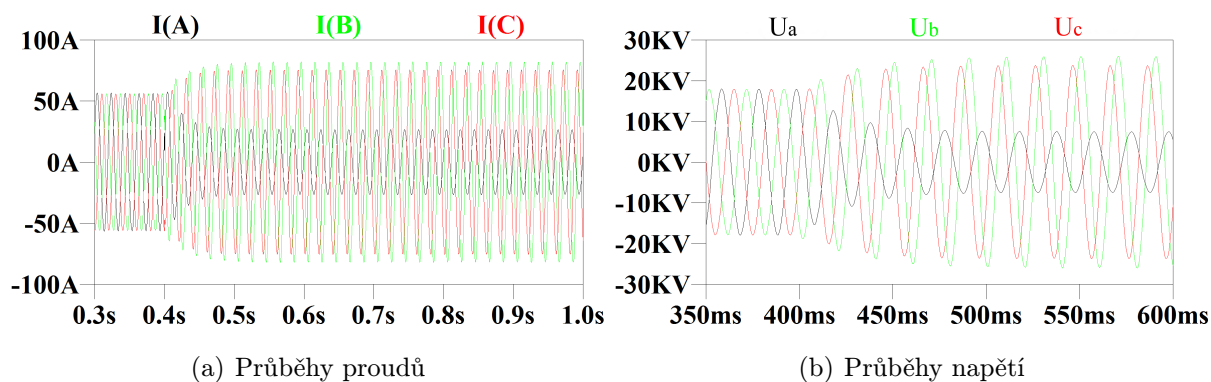


Obr. 7.3: Časové průběhy fázových napětí v nezátížené kompenzované síti s kovovým zemním spojením začínajícím v čase 0.4s

7.1.2 Odporové zemní spojení

Pro kovové zemní spojení zůstává většina parametrů stejná, mění se jen odpor poruchy na $R_p = 700\Omega$. Průběhy proudů a napětí ukazuje obrázek 7.4. Napětí U_a nepoklesne až na nulu, ale ustálí se na hodnotě 5.3 kV , tato porucha bude vyhodnocena jako zemní spojení, protože platí 7.6

$$U_0 = 5.3 > 0.33 \cdot U_f = 4.2 \quad [\text{kV}] \quad (7.6)$$



Obr. 7.4: Časové průběhy poruchových proudů a napětí při odporovém zemním spojení v kompenzované síti

8

Rozvodná síť vn

V této kapitole se budu věnovat konkrétní síti, kde budu hodnotit jaký způsob provozu uzlu je nejvhodnější. Použiji zjednodušený model sítě bez vzájemných vazeb, pro výpočty použiji velmi zjednodušené náhradní schéma, kde zanedbám: impedanci transformátoru, podélné impedance vedení, mezifázové kapacity a svod. Porucha bude jednofázové kovové zemní spojení, pro uzemněný uzel zkrat. Odpor poruchy budu pro výpočty uvažovat nulový, reálný přechodový odpor se obvykle nedostane pod velikost 1Ω ani u kovového spojení.

8.1 Parametry pro výpočet

Síť je provedena jako okružní dle obrázku 8.1, tento typ sítě je výhodný v tom, že při poruše vedení lze postižený obvod vypnout a pro přenos napětí použít sousední vedení. [14] Síť je napájena z distribučního transformátoru 110/22 kV. Síť je provedena kabely 22-AXEKVCVE s průřezem 300 mm^2 , což je energetický kabel se zvýšenou odolností vůči podélnému šíření vlhkosti s PE pláštěm pro sdružené napětí 22 kV. Kabely jsou uloženy v kabelovém kanále na lávkách těsně vedle sebe. Vybrané parametry kabelu ukazuje tabulka 8.1. Celková délka vedení ve všech větvích je 150 km. Vzhledem k rozsáhlosti sítě

