

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Rozbor napět'ových a proudových poměrů v sítích VN

**vedoucí práce: doc. Ing. Konstantin Schejbal, CSc.
autor: Bc. Petra Vokálová**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petra PATEROVÁ**
Osobní číslo: **E09N0026K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Rozbor napěťových a proudových poměrů v sítích VN**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Analyzujte způsob provozu sítí VN z hlediska uzlu systému.
2. Proveďte rozbor napěťových a proudových poměrů v jednotlivých typech sítí.
3. Analyzujte metody detekce místa zemního spojení v jednotlivých sítích VN.
4. Rozeberte způsoby kompenzace kapacitních proudů v sítích VN.
5. Proveďte rozbor automatického ladění zhášecích tlumivek.

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


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

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Konstantin Schejbal, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

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


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




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

V Plzni dne 17. října 2011

Název práce

Rozbor napěťových a proudových poměrů v sítích VN

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na napěťové a proudové poměry v sítích vysokého napětí.

Jedním z nejrozšířenějších typů sítí jsou sítě kompenzované, které při jednopólové poruše kompenzují pomocí zhášecí tlumivky kapacitní proud soustavy protékající místem poruchy.

V předkládané práci jsou popsány metody detekce zemního spojení.

Klíčová slova

Zemní spojení, kompenzovaná síť, zhášecí tlumivka, Petersenova tlumivka, detekční metody, síť VN.

Name of the thesis

Analysis of voltage and current conditions in the MV networks

Annotation

The master theses presents on the voltage and current ratios in the high voltage.

One of the most common types of networks are compensated networks that at single pole fault a capacitive current is compensated by the arc-suppression coil and only residual current flows through a fault point.

In the present thesis describes the fault detection methods.

Key words

Earth fault, compensated network, arc-suppression coil, Petersen coil, detection methods, MV network.

Prohlášení

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

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

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

Během zpracování diplomové práce došlo ke změně příjmení z Paterová na Vokálová.

V Plzni dne 9.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Konstantinu Schejbalovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 SÍŤE A SOUSTAVY	11
1.1 PARAMETRY VEDENÍ	13
2 ZPŮSOB PROVOZU SÍTÍ VN Z HLEDISKA UZLU SYSTÉMU	14
2.1 SÍŤ VN S IZOLOVANÝM UZLEM	16
2.2 KOMPENZOVANÁ SÍŤ VN	17
2.3 UZEMNĚNÍ UZLU VN PŘES REZISTOR	18
2.4 SÍŤ S PŘÍMO UZEMNĚNÝM UZLEM	18
3 ROZBOR NAPĚŤOVÝCH A PROUDOVÝCH POMĚRŮ	19
3.1 SÍŤ S IZOLOVANÝM UZLEM (BEZPORUCHOVÝ STAV)	19
3.2 SÍŤ S IZOLOVANÝM UZLEM (DOKONALÉ TRVALÉ ZEMNÍ SPOJENÍ)	21
3.3 SÍŤ S IZOLOVANÝM UZLEM (ODPOROVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ)	23
3.4 METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK	26
4 METODY DETEKCE MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ V JEDNOTLIVÝCH SÍTÍCH VN	28
4.1 STATICKÉ A DYNAMICKÉ METODY	30
4.2 STATICKÉ METODY VHODNÉ PRO IZOLOVANÉ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	30
4.2.1 Amplituda fázového napětí a netočivé složky napětí	30
4.2.2 Porovnání amplitudy netočivých složek proudu	31
4.2.3 Porovnání skupin amplitud a fáze netočivých složek proudů	31
4.2.4 Určení toku netočivé složky jalového výkonu	31
4.2.5 Metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu	32
4.3 STATICKÉ METODY VHODNÉ PRO KOMPENZOVANÉ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	32
4.3.1 Metoda detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)	32
4.3.2 Metoda páté harmonické	33
4.3.3 Metoda základní harmonické	34
4.3.4 Metoda vyšších harmonických	34
4.3.5 Admitanční princip netočivé složky	34
4.3.6 Metoda zpětné složky proudu	34
4.4 DYNAMICKÉ METODY	35
4.4.1 Metoda první půlperiody (Whisherův princip)	35
4.4.2 Připínání odporníku	36
4.4.3 Metoda částečných výbojů	36
4.4.4 Metoda q_u - diagramu	37
4.4.5 Švédská neutrála	37
5 ZPŮSOBY KOMPENZACE KAPACITNÍCH PROUDŮ V SÍTÍCH VN	39
5.1 KOMPENZACE ZEMNÍCH PROUDŮ	39
5.2 SÍŤ S UZLEM UZEMNĚNÝM PŘES REZISTOR	42
5.3 SÍŤ S PŘECHODNÝM UZEMNĚNÍM UZLU	44
5.4 BAUCHŮV TRANSFORMÁTOR	45
6 AUTOMATICKÉ LADĚNÍ ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK	46
6.1 ZHÁŠECÍ TLUMIVKA	46
6.2 LADĚNÍ ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK	48
ZÁVĚR	50
POUŽITÁ LITERATURA	51

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na napěťové a proudové poměry v sítích vysokého napětí. Práce je rozdělena do několika částí, z nich v úvodu jsou popsány základní pojmy. Dále jsou popsány způsoby provozu sítí z hlediska uzlu systému, na které navazuje rozbor napěťových a proudových poměrů. Dále jsou v práci popsány metody detekce zemního spojení, následují způsoby kompenzace kapacitních proudů a nakonec ladění zhášecích tlumivek.

Seznam symbolů

MN	Malé napětí
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvláště vysoké napětí
UVN	Ultra vysoké napětí
DS	Distribuční soustava
PS	Přenosová soustava
OZ	System opětného zapnutí
PTN	Přístrojový transformátor napětí
PTP	Přístrojový transformátor proudu
RCC	System od firmy Swedish Neutral
R [Ω]	Odpor
L [H]	Indukčnost
B [S]	Susceptance
G [S]	Konduktance (svod)
U_f [V]	Fázového napětí
U_C [V]	Napájecí napětí
R_p [Ω]	Odpor poruchy
U_0 [V]	Napětí uzlu proti zemi
I_{por} [A]	Poruchový proud
ω [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]	Úhlová rychlost
C_0 [F]	Kapacita proti zemi jedné fáze
I_{kap} [A]	Kapacitní proud sítě
$\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ [V]	Fázory napětí proti zemi
$\bar{U}_{fa}, \bar{U}_{fb}, \bar{U}_{fc}$ [V]	Fázory napětí
\bar{I}_a [A]	Proud fáze
k_{a0}, k_{b0}, k_{c0} [F]	Kapacity sítě k zemi
\bar{a} [-]	Operátor
k_0 [F]	Kapacitně souměrná síť
\bar{I}_p [A]	Zemní poruchový proud

\bar{U}_A [V]	Nesymetrický fázor napětí
\bar{U}_{A1} [V]	Napětí sousledné složky
\bar{U}_{A2} [V]	Napětí zpětné složky
\bar{U}_{A01} [V]	Napětí netočivé složky
\bar{U}_F [V]	Nesymetrická soustava fázorů
\bar{U}_S [V]	Symetrická soustava fázorů
\bar{F} [-]	Transformační matice
G_0 [S]	Svodový odpor jedné fáze vedení
I_R [A]	Jmenovitý proud uzlového rezistoru
I_L [A]	Kompenzační proud tlumivkou
L_{rez} [H]	Indukčnost při rezonanci
$U_{0 rez}$ [V]	Napětí při rezonanci

1 Síť a soustavy

Elektrické napětí je určeno jako práce vykonaná elektrickými silami při přemísťování elektrického náboje mezi dvěma body v prostoru.

Elektrotechnické normy a předpisy dělí elektrické napětí podle velikosti do následujících **napěťových stupňů**:

- Malé napětí, **mn**, do 50 V
- Nízké napětí, **nn**, 50 V až 1000 V
- Vysoké napětí, **vn**, 1000 V až 52 kV
- Velmi vysoké napětí, **vvn** 52 kV až 300 kV
- Zvláště vysoké napětí, **zvn** 300 kV až 800 kV
- Ultra vysoké napětí, **uvn** více než 800 kV

Normalizovaná řada napětí (ČSN 33 0120):

Nízké napětí (nn) [kV]	jmenovité	0,4 / 0,23			0,50	0,69
	max. provozovací	0,42 / 0,241			---	0,73
Vysoké napětí (vn) [kV]	jmenovité	3	6	10	22	35
	max. provozovací	3,6	7,2	12	25	37
Velmi vysoké napětí (vvn) [kV]	jmenovité	110		220	---	---
	max. provozovací	123		245	---	---
Zvláště vysoké napětí (zvn) [kV]	jmenovité	400			750	
	max. provozovací	420			787 (předpokládá se zvýšení na 800)	

Každá napěťová úroveň má udanou jmenovitou hodnotu a maximální provozovací hodnotu, tj. nejvyšší napětí, při kterém lze síť trvale provozovat. Obě tato napětí jsou efektivní hodnoty sdružených napětí.

Elektrizační soustava je vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek, přímých

vedení, a systémy měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky, a to na území České republiky. [1]

Distribuční soustava je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení o napětí 110 kV, s výjimkou vybraných vedení a zařízení o napětí 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy, a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV nebo 35 kV sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území České republiky, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky včetně elektrických přípojek ve vlastnictví provozovatele distribuční soustavy; distribuční soustava je zřizována a provozována ve veřejném zájmu. [1]

Přenosová soustava je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 400 kV, 220 kV a vybraných vedení a zařízení 110 kV, sloužící pro zajištění přenosu elektřiny pro celé území České republiky a propojení s elektrizačními soustavami sousedních států, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky; přenosová soustava je zřizována a provozována ve veřejném zájmu. [1]

Základním úkolem přenosových sítí je propojení uzlů, do kterých je elektrická energie přiváděna z výrobních jednotek (elektráren) a uzlů, ze kterých je přenášena do rozvodných soustav tak, aby rozložení výkonu bylo v celé oblasti optimální z hlediska nákladů na výrobu i přenos. Tato síť je vzhledem ke svému dominantnímu postavení nazývána přenosová (nadřazená) soustava.

Rozvodné (distribuční) sítě umožňují přivedení elektrické energie spotřebitelům. Do těchto sítí jsou připojovány pouze výrobní zdroje malých výkonů. Jsou to malé průmyslové elektrárny, kogenerační jednotky a obnovitelné zdroje využívající energii vody, větru, biomasy, slunce. Základním zdrojem elektrické energie pro distribuční sítě je nadřazená soustava.

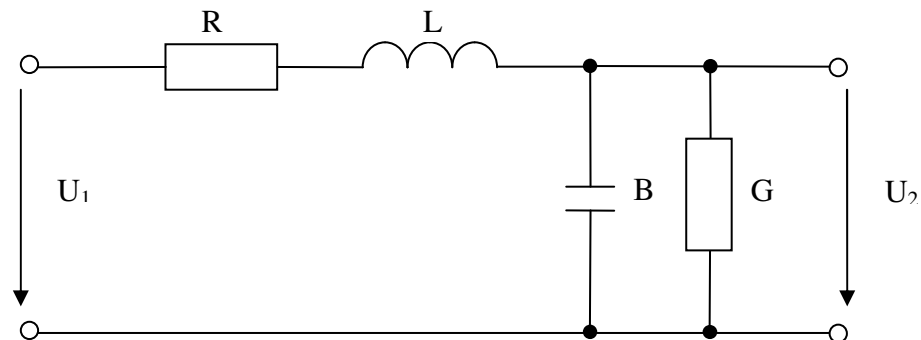
Elektrická síť je soubor galvanicky spojených elektrických vedení, elektrických částí strojů a přístrojů stejného napětí. Jsou to například i příslušná vinutí silových transformátorů, přístrojových transformátorů apod. [9]

1.1 Parametry vedení

Parametry vedení jsou:

- R činný odpor [Ω/km]
- L induktivní reaktance [Ω/km]
- B kapacitní susceptance [S/km]
- G svod [S/km]

R a L jsou podélné parametry vedení, B a G jsou příčné parametry vedení.



Obr 1: Náhradní schéma vedení

U vn vedení není příliš velký rozdíl mezi velikostí R a L, proto nezanedbáváme ani jeden z těchto parametrů. Svod G je velmi malý oproti B, proto ho lze zanedbat. V sítích vn je při výpočtu v ustáleném bezporuchovém stavu možné zanedbat i kapacitní susceptanci, protože proud příčnými admitancemi je zanedbatelný oproti přenášenému provoznímu proudu.

2 Způsob provozu sítí VN z hlediska uzlu systému

Nulový bod sítě (uzel sítě) je myšlený bod v trojúhelníku fázorů sdružených napětí, ke kterému jsou fázová napětí vyvážena.

Sítě vysokého napětí jsou vystaveny vlivům přepětí, atmosférickým vlivům, atd., které ovlivňují bezporuchový chod. Následkem těchto vlivů vznikají izolační vady jednotlivých fází, zejména proti zemi, kterým se říká **zemní spojení**. Hlavním rozdílem mezi zemním spojením a jednofázovým zkratem je, že v místě zemního spojení prochází pouze malý poruchový proud kapacitního charakteru, ale zkratový proud bývá většinou větší než provozní proud a má indukční charakter.

V třífázových sítích provozovaných s přímo uzemněným uzlem nazýváme vodivé spojení jedné fáze se zemí jednofázovým zkratem. V třífázových sítích provozovaných s izolovaným uzlem, popř. v sítích kompenzovaných (tj. v sítích, jejichž uzel je spojen se zemí přes zhašecí tlumivku) nazýváme vodivé spojení jedné fáze se zemí zemní spojení.

Zemní spojení je spojení kteréhokoliv bodu izolované nebo kompenzované sítě se zemí, v jehož důsledku vzniká napětí mezi uzlem sítě a zemí vyšší než 33% U_f .

Pokud poruchový proud přesáhne hodnotu asi 5A u sítí s větší rozlohou, vzniká při zemních spojeních zpravidla oblouk. Při nestabilním hoření oblouku, zejména při přerušovaném zemním spojení, vzniká nebezpečné přepětí. Na zdravých fázích se mohou objevit napětí až $(4 - 4,5) U_f$, kde U_f je efektivní hodnota fázového napětí. [8]

Pro síť vn je dočasné přepětí do $1,7 U_C$ (U_C je dohodnuté napájecí napětí) v sítích s uzlem účinně uzemněným nebo uzemněným přes impedanci a do $2 U_C$ v soustavách izolovaných nebo rezonančně uzemněných (uzel transformátoru uzemněn přes kompenzační tlumivku). [5]

Kompenzace zemních kapacitních proudů je omezování zemního kapacitního proudu v elektrických sítích vysokého napětí, tekoucích místem zemního spojení, pomocí proměnné indukčnosti (tlumivky) zapojené mezi nulový bod (uzel) sítě a zem. [9]

Podle charakteru z hlediska kompenzace zemních proudů se v elektrických sítích rozlišují :

- a) venkovní síť
- b) kabelové síť
- c) smíšené síť – podíl venkovních vedení je větší než 0,1 a podíl kabelových vedení je větší než 0,02 celkové délky sítě [9]

Spojení uzlu se zemí se projeví při nesymetrických stavech a přechodných jevech. U symetrických sítí bez poruch se spojení uzlu se zemí příliš neprojeví. Týkají se zejména velikosti a charakteru proudů zemních poruch a napětí fází proti zemi.

Jednotlivé soustavy se rozlišují také podle způsobu spojení uzlu vinutí transformátoru se zemí:

- a) účinně uzemněné - zvn, vvn
- b) izolované - vn, 500 V, příp. 690 V
- c) neúčinně uzemněné - vn

Zemní spojení může nastat v sítích s neúčinně uzemněným uzlem nebo izolovaným uzlem. U neúčinně uzemněných sítí jsou nulové body transformátoru uzemněny přes velkou impedanci.

Vinutí vvn transformátorů v přenosové i distribuční soustavě má uzly účinně uzemněny. Převažující způsob zemnění uzlu v našich distribučních sítích vn, kde je převaha venkovních vedení, je zemnění uzlu přes zhášecí tlumivku. Malé distribuční síť vn, síť vn průmyslových závodů a vlastních spotřeb elektráren a tepláren jsou provozovány s izolovaným uzlem. U kabelových sítí vn velkých měst se rozšiřuje používání uzemnění uzlu přes odpor. Nízké napětí 400 V má uzemněný uzel a současně vyvedený nulový vodič.

Podle velikosti přechodového odporu v místě zemního spojení a druhu poruchy se rozlišují:

- a) odporová zemní spojení – hodnota přechodového odporu je řádově několik set až tisíc Ω
- b) oblouková zemní spojení – hodnota přechodového odporu je tvořena převážně odporem oblouku a dosahuje hodnot desítek až stovek Ω

- c) kovová zemní spojení – hodnota přechodového odporu je téměř nulová, jen několik Ω

Podle doby trvání těchto stavů se rozlišují:

- a) mžiková zemní spojení – do 5 s
- b) krátkodobá zemní spojení – od 5 s do 10 min
- c) přerušovaná zemní spojení - mžiková nebo krátkodobá zemní spojení několikrát po sobě se opakující
- d) trvalá zemní spojení – až do okamžiku odstranění, zpravidla několik hodin (nad 10 minut)

2.1 Sít' vn s izolovaným uzlem

Sítě s izolovaným uzlem nemají uzel vinutí transformátoru spojen se zemí. U symetrické sítě bez poruch má uzel proti zemi téměř nulové napětí.

Při poruše se symetrie impedancí proti zemi a tím i napětí proti zemi poruší. Ke změně dojde i u velikostí kapacitních proudů v jednotlivých fázích. Místem poruchy teče do země proud, který se vrací přes kapacity zdravých fází a přes napájecí transformátor.

Pro zemní spojení s malým přechodovým odporem ($R_p \rightarrow 0$, kovové zemní spojení) platí, že napětí uzlu proti zemi se rovná fázovému napětí, tedy $U_0 = U_f$ a poruchový proud $I_{por} = j3\omega C_0 U_f$ (má kapacitní charakter, C_0 je kapacita proti zemi jedné fáze uvažované celkové délky sítě, tj. délky všech vedení připojených k příslušnému uzlu), a jeho velikost, tedy $I_{por} = 3\omega C_0 U_f$ se označuje jako kapacitní proud sítě I_{kap} a je i měřítkem pro volbu způsobu provozu uzlu (z hlediska neúčinného uzemnění). [2]

Velikost kapacitních proudů u sítí se určuje obvykle výpočtově podle délky jejich vedení a měrných velikostí kapacitních proudů. U kabelových vedení jsou měrné kapacity mnohonásobně vyšší než u venkovních vedení.

Používání izolovaného uzlu je omezeno na malé sítě. Norma připouští mezní rozsah 20 A kapacitního proudu, od rozsahu 10 A již doporučuje kompenzaci zemních kapacitních proudů. Výhodou sítí s izolovaným uzlem je jednoznačné vyhodnocení vývodu se zemním spojením a možnost provozování sítě se zemním spojením po dobu vyhledání poruchy.

2.2 Kompenzovaná síť vn

Je-li uzel sítě spojen se zemí přes zhášecí tlumivku, pak při nesymetrii fázových napětí proti zemi protéká zhášecí tlumivkou proud, který má induktivní charakter. Při vhodné velikosti indukčnosti zhášecí tlumivky její proud při zemní poruše snižuje výsledný proud místem zemní poruchy, kompenzuje součet proudů fázových kapacit. Výsledný poruchový proud má složku danou rozdílem kapacitního proudu sítě a induktivního proudu zhášecí tlumivky. Zhášecí tlumivka se používá v sítích, kde převažuje venkovní vedení.

Poruchový proud je u dobře vyladěné kompenzované sítě jednak mnohem nižší než kapacitní proud sítě, jednak má činný charakter. U obloukových zemních poruch jsou tím výrazně zlepšeny podmínky pro jejich samozhášení, oblouk se přerušuje bez znovuzápalů.

Pro $R_p = 0$ je $U_0 = U_f$. Pro proud v místě poruchy pak platí:

$$\bar{I}_{por} = \bar{U}_f \cdot j \cdot \left(3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega \cdot L} \right) \quad (2.1)$$

Tento vztah též vyjadřuje základní funkci zhášecí tlumivky, tj. snižování proudu místem zemního spojení kompenzací zemních kapacitních proudů. Pro $I_{kap} = I_L$ má poruchový proud nejmenší velikost, danou ztrátami ve zhášecí tlumivce a svodovými odpory sítě.

Sítě s kompenzovaným uzlem se používají u venkovních sítí vn s kapacitním proudem větším než 10 A. Jejich nevýhodou jsou náklady na zhášecí tlumivku a automatiku ladění. Pro docílení příznivých účinků kompenzace na samozhášení poruch je zapotřebí udržovat vyladěný stav sítě. Výhodou je možnost provozu se zemním spojením.

2.3 Uzemnění uzlu vn přes rezistor

Kompenzace zemních kapacitních proudů je účinná ve venkovních sítích, ale u kabelových sítí vn jsou poruchy převážně trvalé a zmenšení poruchového proudu nevede k „samozhášení“ poruch jako při obloukových poruchách u venkovních vedení.

Proto se v kabelových sítích používá uzemnění uzlu přes rezistor. Velikost rezistoru se volí tak, aby omezoval proudy zemních poruch na přijatelné hodnoty s ohledem na účinky poruchových proudů a zároveň zabezpečoval tlumení přepětí při zemních poruchách a umožňoval použití jednoduchých zemních ochran.

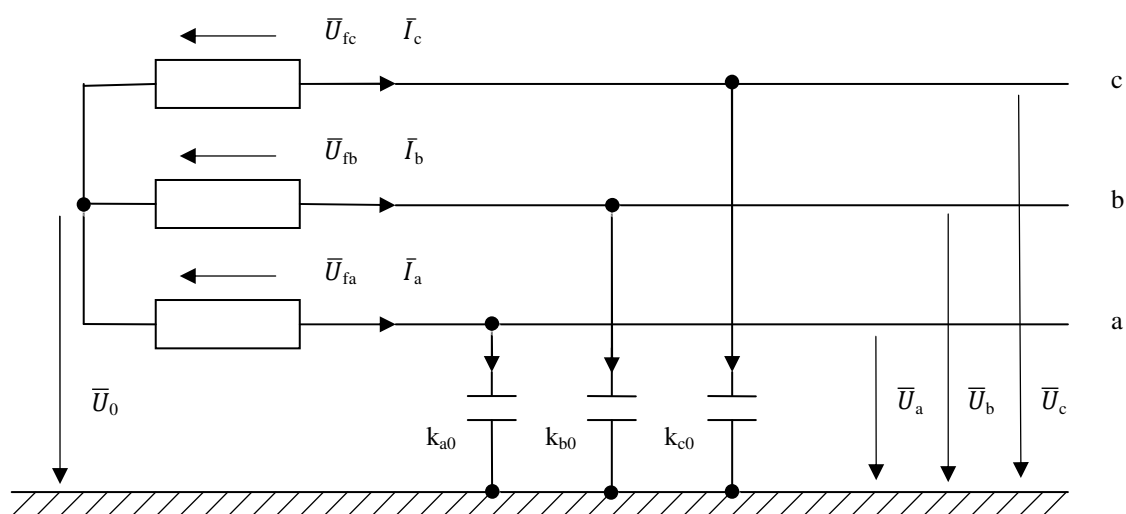
2.4 Sít' s přímo uzemněným uzlem

Přímo uzemněný uzel se používá v přenosových soustavách 400 kV i 220 kV, v distribučních sítích 110 kV a v sítích nn, kde má uzemnění uzlu také význam pro jednofázové rozvody. Výhodou je jednoznačné vyhodnocení vzniku poruchy, která se projevuje poklesem napětí a zvýšením proudu v porušené fázi. Možné je u sítí vvn použít jednopólový OZ (musí být vybavena vypínači se samostatně ovládanými póly). Nevýhodou je velikost poruchového proudu. Díky této skutečnosti je nutné poruchu neprodleně vypnout.