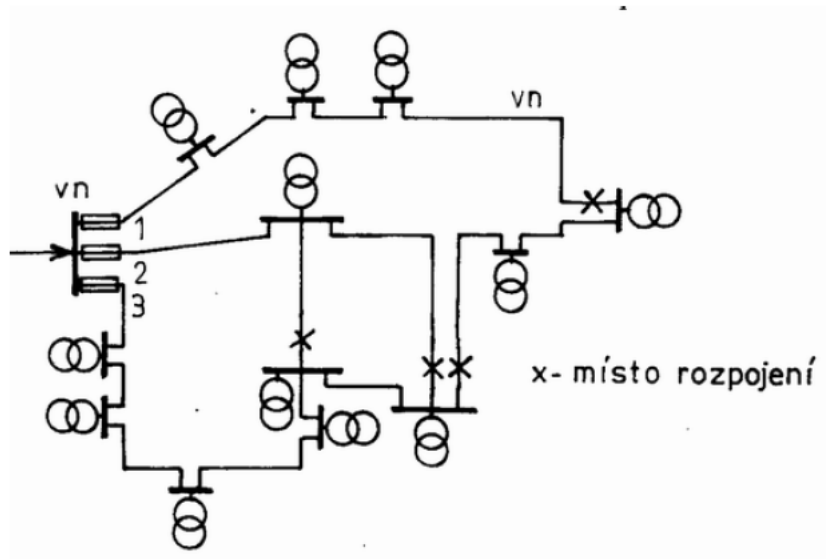
U_{max} [kV]	Kapacita [$\mu F/km$]	Činný odpor [Ω/km]	Indukčnost [mH/km]
50	0.32	0.1	0.46

Tab. 8.1: Vlastnosti kabelu 22-AXEKVCVE [9]

a kapacitnímu proudu překračující 20 A, nelze tato síť provozovat s izolovaným uzlem.

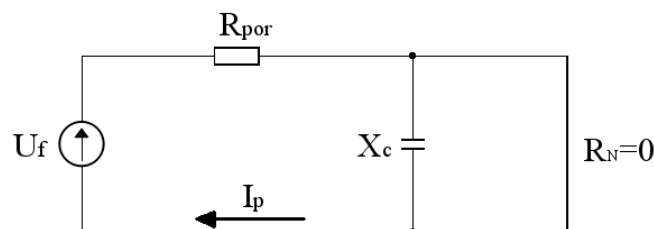
8.2 Účinně uzemněný uzel transformátoru

Zjednodušené náhradní schéma pro účinně uzemněnou síť ukazuje obrázek 8.2. Z obrázku je patrné, že odpor uzlu vůči zemi je nulový a poruchový proud by byl omezován jen od-



Obr. 8.1: Okružní síť vn [Převzato z [14]]

porem poruchy. Proud by narostl na extrémní hodnoty a síť by tedy při poruše musela být okamžitě odpojena. V reálném obvodu by byl proud poruchy omezen impedancí vedení, transformátoru, přechodovými odpory a také výkonem zdroje. Napětí na uzlu by mělo být vždy nulové, pokud nebude poškozen vodič uzemnění.



Obr. 8.2: Náhradní schéma účinně uzemněné sítě

8.3 Neúčinně uzemněný uzel transformátoru

Pro neúčinně uzemněnou síť nejprve musím určit kapacitní proud vedení, na jehož základě budu určovat parametry kompenzačních prvků. Vypočtu si celkovou kapacitní reaktanci a z ní celkový kapacitní proud pro jednu fázi, viz vztah 8.1.

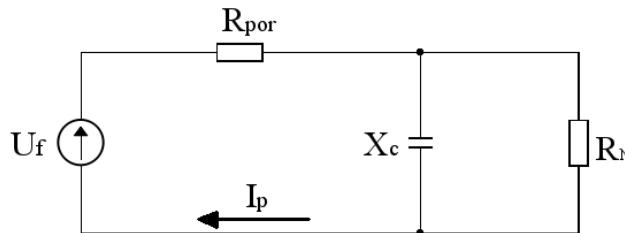
$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 150 \cdot 3.2 \cdot 10^{-7}} \doteq 66 \Omega$$

$$I_{kap} = \frac{U_f}{X_C} = \frac{1.27 \cdot 10^4}{66} \doteq 192.4 A \quad (8.1)$$