3 Rozbor napěťových a proudových poměrů

3.1 Sít' s izolovaným uzlem (bezporuchový stav)

Obr. 2 znázorňuje sít' s izolovaným uzlem před vznikem poruchy. Napětí zdroje uvažujeme symetrické a chod sítě naprázdno. Pro zjednodušení uvažujeme pouze kapacity sítě k zemi a ostatní parametry zanedbáváme.



Obr. 2: Trojfázová soustava s izolovaným uzlem [8]

Napětí a proudy dle Obr.2:

$$\bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} = 0$$

$$\bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} = 0$$

$$\bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} = 0 \tag{3.1.1.}$$

$$\bar{I}_a = j\omega k_{a0} \bar{U}_a$$

$$\bar{I}_b = j\omega k_{b0} \bar{U}_b$$

$$\bar{I}_c = j\omega k_{c0} \bar{U}_c \tag{3.1.2.}$$

Uzel je izolovaný:

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0 \tag{3.1.3.}$$

Dosazením získáme:

$$j\omega k_{a0}\bar{U}_a + j\omega k_{b0}\bar{U}_b + j\omega k_{c0}\bar{U}_c = 0 \quad (3.1.4.)$$

Vynásobíme rovnice (3.1.1.) $j\omega k_{a0}, j\omega k_{b0}, j\omega k_{c0}$:

$$\begin{aligned} j\omega k_{a0}\bar{U}_a - j\omega k_{a0}\bar{U}_0 - j\omega k_{a0}\bar{U}_{fa} &= 0 \\ j\omega k_{b0}\bar{U}_b - j\omega k_{b0}\bar{U}_0 - j\omega k_{b0}\bar{U}_{fb} &= 0 \\ j\omega k_{c0}\bar{U}_c - j\omega k_{c0}\bar{U}_0 - j\omega k_{c0}\bar{U}_{fc} &= 0 \end{aligned} \quad (3.1.5.)$$

Sečteme je a dostaneme:

$$\begin{aligned} j\omega(k_{a0}\bar{U}_a + k_{b0}\bar{U}_b + k_{c0}\bar{U}_c) - j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\bar{U}_0 - j\omega(k_{a0}\bar{U}_{fa} + k_{b0}\bar{U}_{fb} + \\ k_{c0}\bar{U}_{fc}) = 0 \end{aligned} \quad (3.1.6.)$$

První člen je nulový (viz 3.1.4.) a další dva můžeme uvažovat jako:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{fb} &= \bar{a}^2\bar{U}_{fa} \\ \bar{U}_{fc} &= \bar{a}\bar{U}_{fa} \end{aligned}$$

kde: $\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

$$\bar{a}^2 = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.1.7.)$$

Po úpravě dostaneme:

$$\bar{U}_0 = -\frac{k_{a0} + \bar{a}^2 k_{b0} + \bar{a} k_{c0}}{k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}} \bar{U}_{fa} \quad (3.1.8.)$$

Z předchozí rovnice (3.1.8.) vyplývá, že napětí izolovaného uzlu proti zemi je v kapacitně nesouměrné síti:

$$\bar{U}_0 \neq 0 \quad (3.1.9.)$$

V kapacitně souměrné síti je:

$$k_{a0} = k_{b0} = k_{c0} = k_0 \quad (3.1.10.)$$

Čitatel zlomku z rovnice (3.1.8.) je:

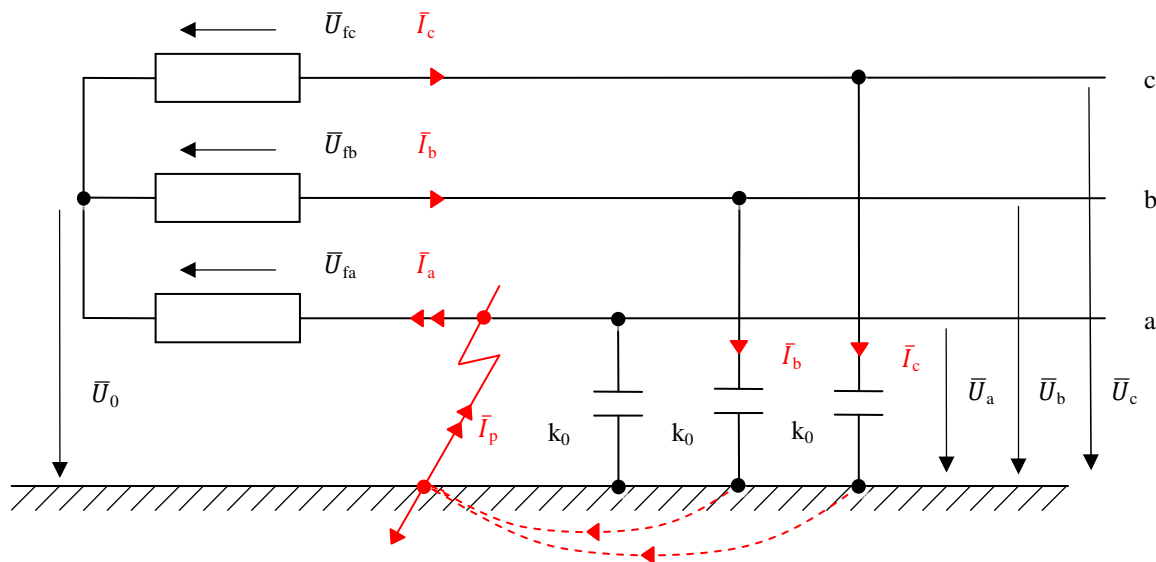
$$k_0(1 + \bar{a}^2 + \bar{a}) = 0 \quad (3.1.11.)$$

Při bezporuchovém stavu je napětí uzlu proti zemi:

$$\bar{U}_0 = 0 \quad (3.1.12.)$$

3.2 Sít' s izolovaným uzlem (dokonalé trvalé zemní spojení)

Na Obr. 3 je znázorněno schéma symetrické sítě při dokonalém (kovovém) zemním spojení. Poruchový proud je složen ze dvou proudů zdravých fází.



Obr. 3: Zemní spojení v souměrné síti [8]

Proudy a napětí dle Obr. 3:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_a = \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (3.2.1.)$$

$$\bar{I}_b = j\omega k_0 \bar{U}_b \quad (3.2.2.)$$

$$\bar{I}_c = j\omega k_0 \bar{U}_c \quad (3.2.3.)$$

$$\bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} = 0 \quad (3.2.4.)$$

$$\bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} = 0 \quad (3.2.5.)$$

$$\bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} = 0 \quad (3.2.6.)$$

Při dokonalém zemním spojení klesne napětí postižené fáze na nulu:

$$\bar{U}_a = 0 \quad (3.2.7.)$$

Napětí uzlu transformátoru stoupne na hodnotu záporného napětí postižené fáze (3.2.4.):

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \quad (3.2.8.)$$

Uvažujeme, že $\bar{U}_{fb} = \bar{a}^2 \bar{U}_{fa}$, pak:

$$\bar{U}_b = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fb} = (-1 + \bar{a}^2) \bar{U}_{fa} = -\sqrt{3} e^{j30^\circ} \bar{U}_{fa} \quad (3.2.9.)$$

Obdobně uvažujeme, že $\bar{U}_{fc} = \bar{a} \bar{U}_{fa}$, pak:

$$\bar{U}_c = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fc} = (-1 + \bar{a}) \bar{U}_{fa} = -\sqrt{3} e^{-j30^\circ} \bar{U}_{fa} \quad (3.2.10.)$$

Napětí nepostižených fází proti zemi stoupnou při dokonalém zemním spojení na sdruženou hodnotu.

Dosazením proudů do rovnice 3.2.1. dostáváme zemní poruchový proud:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega k_0 (\bar{U}_b + \bar{U}_c) \quad (3.2.11.)$$

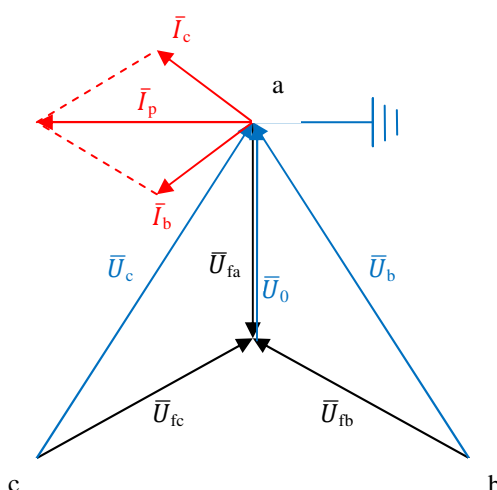
Dosazením napětí z rovnic 3.2.9. a 3.2.10. dostáváme:

$$\bar{I}_p = j\omega k_0 [(-1 + \bar{a}^2) + (-1 + \bar{a})] \bar{U}_{fa} = j\omega k_0 (-2 + \bar{a}^2 + \bar{a}) \bar{U}_{fa} \quad (3.2.12.)$$

Výsledná rovnice zemního poruchového proudu:

$$\bar{I}_p = -3j\omega k_0 \bar{U}_{fa} = 3j\omega k_0 \bar{U}_0 \quad [\text{A}; \text{s}^{-1}, \text{F}, \text{V}] \quad (3.2.13.)$$

Poruchový proud je součtem kapacitních proudů zdravých fází a předbíhá napětí uzlu soustavy o $\pi/2$.

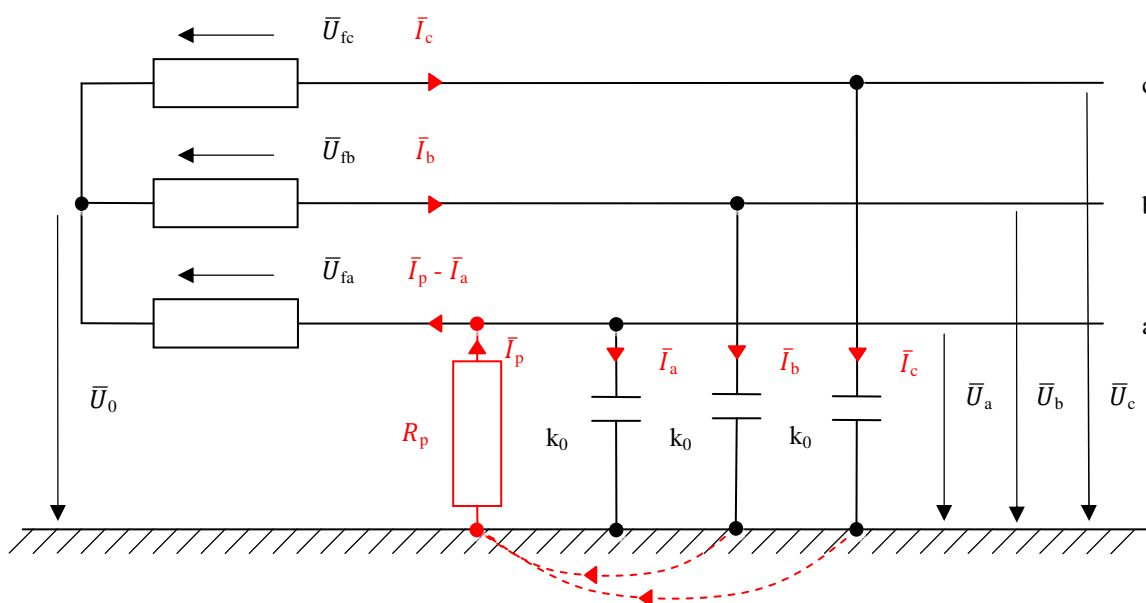


Obr. 4: Napěťové a proudové poměry při trvalém dokonalém zemním spojení [8]

Velikost poruchového zemního proudu zde téměř nezávisí na vzdálenosti místa poruchy od transformátoru.

3.3 Sít' s izolovaným uzlem (odporové zemní spojení)

O odporovém zemním spojení uvažujeme, pokud je hodnota přechodového odporu v místě poruchy řádově několik set Ω .



Obr. 5: Odporové zemní spojení [8]

Napětí a proudy dle Obr.5:

$$\bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} = 0$$

$$\bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} = 0$$

$$\bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} = 0 \tag{3.3.1.}$$

$$\bar{I}_a = j\omega k_{a0} \bar{U}_a$$

$$\bar{I}_b = j\omega k_{b0} \bar{U}_b$$

$$\bar{I}_c = j\omega k_{c0} \bar{U}_c \tag{3.3.2.}$$

Poruchový proud:

$$\bar{I}_p = -\frac{\bar{U}_a}{R_p} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega k_{a0}\bar{U}_a + j\omega k_{b0}\bar{U}_b + j\omega k_{c0}\bar{U}_c \quad (3.3.3)$$

Vynásobíme rovnice (3.3.1.) $j\omega k_{a0}$, $j\omega k_{b0}$, $j\omega k_{c0}$, sečteme je a dostaneme:

$$j\omega(k_{a0}\bar{U}_a + k_{b0}\bar{U}_b + k_{c0}\bar{U}_c) - j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\bar{U}_0 - j\omega(k_{a0}\bar{U}_{fa} + k_{b0}\bar{U}_{fb} + k_{c0}\bar{U}_{fc}) = 0 \quad (3.3.4)$$

První člen je roven poruchovému proudu a napětí $\bar{U}_a = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fa}$, pak:

$$\bar{U}_0 = -\frac{j\omega(k_{a0} + \bar{a}^2 k_{b0} + \bar{a} k_{c0}) + R_p^{-1}}{j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) + R_p^{-1}} \bar{U}_{fa} \quad (3.3.5)$$

Při $R_p = 0$ je dokonalé zemní spojení, kde $\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa}$.

Při $R_p = \infty$ je bezporuchový provozní stav, kde $\bar{U}_0 = 0$ (u kapacitně symetrické sítě).

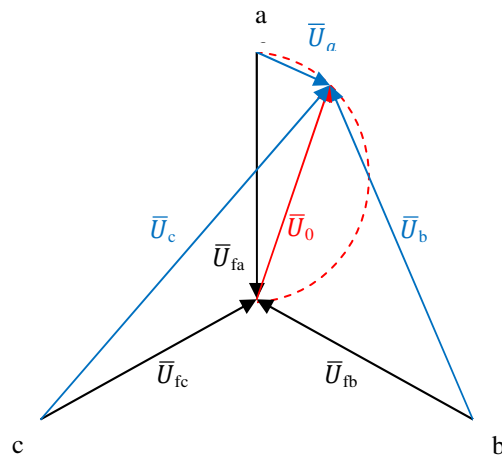
Napětí uzlu lze obecně vyjádřit jako funkci odporu poruchy R_p :

$$\bar{U}_0 = f(R_p)$$

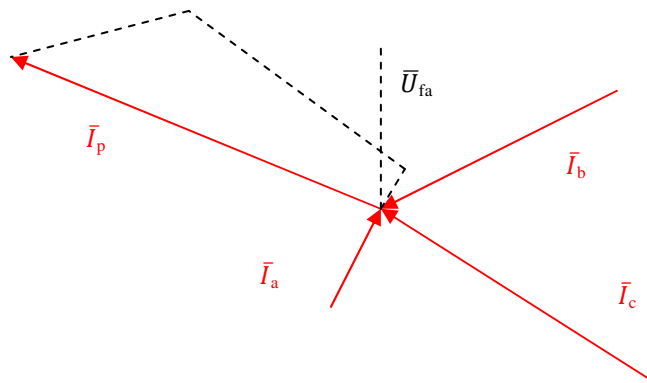
Poruchový proud kapacitně symetrické sítě:

$$\begin{aligned} \bar{I}_p &= \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega k_{a0}\bar{U}_a + j\omega k_{b0}\bar{U}_b + j\omega k_{c0}\bar{U}_c = j\omega k_0(\bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c) = \\ &= j\omega k_0[3\bar{U}_0 + (\bar{U}_{fa} + \bar{U}_{fb} + \bar{U}_{fc})] = 3j\omega k_0\bar{U}_0 = -3j\omega k_0\bar{U}_{fa} = \\ &= -3j\omega k_0\bar{U}_0 \frac{R_p^{-1}}{3j\omega k_0 + R_p^{-1}} \end{aligned} \quad (3.3.6)$$

Pro široký rozsah hodnot odporu R_p opisuje konec vektoru \bar{U}_0 kružnici v Gaussově rovině. Za těchto okolností může napětí jedné zdravé fáze dosáhnout i větší hodnoty než sruženého napětí sítě. [8]



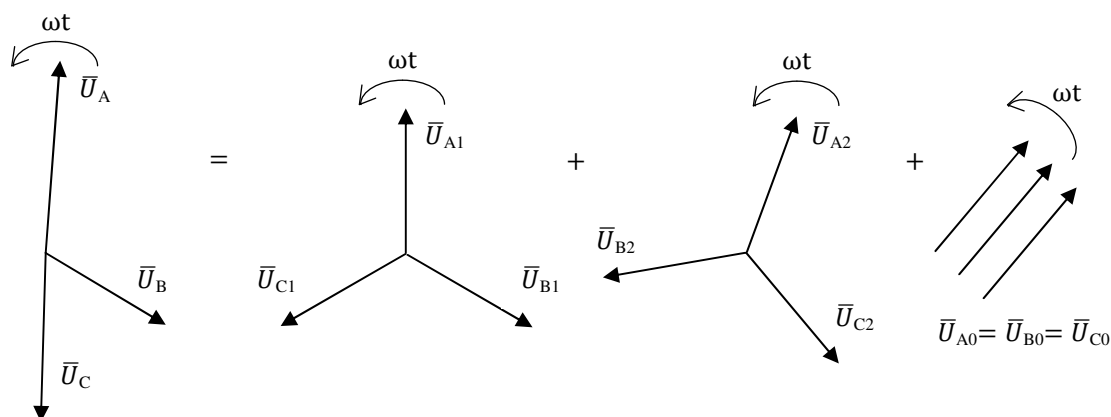
Obr. 6: Fázorový diagram napětí při odporovém zemním spojení



Obr. 7: Fázorový diagram proudů při odporovém zemním spojení

3.4 Metoda souměrných složek

V trojfázových soustavách lze každou hvězdiči nesymetrických fázorů nahradit složením symetrických fázorů sousledné (s indexem 1), zpětné (s indexem 2) a netočivé soustavy (s indexem 0) [5]:



Obr. 8: Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory [5]

Napětí dle Obr. 8:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{A1} + \bar{U}_{A2} + \bar{U}_{A0} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{B1} + \bar{U}_{B2} + \bar{U}_{B0} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2} + \bar{U}_{C0}\end{aligned}\tag{3.4.1}$$

Zvolíme-li fázi A referenční, dostaneme:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 + \bar{U}_0\end{aligned}\tag{3.4.2}$$

kde: $\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

$$\bar{a}^2 = e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0$$

$$\bar{a}^3 = 1$$

$$\bar{a}^4 = \bar{a}\tag{3.4.3}$$

Nesymetrickou soustavu fázorů označíme napětím \bar{U}_F a symetrickou soustavu fázorů napětím \bar{U}_S :

$$\bar{U}_F = \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \quad \bar{U}_S = \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} \quad (3.4.4.)$$

Soustavu rovnic (3.4.2) lze přepsat do maticového tvaru:

$$\bar{U}_F = \bar{F} \cdot \bar{U}_S \quad (3.4.5.)$$

kde \bar{F} je desymetrizační transformační matice:

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4.6.)$$

Jelikož determinant matice \bar{F} je různý od nuly:

$$\begin{aligned} |\bar{F}| &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{vmatrix} = \bar{a} + \bar{a}^4 + \bar{a} - \bar{a}^2 - \bar{a}^2 - \bar{a}^2 = 3(\bar{a} - \bar{a}^2) = \\ &= 3 \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 3j\sqrt{3} \neq 0 \end{aligned} \quad (3.4.7.)$$

lze provést inverzi matice a přejít od fázových hodnot k hodnotám souměrných složek:

$$\bar{U}_S = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{U}_F \quad (3.4.8.)$$

kde

$$\bar{F}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4.9.)$$

Maticové rovnici (3.4.8) odpovídá soustava rovnic:

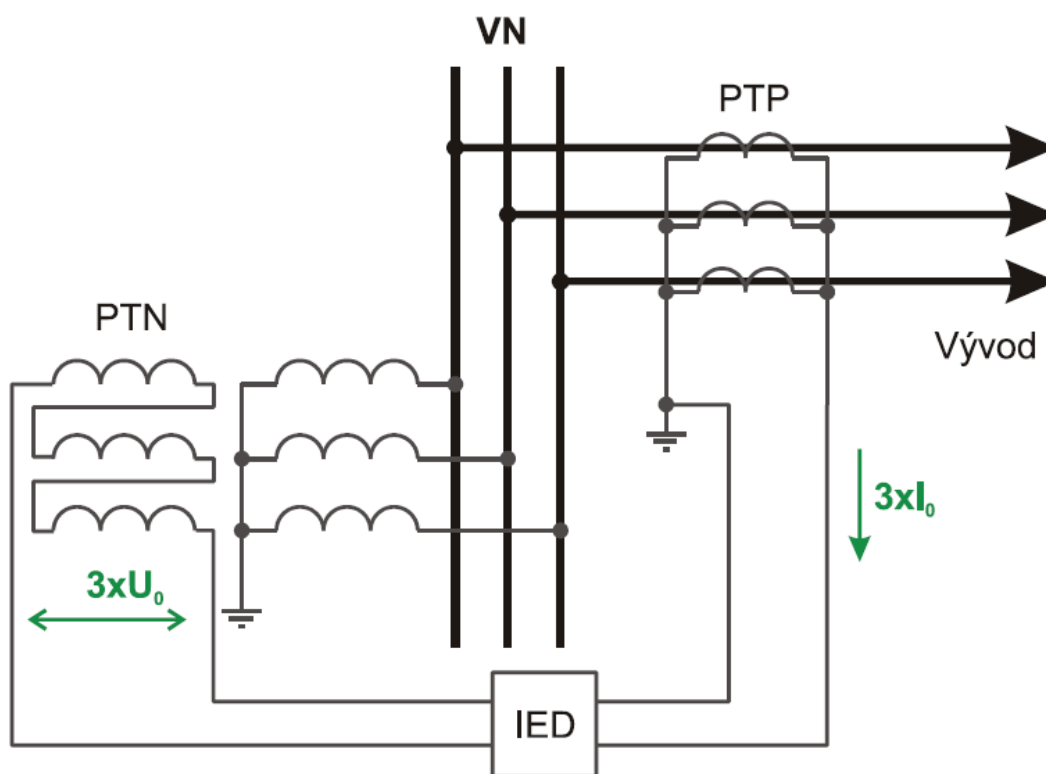
$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a}\bar{U}_B + \bar{a}^2\bar{U}_C) \\ \bar{U}_2 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a}^2\bar{U}_B + \bar{a}\bar{U}_C) \\ \bar{U}_0 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) \end{aligned} \quad (3.4.10.)$$

Obdobně lze postupovat i pro proudy.

4 Metody detekce místa zemního spojení v jednotlivých sítích VN

Metody detekce zemních poruch bývají založené na měření netočivých složek napětí a proudů v napájecích rozvodnách na jednotlivých vývodech.

Netočivá složka napětí bývá měřena pomocí tří přístrojových napěťových transformátorů PNT, kde je měřen trojnásobek netočivé složky napětí $3 \times U_0$. Netočivá složka proudu bývá měřena pomocí tří přístrojových proudových transformátorů PNP, kde je měřen trojnásobek netočivé složky proudu $3 \times I_0$.