8.3.1 Neúčinně uzemněný uzel

Pro neúčinně uzemněný uzel je náhradní zjednodušené schéma na obrázku 8.3. Pro výpočet si stanovím hodnotu odporu uzlu transformátoru vztahem 8.2, jak jsem uvedl v kapitole 6, pro takovýto proud by jsme volili odpor $30\ \Omega$, což je odporník $420\ A$.

$$R_N \leq \frac{U_f}{I_{kap}} = \frac{1.27 \cdot 10^4}{192.4} \doteq 66.3\ \Omega \quad (8.2)$$



Obr. 8.3: Náhradní schéma odporově uzemněné sítě

Z náhradního schématu si vypočítám celkovou impedanci vedení a poruchový proud 8.3.

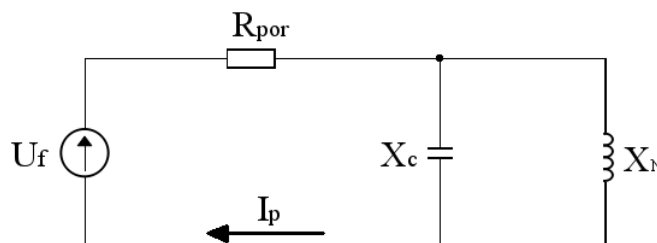
$$\bar{Z} = \frac{R_N \cdot (-jX_C)}{R_N + (-jX_C)} = \frac{30 \cdot (-66j)}{30 - 66j} = 18.13 - 8.4j \doteq 20e^{-j25^\circ}\ \Omega$$

$$I_{por} = \frac{U_f}{Z} = \frac{1.27 \cdot 10^4}{20} \doteq 635\ A \quad (8.3)$$

Poruchový proud tedy bude dosahovat hodnoty $635\ A$, což není hodnota se kterou by se vedení dalo dál provozovat a je nutné ho odpojit.

8.3.2 Kompenzace zhášecí tlumivkou

Náhradní zjednodušené schéma pro účinně uzemněnou síť ukazuje obrázek 8.4. Ze vztahu



Obr. 8.4: Náhradní schéma kompenzované sítě

7.5 z kapitoly 7 si určím velikost indukčnosti a následně reaktanci zhášecí cívky X_N dle

vztahu 8.4, její činný odpor zanedbám.

$$L < \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot (2\pi \cdot 50)^2 \cdot 150 \cdot 3.2 \cdot 10^{-7}} = 70 \text{ mH}$$

$$X_L = L \cdot \omega = 0.07 \cdot 2\pi \cdot 50 = 22 \Omega \quad (8.4)$$

Potřebná cívka bude v katalogu označena zdánlivým výkonem udávající vztah 8.5

$$S_L = \frac{U_f^2}{X_L} = \frac{12.7^2}{22} 7.33 \text{ MVA} \quad (8.5)$$

Výsledný poruchový proud vedení bude při kovovém zemním spojení dán 8.6, což je rovnice 7.1, kde jsem zanedbal vliv svodu G na výsledný proud.

$$\begin{aligned} \overline{I}_{por} &= \overline{U}_f \cdot j \cdot \left(3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega \cdot L} \right) = \\ 12700 \cdot j \cdot \left(3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 150 \cdot 3.2 \cdot 10^{-7} - \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0.07} \right) &\doteq 2.97e^{-j90^\circ} \text{ A} \quad (8.6) \end{aligned}$$

Výsledný proud má velikost 2.97 A a je kapacitního charakteru, což je výhodnější pro zhášení elektrického oblouku. V reálnějším modelu by měl i činnou složku danou svodem G.