Obrázek 9: Měření netočivé složky proudu a napětí v napájecí rozvodně [5]

U kompenzovaných soustav se zhašecí tlumivkou je měřena netočivá složka napětí automatikou, která měří přímo uzlové napětí.

Detekci zemních poruch lze dělit na metody, které rozpoznají zemní poruchu a na metody, které jsou schopné určit vývod se zemní poruchou. Pouhé rozpoznání zemní poruchy je dostačující u sítí s malými rozsahy, které mohou být se zemní poruchou provozovány.

Určení vývodu se zemním spojením lze dělit na způsob postupného odepínání jednotlivých vývodů (ručně nebo automaticky), nebo způsob měření jalových nebo činných netočivých složek výkonů jednotlivých vývodů.

Metoda postupného odepínání je velmi spolehlivá, ale vyžaduje složité provozní manipulace, proto byla dnes nahrazena ochranami, které vyhodnocují netočivé složky napětí a proudu.

V kompenzovaných sítích je zemní spojení v rozvodně zjišťováno pomocí zemních relé pro hlášení zemního spojení nebo jeho vypnutí. Pro správné fungování zemních relé je doporučeno vybavit zhášecí tlumivky zařízením pro zvyšování činného odporu v místě zemního spojení (například automatikou odporu a stavebnicovým odporníkem).

Automatika odporu je zařízení, které řídí připojování výkonového odporu k pomocnému vinutí zhášecí tlumivky. [9]

Stavebnicový odporník je výkonový odpor krátkodobě připojovaný k pomocnému vinutí zhášecí tlumivky. [9]

4.1 Statické a dynamické metody

Metody lokalizace zemního spojení u kompenzovaných a izolovaných soustav lze rozdělit do dvou hlavních skupin, a to na aktivní a pasivní metody.

Aktivní metody využívají k lokalizaci zemního spojení pomocného signálu se specifickou frekvencí, který je injektován do soustavy v případě poruchy a následným „stopováním“ tohoto signálu dojde k lokalizaci poruchy. [5]

Rozšířenější než aktivní metody jsou metody pasivní, které využívají napěťových a proudových signálů generovaných přímo sledovanou poruchou (zemním spojením) a nepotřebují tedy ke své funkci žádné uměle injektované signály. Parametry napětí a proudů mohou být vyhodnocovány během přechodného děje při zemním spojení nebo po jeho odeznění, proto lze tyto pasivní metody rozčlenit dále na metody statické, využívající ustáleného signálu (po odeznění přechodného děje), dále na metody dynamické využívající signál během přechodového děje a na metody vyhodnocující signál v ustáleném stavu, které jsou pro selektivní působení napojeny na řídicí a pomocné obvody zhasací tlumivky. [5]

4.2 Statické metody vhodné pro izolované distribuční soustavy

4.2.1 Amplituda fázového napětí a netočivé složky napětí

V kompenzovaných soustavách se při zemní poruše snižuje napětí porušené fáze a dochází ke zvýšení netočivé složky napětí, což se využívá pro detekci zemní poruchy. Metodami využívajícími napětí lze určit zemní poruchu, ale je obtížné určit místo zemní poruchy.

4.2.2 Porovnání amplitudy netočivých složek proudu

Metoda vyhodnocuje amplitudy netočivých složek proudů v jednotlivých vývodech. Je-li vlivem poruchy překročena přednastavená hodnota netočivého napětí, začnou se porovnávat amplitudy netočivých složek proudů jednotlivých vývodů. Jako postižené vedení je poté označeno to, u kterého je amplituda maximální. Nevýhodou této metody je její nízká citlivost a nutnost velmi přesného měření netočivé složky proudu obzvláště v případech, kdy se kapacita postiženého vývodu blíží celkové kapacitě soustavy (délka postiženého vedení značně převyšuje délku ostatních vedení) nebo při vysoko-impedančních zemních spojeních. [5]

4.2.3 Porovnání skupin amplitud a fáze netočivých složek proudů

Přesnost lokalizace zemního spojení se zvýší kombinací dvou předcházejících metod. V první fázi se vyberou vývody s nejvyšší amplitudou netočivé složky proudu, u těchto vytypovaných vývodů se poté provede porovnání fáze netočivé složky proudu. Vývod, který má opačnou fázi netočivé složky proudu, je označen jako postižený. Budou-li mít všechny vývody stejnou fázi, došlo k poruše v rozvodně. Dojde-li k vysoko-impedančnímu zemnímu spojení v soustavě, která obsahuje vedení krátkých délek, není ani tato kombinace metod stoprocentně funkční a může tak dojít k chybnému označení postiženého vývodu. [11]

4.2.4 Určení toku netočivé složky jalového výkonu

U postiženého vývodu předbíhá netočivá složka napětí netočivou složku proudu o 90° , u nepostiženého vývodu se netočivá složka napětí opožďuje o 90° oproti proudu. Tato metoda vyhodnocuje tok jalového výkonu, respektive jeho znaménka. Je-li znaménko jalového výkonu na vývodu záporné, označí se vývod jako postižený a naopak, je-li znaménko jalového výkonu kladné, je vývod nepostižený. Výhodou proto je, že není nutné výkon porovnávat s ostatními vývody, ale problém se správnou lokalizací u poruch s malým netočivým proudem přetrvává. [12]

4.2.5 Metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu

V bezporuchovém stavu se pro jednotlivé vývody vybere referenční signál netočivé složky proudu společně s fázovým posunem netočivé složky napětí a po vzniku zemního spojení se vyhodnotí jejich změna. Postižený vývod je poté ten, u něhož byla změna jalové složky netočivého proudu ($\Delta I \sin \varphi$) maximální. Tento postup omezuje vliv nesymetrie na selektivitu metody. [12]

Všech pěti výše zmiňovaných pasivních metod se využívá v neúčinně izolovaných soustavách, ale díky kompenzaci kapacitního proudu je nelze použít v soustavách kompenzovaných, kde je použita tlumivka. Tuto společnou nevýhodu odstraňují následující metody.

4.3 Statické metody vhodné pro kompenzované distribuční soustavy

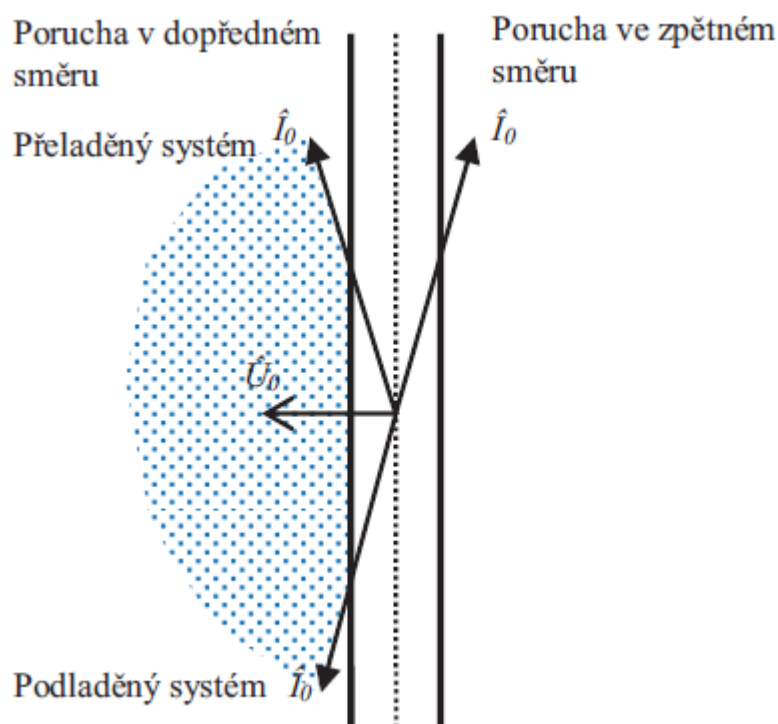
4.3.1 Metoda detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)

Jelikož nelze zcela vykompenzovat poruchový proud (vždy přetrvává zbytkový proud činného charakteru), lze pro lokalizaci poruchy v kompenzovaných sítích využít směru právě tohoto reziduálního proudu. U postiženého vývodu je činná složka netočivého proudu popřípadě činný výkon netočivé složky vyšší a má opačný směr než u ostatních nepostižených vývodů. Zásadní vliv na správnou funkci metody mají vhodně navržené měřicí proudové transformátory a velikost činné složky netočivého proudu.

Právě rozdílné chyby fáze a úhlu použitých PTP vzhledem k nízké úrovni reziduálního proudu (3 % – 10 % kapacitního proudu sítě) mohou zapříčinit neselektivní působení metody. Pro zvýšení úrovně činné složky netočivého proudu a tedy pro zvýšení citlivosti zemních ochran se nejen v České republice využívá krátkodobého připnutí pomocného odporu. Příklad charakteristiky detekující činnou složku netočivého proudu je zobrazen na Obr. 10. Jelikož se distribuční soustava běžně

nemusí provozovat zcela vykompenzovaná, ale může být mírně rozladěná, má netočivá složka proudu fázový posun dle charakteru provozu systému, jak je naznačeno na tomto obrázku. [12]

Wattmetrická metoda je dobrým řešením pro zemní poruchy s malým odporem, ale existují zde limity citlivosti pro detekci vysoko-impedančních poruch.



Obr. 10: Charakteristika wattmetrického článku [11]

4.3.2 Metoda páté harmonické

Hlavní význam zhášecí tlumivky v neúčinně uzemněných sítích je kompenzovat kapacitní zemní proud, zejména jeho první harmonickou. Díky nelineárním zařízením a vlivem zemního spojení v síti se mohou generovat harmonické, mezi kterými má významný podíl také pátá harmonická, která není kompenzována Petersonovou tlumivkou. Metoda využívá této páté harmonické pro citlivější lokalizaci místa poruchy, kde u postiženého vedení je pátá harmonická proudu větší než u nepostižených a má opačný směr. Jelikož pátá harmonická zemního proudu dosahuje velmi malých hodnot (max 10%), je metoda velmi závislá na korektním měření a vyváženosti proudových transformátorů. [13]

4.3.3 Metoda základní harmonické

Při jednofázovém zemním spojení se přes filtr propustí pouze základní harmonická netočivé složky proudu. Spočítá se zbytkový činný proud ze všech vývodů. Největší hodnota tohoto proudu pak určuje postižený vývod. U této metody odpadá sledování netočivé složky napětí, avšak je nutné velice přesné měření netočivé složky proudu. [11]

4.3.4 Metoda vyšších harmonických

Metoda je podobná jako u předchozí páté harmonické, ale před vyhodnocením se provede sumace 3., 5. a 7. harmonické. Korektní vyhodnocení není výrazně ovlivněno slabým výskytem páté harmonické. [13]

4.3.5 Admitanční princip netočivé složky

Vlivem zemního spojení se změní i admitance postiženého vedení. U této metody se porovnává netočivá admitance před a po poruše u všech vývodů. Jako postižený vývod je označen ten, u kterého dojde k největšímu nárůstu netočivé složky admitance. Citlivost této metody je vyšší než u předchozích metod. [13]

4.3.6 Metoda zpětné složky proudu

Zemní spojení vyvolá zpětnou složku proudu, která prochází postiženým vedením ve směru od místa zemního spojení k napáječi. Tato zpětná složka proudu je daleko nižší u nepostižených vedení než u postiženého. Dojde-li při zemním spojení k překročení přednastavené hodnoty, je vedení označeno jako postižené. Zpětná složka proudu je však silně závislá na symetrii systému a zátěži a proto je její získání obtížné. [11]

Využitelnost výše zmiňovaných metod vycházejících z vyhodnocení signálů až po ustálení přechodového děje není tak velká, jako v případě metod využívajících přechodového děje. Zásadní vliv na tento fakt má zhášecí tlumivka, která v ideálních případech zcela kompenzuje kapacitní zemní proud vyvolaný zemním spojením. Proto se může stát, že v některých případech je netočivá složka proudu u nepostiženého vývodu vyšší, než netočivá složka proudu postiženého vývodu, což vede poté k chybné lokalizaci a špatné účinnosti metody. [13]

4.4 Dynamické metody

Během začátku zemního spojení probíhá přechodný děj, který je možné využít k určení směru místa zemního spojení.

Dynamické metody se používají v kompenzovaných sítích. Mají vyšší citlivost než metody statické, ale nevýhodou dynamických metod je ve většině případů pouze jeden pokus pro korektní lokalizaci poruchy v krátkém časovém okamžiku.

4.4.1 Metoda první půlperiody (Whisherův princip)

Při vzniku zemního spojení dojde vlivem kapacit jednotlivých vývodů ke krátkému intenzivnímu přechodovému ději, během kterého dojde k vybití kapacity postižené fáze. Tento krátký vybíjecí proud je patrný v první půl-periodě od vzniku zemního spojení. Metoda pak porovnává fáze netočivé složky proudu a netočivé složky napětí. Je-li během první půl-periody od vzniku zemního spojení netočivá složka proudu a napětí ve fázi, jedná se o nepostižené vedení. A naopak je-li netočivá složka proudu a napětí v protifázi, jedná se o postižené vedení. Výhodou této metody je její využití v kompenzovaných neúčinně uzemněných sítích a dobře lokalizuje i oblouková zemní spojení. Nevýhodou pak je krátký časový interval pro korektní vyhodnocení. [13]

4.4.2 Připínání odporníku

Jelikož není výše zmiňovaná metoda u sítí s malou kapacitou stoprocentní, využívá se jako doplňující metody připínání odporníku. Tento odporník na krátkou chvíli zkratuje tlumivku, tím se změní impedance poruchové smyčky, jejímž důsledkem dojde ke změně napětových a proudových poměrů v síti a to následně umožní lokalizovat zemní spojení.

Pro určení postiženého vývodu se využívá odporníku, přes něhož je krátkodobě spojen nulový bod se zemí. Po vzniku zemního spojení se na krátkou chvíli připojí odporník (0,5 až 3 s) a vyhodnotí se proudové a napětové změny. Má-li po připojení odporníku difference amplitudy proudu postižené fáze kladné znaménko, jedná se o postižené vedení. V opačném případě se jedná o vedení nepostižené. Podobně jako u předchozí metody je možné lokalizovat zemní spojení i z netočivých složek napětí a proudu. Má-li po připojení odporníku difference amplitud netočivých složek stejné znaménko, jedná se o nepostižené vedení a mají-li difference napětí a proudu netočivé složky opačný směr, jedná se o postižené vedení (vývod). Nevýhodou této metody je navýšení proudového zatížení v místě poruchy avšak pomocí distančního principu pro nízko-impedanční poruchy je možné lokalizovat místo poruchy. [13]

4.4.3 Metoda částečných výbojů

Metoda zaměřená na indikaci poruchy uvnitř izolovaných vysokonapětových závěsných vodičů, kde je problém s detekcí zemního spojení vzhledem k dobrým izolačním vlastnostem závěsného vodiče obzvláště obtížný.

Nevýhodou je vyšší riziko porušení izolace účinky blesku. Při poruchách, kdy dojde ke kontaktu izolovaného vodiče se zemí nebo s větví stromu, dochází v místě styku ke vzniku částečných výbojů (uvnitř izolace, na povrchu izolace a korónové výboje). Detekce částečných výbojů nám poskytne informace o stavu izolace, avšak požadavky na měřicí techniku i způsoby vyhodnocení jsou vysoké. [11]

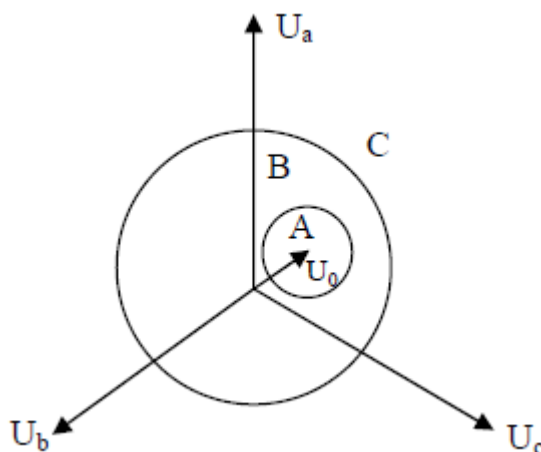
4.4.4 Metoda q_u - diagramu

Metoda vyhodnocuje grafickou závislost netočivé složky proudu (představující náboj q_0) na netočivé složce napětí.

Zdokonalením této metody vznikla metoda, která se nazývá metoda q_u^2 – diagramu. Tato metoda pro zvýšení citlivosti filtruje část netočivé složky proudu a napětí, která je způsobená nesymetrií systému či nelinearitou zátěží. [5]

4.4.5 Švédská neutrála

Švédská neutrála (Swedish Neutral, systém RCC) byla poprvé použita v r.1992 na švédském ostrově Gotland. Tento ochranný systém proti zemním poruchám indikuje jednofázové poruchy a následně automaticky kompenzuje zbytkový proud. Systém je zapojen do uzlu hvězdy napájecího vn transformátoru. Skládá se z prvků: pro indikaci zemního spojení, kompenzaci zbytkového proudu a určení místa ZS. Kompenzace zbytkového proudu umožňuje provoz bez nutnosti vypínání. Předností systému je rychlost odezvy na změnu kapacity sítě vn při změnách konfigurace napájených oblastí. [11]



Obr. 11: Polohová pásma nulového napětí U_0 [16]

Poloha napětí U_0 je určena aktuálními hodnotami nesymetrie, tlumení a rozladění. V bezporuchovém provozu se nulové napětí U_0 pohybuje v oblasti A. Při změnách v síti např. změně zapojení, se nulové napětí pohybuje v pásmu B. Vznik zemního spojení způsobí posun napětí U_0 do oblasti C. Nulová admitance se pro jednotlivé vývody počítá jako z podílů sumárního proudu I_0 a napětí U_0 . Tyto admitance pak odpovídají převážně kapacitním složkám jednotlivých vývodů vůči zemi. Při vzniku zemního spojení se v nepostižených vývodech tyto admitance nemění. Dále se k těmto nulovým admitancím zjišťuje odpovídající hodnota nastavení tlumivky a porovnává se s jejím aktuálním nastavením, v případě potřeby automatika zajistí přednastavení. Aktuální hodnota U_0 se pak nastaví jako referenční bod v oblasti A. V případě posunu napětí U_0 do oblasti C automatika přepíná na provoz se zemním spojením. Dojde k přeměření hodnot nulové admitance a postižený vývod se stanoví porovnáním hodnot z předchozího měření nulových admitancí (v bezporuchovém stavu) ve všech vývodech. Automatika připojí do sítě kompenzátor, který pomocí RCC vykompenzuje zbytkový proud. Aby se zjistilo, zda jde o přechodnou nebo stálou zemní poruchu, dojde ke krátkému odpojení kompenzátoru na předem stanovenou dobu. V případě trvalého zemního spojení se kompenzátor opět připojí. [16]

5 Způsoby kompenzace kapacitních proudů v sítích VN

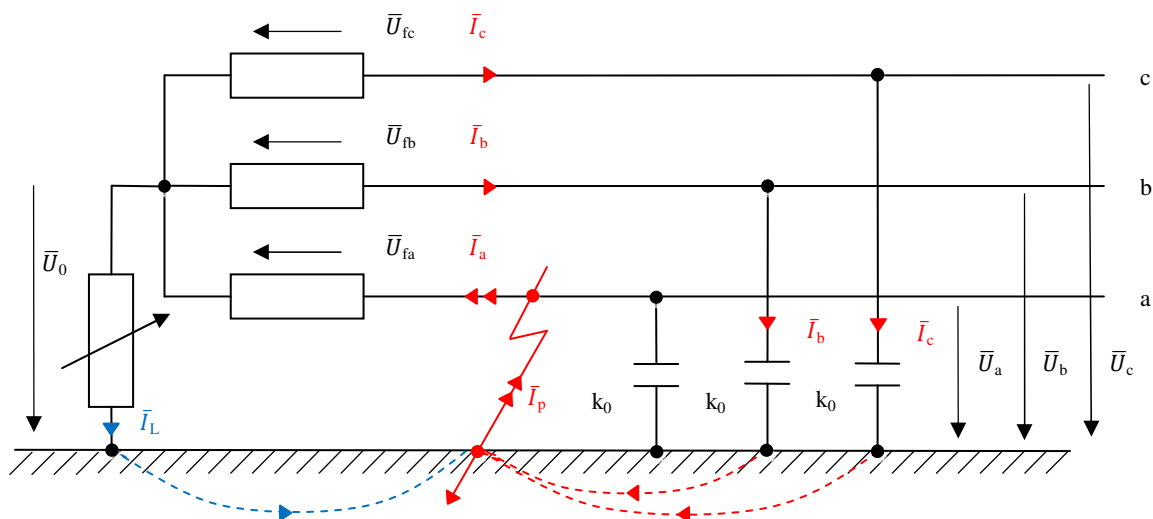
V normálním stavu sítě, tj. bez zemního spojení, protékají přes zemní kapacity a svodové odpory každé ze tří fází příslušné kapacitní a svodové proudy, které jsou buzeny fázovými napětími zdroje. V důsledku nesymetrie zemních kapacit a svodů je obvykle na uzlu sítě proti zemi malé napětí, které je při odpojené tlumivce obvykle nižší než 0,5 % U_f , při vyladěné zhášecí tlumivce dosahuje hodnot asi 10 % U_f . [9]

Při kovovém zemním spojení v síti má postižený pól (fáze) sítě potenciál země. Na zemních kapacitách a svodových odporech dvou neporušených fází se objeví sdružená napětí, takže jimi protékají zvýšené proudy, které se uzavírají místem zemního spojení a postiženou fází zpět ke zdroji. Uzel sítě a s ním i zhášecí tlumivka mají současně proti zemi fázové napětí, takže induktivní proud zhášecí tlumivky, který má v místě zemního spojení opačný směr než zemní kapacitní proud, tento kapacitní proud kompenzuje. [9]

5.1 Kompenzace zemních proudů

Nejpoužívanějším způsobem kompenzace zemních proudů je síť s uzemněným uzlem přes zhášecí tlumivku, která je zapojena mezi uzel transformátoru a zem.

Kompenzace je doporučena, pokud zemní proud převyšuje hodnotu 5A. Pokud zemní proud převyšuje hodnotu nad 10A je kompenzace nutná.

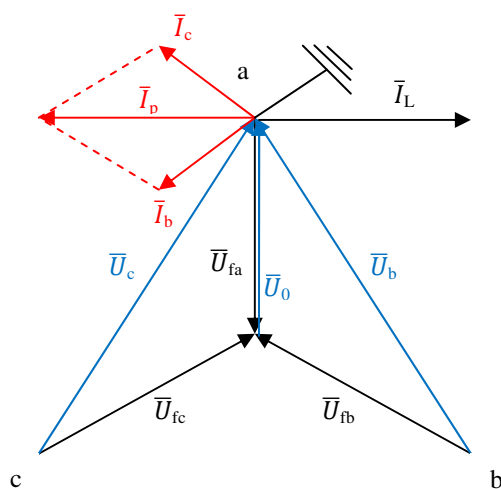


Obr. 12: Sít' s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku [8]

V kapacitně souměrné síti je při bezporuchovém chodu napětí uzlu $\bar{U}_0 = 0$ (při obvyklých nesymetriích $\bar{U}_0 < 0,01 U_f$). Při dokonalém zemním spojení je napětí uzlu $\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa}$ a proud tekoucí ideální zhášecí tlumivkou bude posunut o $\pi/2$ za napětím \bar{U}_0 :

$$\bar{I}_L = -j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} \quad (5.1.1.)$$

Proud tekoucí zhášecí tlumivkou teče proti kapacitním proudům zdravých fází, a pokud má správně nastavenou hodnotu, dojde ke kompenzaci zemních proudů.