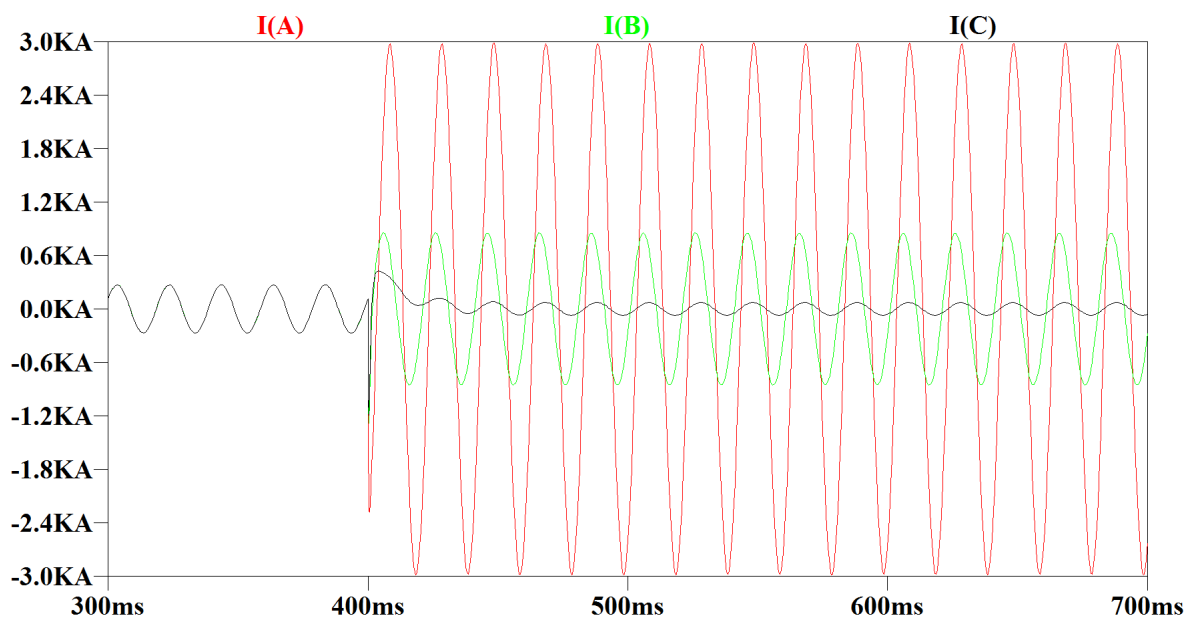
8.4 Zhodnocení výsledků

Ze tří možností jak provozovat uzel transformátoru je třeba vybrat tu neoptimálnější s přihlédnutím k požadavkům. Pro síť, kde chceme co nejvíce ušetřit investiční náklady a není nezbytně nutná trvalá dodávka energie, lze použít účinně uzemněný uzel, což se u nás u sítí vn realizuje jen výjimečně. Pokud budeme chtít co nejstálější dodávku energie, jeví se mi nejvhodnější propojit uzel se zemí Petersenovou tlumivkou. V tomto případě je třeba dimenzovat celou síť na sdružené napětí, což zvolený kabel 22-AXEKVCVE splňuje, jeho maximální provozní napětí je 25 kV a zkušební 50 kV. Před instalací zhášecí tlumivky je třeba na síti provádět měření, aby bylo možné navrhnout správné a efektivní kompenzační zařízení. Při návrhu je třeba také brát v úvahu, jak se provoz sítě s poruchou projeví na síti nn a bude-li to pro cílové odběratelé únosné, což u těchto sítí často nebývá. Odporově uzemněná síť se mi nejvíce jeví jako vhodné řešení, protože má dvě nejzásadnější nevýhody uzemněné i kompenzované soustavy. Síť se musí dimenzovat na sdružené napětí a není možné jí provozovat s poruchou. Avšak ne bezvýznamnou výhodou je snadné detekce poruchových proudů a vyhodnocování poruchy. Hodnoty při poruchových stavech uvádí tabulka 8.2, porucha je stejně jako v předchozích kapitolách na fázi U_a a má kovový charakter.

	Účinně uzemněná	Odporově uzemněná	Kompenzovaná
I_{por} [A]	"∞"	635	2.97
U_N [kV]	0	12.7	12.7
U_a [kV]	0	0	0
$U_b = U_c$ [kV]	12.7	22	22

Tab. 8.2: Shrnutí vypočtených hodnot při poruše pro jednotlivé zapojení uzlů

Obrázek 8.5 ukazuje časové průběhy proudů v postižené fázi, pro účinně uzemněnou síť má průběh I_A červenou barvu, pro odporově uzemněnou I_B zelenou a pro kompenzovanou I_C černou. Pro modelování průběhů v LTspice jsem oproti výpočtům musel brát v úvahu další parametry vedení jak ukazuje tabulka 8.1, jinak by simulační program obtížně vyhodnocoval extrémní stavy při zemním spojení v účinně uzemněné síti a průběhy by nebylo možné uspořádat v jednom grafu.