Obr. 13: Fázorový diagram kompenzace zemního proudu

Při úplné kompenzaci je:

$$\bar{I}_L = -\bar{I}_p \quad (5.1.2.)$$

Poruchový proud je $\bar{I}_p = 3j\omega k_0 \bar{U}_0$, pak:

$$-j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} = -3j\omega k_0 \bar{U}_0 \quad (5.1.3.)$$

Vyjádřením indukčnosti dostaneme potřebnou indukčnost ideální zhášecí tlumivky pro úplnou kompenzaci zemního proudu:

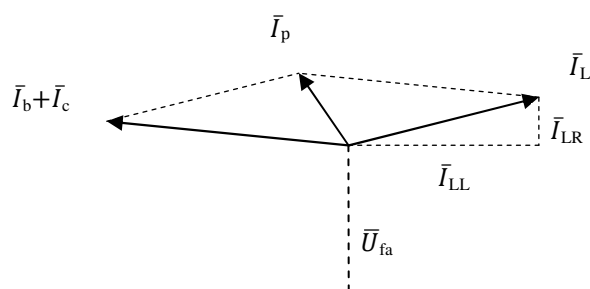
$$L = \frac{1}{3\omega^2 k_0} \quad [H; s^{-1}, F] \quad (5.1.4.)$$

V reálném prostředí teče místem poruchy zbytkový proud, který je složen z nevykompenzovaného proudu (nastavení indukčnosti zhášecí tlumivky není zcela přesné), nevykompenzovatelné činné složky (způsobená svody vedení), proudy vyšších harmonických a činným odporem zhášecí tlumivky. Při zbytkovém proudu menším než 5A je oblouk uhašen vlivem deionizace jeho dráhy.

Poruchový proud lze tedy vyjádřit jako:

$$\bar{I}_p = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j \left(3\omega k_0 - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \bar{U}_0 \quad (5.1.5.)$$

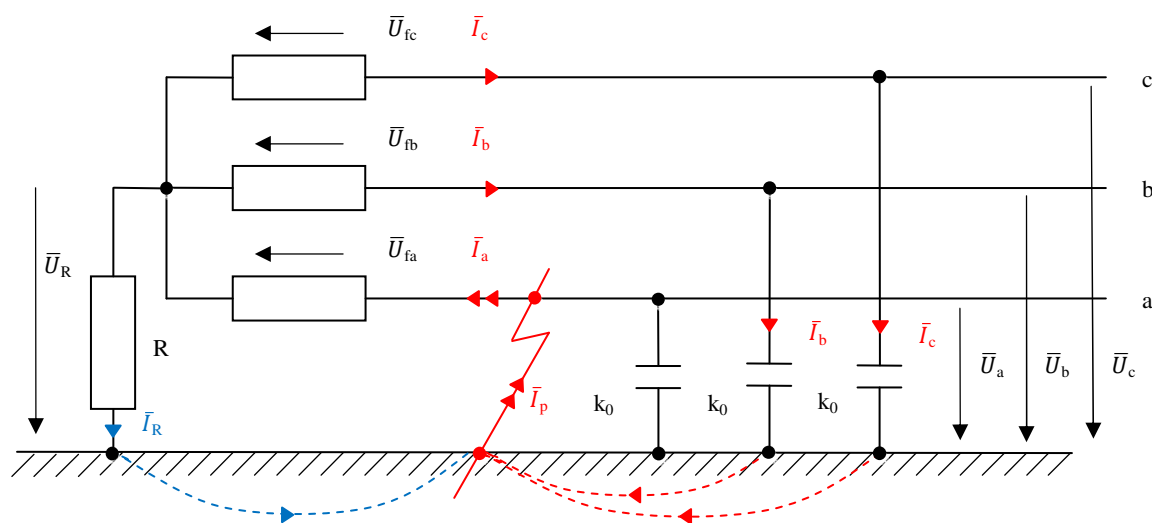
kde R_L je odpor tlumivky a G_0 je svodový odpor jedné fáze vedení.



Obr. 14: Fázorový diagram zbytkového proudu

V dobře vyladěné kompenzované síti je zbytkový proud výrazně nižší než kapacitní proud sítě a má činný charakter. U obloukových zemních poruch jsou poté značně zlepšeny podmínky pro „samozhášení“, kdy se oblouk přerušuje bez opětovných zápalů, s pomalým nárůstem napětí v postižené fázi. Nižší velikost zbytkového proudu kladně ovlivňuje nároky na uzemnění v síti.

5.2 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor



Obr. 15: Síť s uzlem uzemněným přes rezistor [8]

Uzel soustavy je uzemněn přes činný odpor. Při vzniku izolační poruchy v síti poklesne napětí na postižené fázi a napětí uzlu se zvýší téměř na hodnotu fázového napětí.

Použitím vhodné velikosti odporu v uzlu se omezí velikost poruchového proudu. Poruchový proud klesá se vzdáleností místa poruchy od transformátoru. Při jednofázovém zkratu protéká místem poruchy součet proudů kapacitního proudu celé sítě a činného odporu.

Pro tlumení přepětí je vyžadováno aby:

$$I_R \geq I_{kap} \quad (5.2.1.)$$

kde I_R je jmenovitý proud uzlového rezistoru a I_{kap} je kapacitní proud sítě.

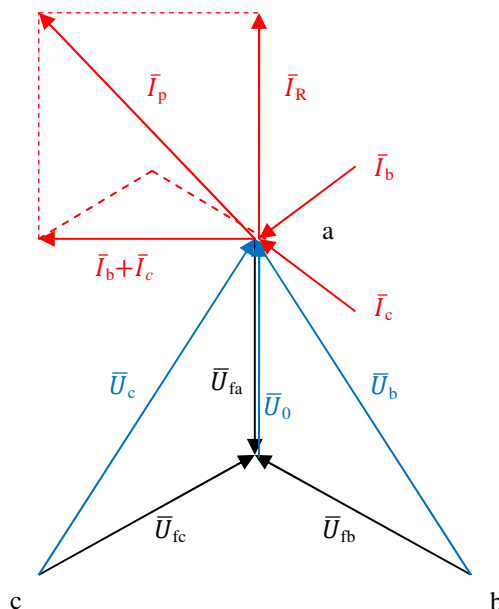
$$U_f/R \geq 3\omega k_0 U_f \quad (5.2.2.)$$

Odpor uzlového rezistoru je pak vyjádřen jako:

$$R \leq \frac{1}{3\omega k_0} \quad (5.2.3.)$$

Ideální maximální poruchový proud je součtem kapacitního proudu sítě a činného odporu:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_R + \bar{I}_{kap} = -\left(\frac{1}{R} + 3j\omega k_0\right) U_f \quad (5.2.4.)$$



Obr. 16: Fázorový diagram při zemní poruše v blízkosti transformátoru

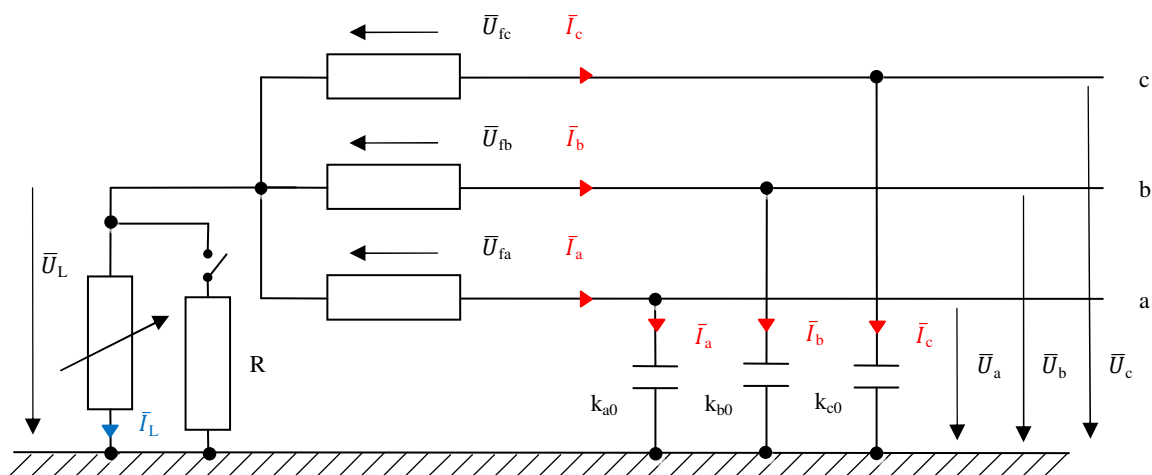
U kabelových vedení je mnoho poruch spjato s poškozením kabelu, kdy další provoz poškozeného kabelu je nežádoucí. Síť s uzlem uzemněným přes rezistor zajišťuje odpojení vývodu s poruchou, a to i při přechodné poruše.

U venkovních vedení bývají poruchy bez poškození vinutí a je tedy vhodné opětovné připojení vývodu.

U sítí s kapacitními proudy od 5A do 400A je provoz přes uzlový rezistor možný a přípustný, překročí-li kapacitní proudy sítě 350 až 400A, považuje se uzemnění přes rezistor za nutné.

5.3 Síť s přechodným uzemněním uzlu

Síť s přechodným uzemněním uzlu je síť s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde je při trvalém zemním spojení k tlumivce paralelně připojen rezistor.



Obr. 17: Síť s přechodným uzemněním uzlu [8]

Připojením rezistoru k tlumivce se zvýší poruchový proud, což má za následek zlepšení podmínek pro činnost zemních ochran.

Pro tlumení přepětí je vyžadováno aby:

$$I_R \geq I_{kap} \quad (5.3.1.)$$

kde I_R je jmenovitý proud uzlového rezistoru a I_{kap} je kapacitní proud sítě.

$$U_f/R \geq 3\omega k_0 U_f \quad (5.3.2.)$$

Odpor uzlového rezistoru je pak vyjádřen jako:

$$R \leq \frac{1}{3\omega k_0} \quad (5.3.3.)$$

K připojení rezistoru k tlumivce dochází automaticky při trvalých zemních spojeních. Pokud zemní spojení nezhasne samo, je rezistor připojen, po vyhodnocení měřicího obvodu automatiky, když napětí na měřicím vinutí zážecí tlumivky překročí zvolenou mez. Časové zpoždění mezi vznikem zemní poruchy a povelom na připojení

rezistoru je volitelné od 0,5 s do 10 s. Doba zapnutí rezistoru je rovněž seřiditelná, v mezích od 1 s do 3 s. Volí se tak, aby byla dostatečná pro působení zemních relé, případně překryla i přestávku rychlého OZ (systém opětného zapnutí).

Rozlišují se dva režimy, a to sítě se signalizací zemních spojení a sítě s vypínáním při zemních poruchách.

Při zemním spojení je předpoklad, že síť může být po určitou dobu provozována. Sepnutí rezistoru je tedy potřebné pouze na počátku zemního spojení pro zabezpečení spolehlivé činnosti zemních relé vývodů. Pokles napětí na zhášecí tlumivce pod nastavenou rozběhovou hodnotu na dobu delší než 10 s považuje automatika za ukončení zemního spojení, což vede k odblokování výstupu automatiky.

Pokud se u sítí s vypínáním při zemních poruchách objeví zemní spojení, a to i opakovaně, je nutné posílání impulsu k sepnutí rezistoru vždy. Automatika obsahuje tepelný model pro kontrolu tepelného ohrožení rezistorů. Při tepelném ohrožení rezistorů je výstup automatiky pro jeho zapnutí zablokován nebo přerušen.

5.4 Bauchův transformátor

V sítích s izolovaným uzlem plní Bauchův transformátor stejnou funkci jako zhášecí tlumivka. Jeho výhodou je, že může být připojen i na transformátor, který nemá vyveden nulový bod. Oproti tomu je nepoměrně nákladnější, proto se jeho používání v praxi nerozšířilo.