Obr. 8.5: Časové průběhy poruchového proudu pro účinně uzemněnou I_A , odporově uzemněnou I_B a kompenzovanou síť I_C

9

Závěr

Úkolem práce bylo zhodnotit a popsat jednotlivé způsoby uzlu transformátoru a zhodnotit vliv kompenzace na provoz sítě. Pro každý způsob provozu uzlu jsem sestavil obvod v programu LTspice, na kterém jsem chtěl názorně ukázat, jak se poruchy projevují v časových průbězích proudů a napětí. Volil jsem pokud možno podobné nastavení sítě, aby bylo názorně vidět jak se způsob zapojení uzlu projeví na chování soustavy při jednofázových poruchách, pro něž je způsob zapojení uzlu rozhodující.

Izolované sítě mají omezené použití z důvodu mezní hodnoty kapacitního proudu kde je lze použít. Jejich přednosti se tedy projevují pouze u menších rozvodných sítí. Jednofázové zemní poruchy v síti nezpůsobují extrémní proudy a lze provozovat i s poruchou. Tento způsob provozu uzlu lze provozovat u sítí vn a nn, ale pro sítě nn sdruženého napětí jen ve výjimečných případech s ohledem na bezpečnost.

Odporově uzemněné sítě se nejvíce uplatní tam, kde nemohou být sítě izolované z důvodu nadměrného proudu a už je nevýhodné provozovat zhašecí tlumivkou s velkým výkonem. Nevýhodou sítě je velký poruchový proud, který neumožňuje provozovat síť s poruchou, ale zato umožňuje spolehlivě vyhodnotit poruchu. To že nelze provozovat síť s poruchou není na škodu u kabelových sítí, kde jsou poruchy obvykle trvalého charakteru a provoz se zemním spojením by poruchu rozšířil do dalších fází.

Kompenzovaná síť se zhašecí tlumivkou najde největší uplatnění v sítích s venkovním vedením, kde poruchy jsou přechodné. Zemní spojení se obvykle přeruší samo, bývá to 80 – 70 %, protože poruchový proud je natolik malý, že nedokáže udržet elektrický oběh. Navíc má poruchový proud činný charakter. Minimální velikost poruchového proudu může způsobit problémy při hledání poruchy, kdy se v síti zatížené stovkami ampér hledá poruchový proud o hodnotě jednotek ampér.

Posledním bodem zadání bylo aplikovat získané znalosti z předchozích kapitol na konkrétním případě. Zvolil jsem distribuční kabelovou síť vn 22 kV, ve které jsem pro účinně uzemněný, neúčinně uzemněný a kompenzovaný uzel transformátoru počítal poruchové proudy. Myslím, že obrázek 8.5 zobrazující poruchový proud pro všechny 3 sítě, ukazuje nejlépe závislost zapojení uzlu na poruchovém proudu a je celkovým shrnutím všeho výše popsaného. Pro účinně uzemněnou soustavu poruchový proud nabývá extrémních hodnot

a je třeba okamžitě vypnout, pro uzemněný uzel je poruchový proud dostatečně velký, aby ho ochrany spolehlivě indikovali. Kompenzovaná síť má poruchový proud minimální a je z hlediska ochrany komplikovaněji identifikovatelný.

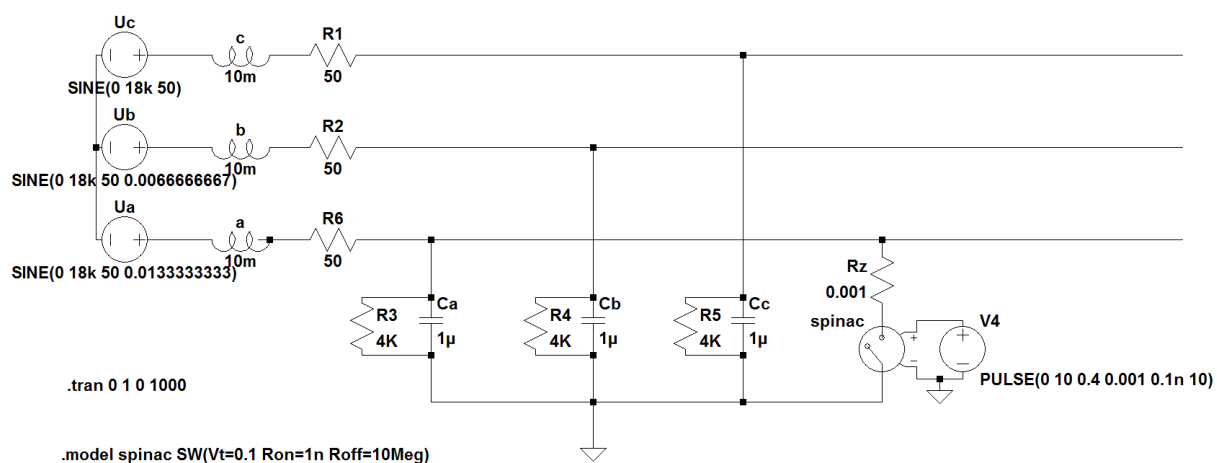
Literatura

- [1] HEJTMÁNKOVÁ, Pavla a ŠTROBLOVÁ, Milada. *Elektrické sítě městské a průmyslové*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1994. ISBN 80-7082-154-X.
- [2] MERTLOVÁ, Jiřina a NOHÁČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [3] ČEPS, a.s., 2013 [online]. ČEPS, a.s., Elektrárenská 774/2, 101 52 Praha 10 [cit. 19.1.2013]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/>
- [4] MERTLOVÁ, Jiřina, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla a TAJTL, Tomáš. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. 1. vydání-dotisk. Plzeň: ZČU, 2008. ISBN 978-80-7043-307-2.
- [5] SCHEJBAL, Konstantin a Jiřina MERTLOVÁ. *Elektroenergetika II*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. ISBN 80-7082-451-4.
- [6] HORÁK, Martin. *Systémy chránenia a automatizácie distribučných elektrických sietí 22 kV*. 1. vyd. Banská Bystrica: PRO, s.r.o, 2011. ISBN 978-80-89057-37-5.
- [7] LANAP S.R.O. Lanap Slovakia s.r.o. [online]. BRATISLAVA [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://lanap.sk/index.php?route=product/product&product_id=98
- [8] EJeseniky.com: Podzemí PVE Dlouhé stráně. HOSTING & DESIGN. [online]. 2013 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.ejeseniky.com/turistika/zajimavamista/podzemi-pve>
- [9] Nktcables: vn kabely dle TP. NKT CABLES S.R.O. [online]. Kladno [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.nktcables.com/cz/products/medium-voltage/mv-cables-acc-to-tp/>
- [10] EGE, spol. s. r.o. *Produkty a služby* [online]. 2011 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.ege.cz/index.php?docid=11&lang=CZ>
- [11] SPEVÁKOVÁ, Šárka. ČESKÁ TELEVIZE. *Popularis: Spřádání energetických sítí* [online video]. 2004 [cit. 28.4.2013]. Dostupné z: http://www.ceskatelevize.cz/porady/1095969461-popularis/204562241900023/456-popularis-prisp/?prisp_id=223