6 Automatické ladění zhášecích tlumivek

6.1 Zhášecí tlumivka

Zhášecí tlumivka, též nazývaná Petersenova tlumivka, je cívka s nastavitelnou indukčností připojená k uzlu transformátoru v napájecích rozvodnách.

Pokud není uzel transformátoru vyveden, připojí se zhášecí tlumivka na uzel uměle vytvořený trojfázovou nulovou tlumivkou nebo lze použít připojení zhášecí tlumivky k uzlu nezatíženého pomocného transformátoru v zapojení YN/d1. Připojují se k přípojnícím hlavní napájecí rozvodny se samostatnou výstrojí jako odběrová odbočka.

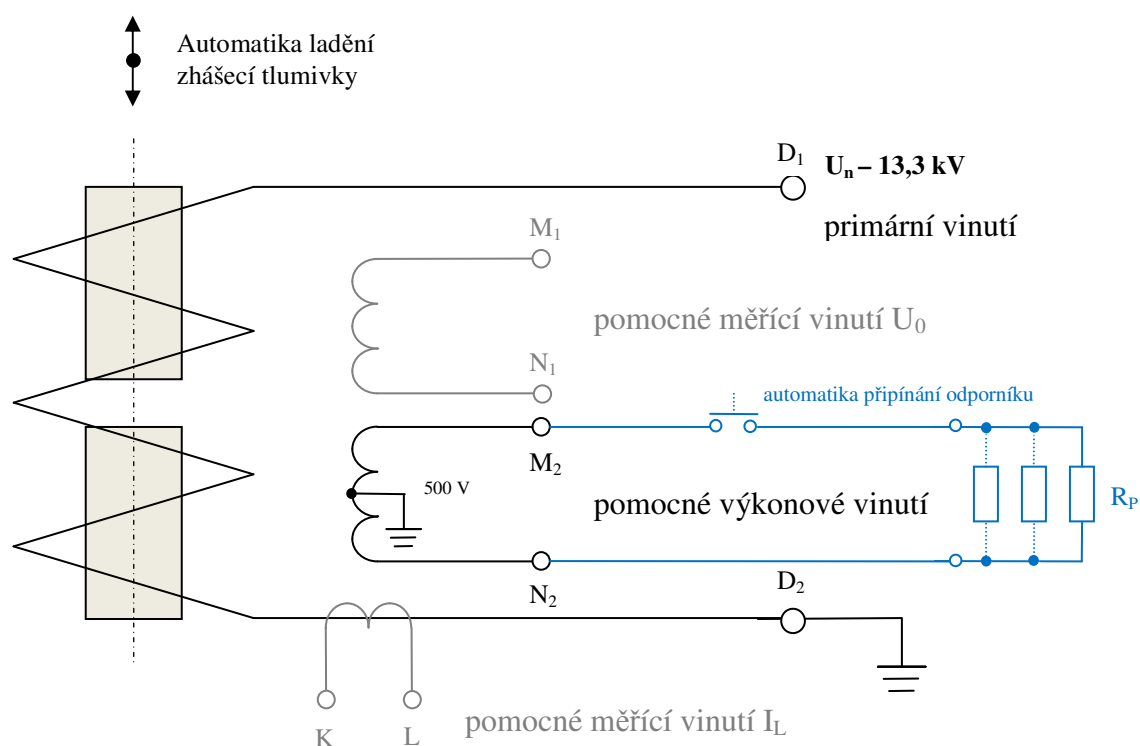
Pro správné nastavení proudu zhášecí tlumivky a indikaci vývodu se zemním spojením v síti je nutné pro každou tlumivku připojenou k transformátoru 110 kV/vn s kapacitním proudem venkovní nebo smíšené sítě větším než 50 A (pro menší než 50 A jsou nutné jen první tři) instalovat na rozvaděči v dozorně:

- a) tlačítka pro regulaci proudu zhášecí tlumivky
- b) elektrický ukazatel jejího proudového nastavení
- c) voltmetr s potlačeným koncem stupnice pro sledování nastavení vyladěného stavu
- d) samočinný regulátor pro vyladění zhášecí tlumivky
- e) automatiku odporu sloužící pro vyhledávání zemních spojení na vývodech
- f) u zhášecí tlumivky stavebnicový odporník, jehož odpor je připínán k pomocnému vinutí tlumivky nebo výkonový odpor připínaný paralelně ke vstupnímu vinutí zhášecí tlumivky [9]

Při poruše dodává Petersenova tlumivka induktivní proud do místa zemního spojení. V ideálním případě je induktivní proud roven kapacitnímu (ze dvou zdravých fází) a jejich účinky se vyruší. Ve skutečnosti není kapacitní proud plně kompenzován a místem zemního spojení protéká zbytkový proud.

Výhodou je možné provozování sítě se zemní poruchou.

Běžně používaná zhášecí tlumivka se skládá z primárního vinutí, dvou pomocných měřicích vinutí a jednoho výkonového vinutí. Primární vinutí s hodnotou napětí 13,3 kV je nastavováno automatikou ladění do požadovaného stavu kompenzace. Pomocné měřicí vinutí M_1N_1 slouží k měření uzlového napětí (netočivé složky napětí) U_0 . Pomocné měřicí vinutí KL je využíváno pro připojení přístrojového transformátoru proudu určeného k měření kompenzačního proudu. K pomocnému výkonovému vinutí M_2N_2 (s napětím 500 V) jsou připojovány pomocné (stavebnicové) odporníky. (Obr. 18)

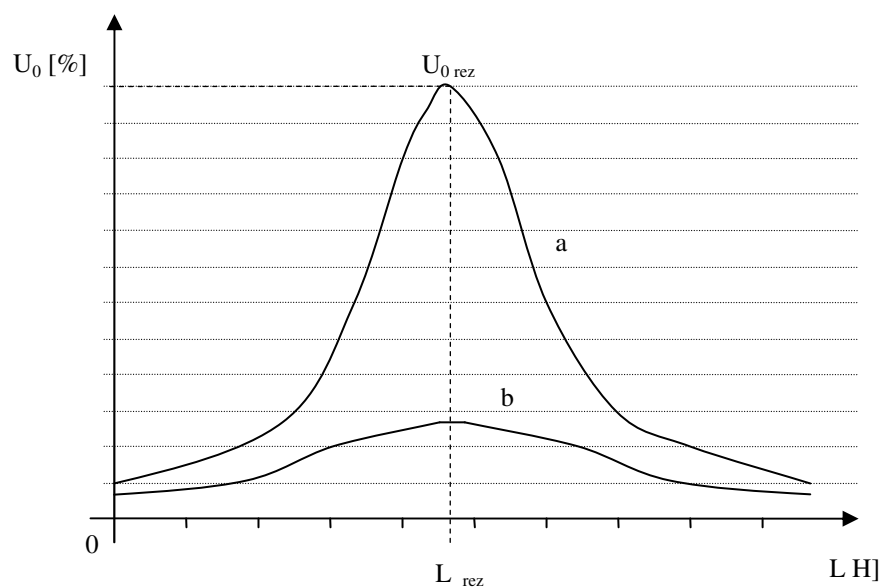


Obr. 18: Zjednodušené schéma zhášecí tlumivky s automatikou připínání pomocného odporníku k výkonovému vinutí [5]

6.2 Ladění zhášecích tlumivek

Ladění zhášecích tlumivek v našich sítích je většinou automatické, nastavováním indukčního proudu zhášecí tlumivky na co nejbližší hodnotu s kapacitním zemním proudem (rezonanci).

Rezonanční křivka je křivka odpovídající jisté kapacitní nesymetrii vedení (venkovní vedení - a) a vyjadřuje závislost napětí U_0 na proudu I_L . Zhášecí tlumivka, která je nastavená na minimální hodnotu proudu se připojí k síti bez zemního spojení a postupně jsou odečteny hodnoty nastaveného kompenzačního proudu I_L a uzlového napětí U_0 . Vyladění nastává při nejvyšším napětí na zhášecí tlumivce. Vlivem činných odporů je maximum omezeno.



Obr. 19: Rezonanční křivky pro venkovní (a) a kabelové vedení (b)

U kabelových sítí je nutné pro zajištění správné funkce zhášecí tlumivky vytvoření umělé nesymetrie soustavy (kabelové sítě mají dobrou symetrii fázových napětí). Čím je větší symetrie vedení, tím plošší je rezonanční křivka.

Pro správnou činnost automatiky ladění nesmí být napětí na tlumivce vyšší než 15% U_f . V rozvodnách bez automatiky ladění je nutná kontrola naladění po každé změně v síti.

Další metodou ladění zhášecích tlumivek je metoda krátkodobé injektáže proudu v nulovém bodě, který způsobí změnu netočivého napětí. Změnou úhlu a amplitudy netočivého napětí se docílí posunutí nulového bodu sítě zapojením aktivních nebo pasivních komponent do pomocného vinutí zhášecí tlumivky a tím se vyloučí potřeba přesného ladění zhášecí tlumivky. [5]



Obr. 20: Zhášecí tlumivka [15]

Závěr

V předkládané diplomové práci jsou popsány napěťové a proudové poměry v sítích vysokého napětí. V práci je uveden přehled sítí, který je rozdělen z hlediska uzlu systému. Je zde popsáno několik metod detekce místa zemního spojení, rozebrány způsoby kompenzace kapacitních proudů a ladění zhášecích tlumivek.

Použitá literatura

- [1] Zákon č. 458/2000 Sb. O podmínkách a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (*Energetický zákon*) §2.
- [2] www.portal.zcu.cz [online]. 2.3.2012. Podklady k přednáškám předmětu KEE/ELS: *site.pdf*.
- [3] Procházka, K.: *Vybrané problémy provozu distribučních sítí VN*. České Budějovice 1992, 60 s.
- [4] Písařovic, Antonín: *Výpočet charakteristických veličin při zemním spojení v síti VN*. Brno, 2010. 42 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [5] Toman, P., Drápela, J., Mišák, S., Orságová, J., Paar, M., Topolánek, D., a kol.: *Provoz distribučních soustav*, Praha 2011, 264 s.
- [6] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha SNTL 1987, 312 s.
- [7] Rotbauer, Tomáš: *Stávající a nové způsoby indikace zemních spojení v sítích VN*. Plzeň, 2005. 41 s. Bakalářská práce na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity na katedře Elektroenergetiky a ekologie.
- [8] www.powerwiki.cz [online]. 6.4.2012. *ZemniSpojeni.pdf*. Dostupné z WWW: <<http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>>.
- [9] ČSN 333070. Elektrotechnické předpisy. *Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. [s.l.] : Český normalizační institut, 1981. 20 s.
- [10] Fejt, Z., Čermák, J.: *Elektroenergetika*. Praha 1989, 359s.
- [11] Pernica, Drahomír: *Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení*. Brno, 2011. 83 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [12] Topolánek, David: *Lokalizace místa zemního spojení v kompenzované distribuční síti*. Brno, 2011. 107 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií.

- [13] Topolánek, David; Pernica, Drahomír; Hoder, Karel: *Metody indikace zemních spojení*. Konference ČK CIRED 2008. 3.5.2012. Dostupné z WWW:
<http://web.fel.zcu.cz/fel/kee/OZS/P%F8edn%E1%9Aky%202009/s3_11.pdf>.
- [14] <http://www.pslib.cz> [online]. 8.5.2012. *Zemní spojení*. Dostupné z WWW:
<http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/zemni_spojzeni/Zemn%ED%20spojen%ED%20-%20opora.pdf>.
- [15] <http://www.ege.cz> [online]. 8.5.2012. *Zhášecí tlumivky*. Dostupné z WWW:
<<http://www.ege.cz/index.php?docid=276&lang=CZ>>.
- [16] Lála, Jan: *Způsob provedení přechodu izolované sítě na uzemněnou s uzlem sítě přes plynule nastavitelnou tlumivku*. Plzeň, 2010. 46 s. Diplomová práce na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity na katedře Elektroenergetiky a ekologie.