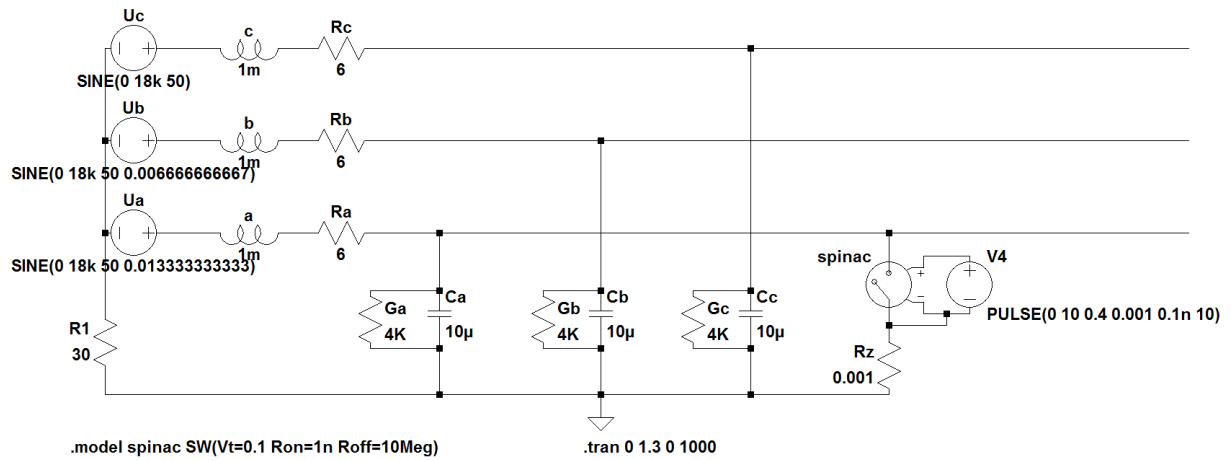
- [12] ČSN 33 3070. *Elektrotechnické předpisy-Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí* Praha:ÚNMZ, 1979.
- [13] MÜHLBACHER, Jan. *Metody řešení přechodných jevů v elektrizačních soustavách I.* 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1993, 165 s. ISBN 80-708-2087-X.
- [14] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.
- [15] LÁLA, Jan. *Způsob provedení přechodu izolované sítě na uzemněnou s uzlem sítě přes plynule nastavitelnou tlumivku.* Plzeň, 2010. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Lucie Noháčová.
- [16] ŽÁK, František. EGE, spol. s. r.o. [ústní konzultace]. České Budějovice, 2013.

Příloha A

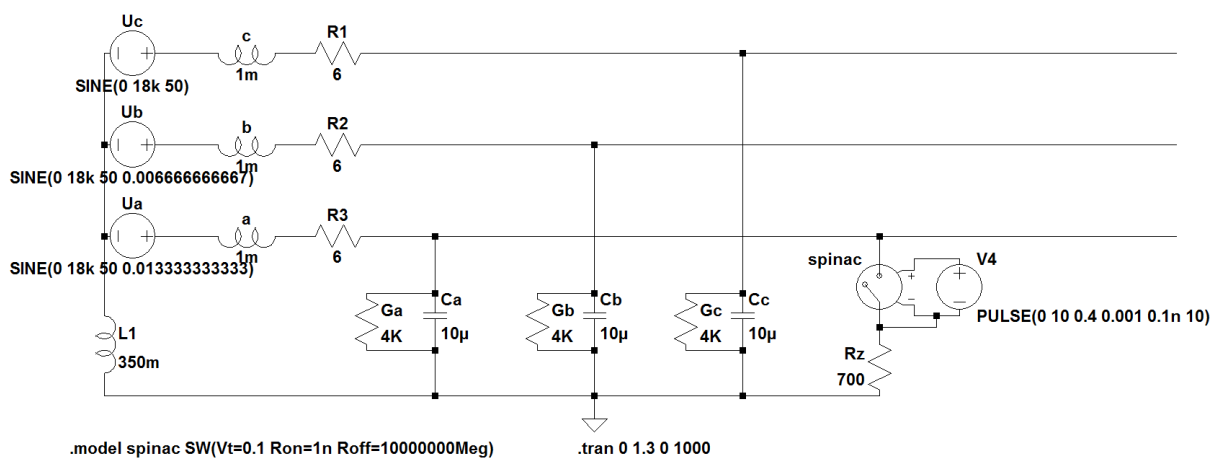
Parametry programu LTspice



Obr. A.1: Náhradní schéma izolované sítě v programu LTspice



Obr. A.2: Náhradní schéma neúčinně sítě soustavy v programu LTspice



Obr. A.3: Náhradní schéma kompenzované sítě soustavy v programu LTspice