

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan SRBENÝ**
Osobní číslo: **E11N0133P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN**
Zadávající 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 :

Diplomová práce "Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN" bude zaměřena na tyto body:

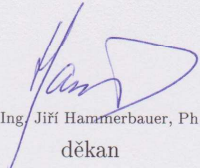
1. Popište stávající stav kabelové sítě s uzlem uzemněným přes nízkohmový odpor.
2. Popište problém vydělení malé části sítě s vlastním zdrojem s možným přechodem na izolovaný uzel.
3. Proveďte výpočty napěťových a proudových poměrů v síti při jednofázové poruše.
4. Navrhněte řešení a nastavení ochran při oddělení části sítě s vlastním zdrojem.

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

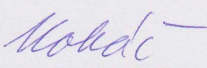
1. Skripta k předmětu **Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie**
2. **Internetové podklady**
3. **Další podklady dodá a určí v průběhu sám konzultant**
4. **ČN**

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




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

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Diplomová práce „Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN“ je rozdělena do tří částí. První část je zaměřena na poruchové stavy a na zemní ochrany. V druhé části jsou podrobně rozebrány jednotlivé sítě z hlediska provozu uzlu (přímo uzemněná síť, izolovaná síť, odporově uzemněná síť, kompenzovaná síť). Ve třetí části je proveden výpočet napěťových a proudových poměrů v kabelové síti VN. Pro výpočet byl použit výpočtový program.

Klíčová slova

Zemní spojení, přímo uzemněná síť, izolovaná síť, odporově uzemněná síť, kompenzovaná síť, zemní ochrana, zhášecí tlumivka, uzlový odporník, sekundární odporník, výpočet napěťových a proudových poměrů

Abstract

The thesis "The proposal of a solution of HV cable network neutral point operation" is divided into three parts. The first part is focused on fault conditions and earth fault protection. In the second part are discussed methods of the network neutral point operation in detail (directly earthed network, insulated network, resistance-earthed network, compensated network). In the third part is made a calculation of voltage and current conditions in the HV cable network. The calculating program was used for a calculation.

Key words

Earth fault, directly earthed network, insulated network, resistance-earthed network, compensated network, ground fault protection, arc suppression coil, earthing resistor, secondary resistor, calculation of voltage and current conditions

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.5.2013

Jan Srbený

.....

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za metodické vedení práce a konzultantovi Ing. Františku Žákovi za odborné rady a předané praktické zkušenosti.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	11
1 PROVOZ ELEKTRICKÝCH SÍTÍ.....	12
1.1 NAPĚŤOVÉ ÚROVNĚ V ČR	12
1.2 PORUCHOVÉ STAVY	12
1.2.1 <i>Bezporuchový stav</i>	12
1.2.2 <i>Zemní zkrat</i>	13
1.2.3 <i>Kovové zemní spojení</i>	13
1.2.4 <i>Zemní spojení s přechodovým odporem</i>	13
1.3 DETEKCE ZEMNÍHO SPOJENÍ.....	13
1.3.1 <i>Zemní ochrany</i>	13
1.3.2 <i>Metody detekce zemního spojení</i>	14
1.4 ZEMNÍ TRANSFORMÁTOR.....	15
2 ZPŮSOBY PROVOZU UZLU.....	17
2.1 PŘÍMO UZEMNĚNÝ UZEL	17
2.1.1 <i>Bezporuchový stav</i>	17
2.1.2 <i>Jednofázový zkrat</i>	17
2.2 IZOLOVANÝ UZEL	18
2.2.1 <i>Bezporuchový stav</i>	18
2.2.2 <i>Zemní spojení - kovové</i>	19
2.2.3 <i>Zemní spojení - odporové</i>	20
2.3 KOMPENZOVANÁ SÍŤ	23
2.3.1 <i>Bezporuchový stav</i>	23
2.3.2 <i>Ideálně vykompenzované zemní spojení</i>	24
2.3.3 <i>Skutečný stav v kompenzované síti</i>	25
2.4 UZEL UZEMNĚNÝ PŘES REZISTOR.....	27
2.4.1 <i>Bezporuchový stav</i>	27

2.4.2	<i>Jednofázová zemní porucha</i>	28
2.5	PŘECHODNĚ UZEMNĚNÝ UZEL	30
3	VÝPOČET NAPĚŤOVÝCH A PROUDOVÝCH POMĚRŮ V KABELOVÉ SÍTI VN	32
3.1	METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK	32
3.2	NÁHRADNÍ SCHÉMA	34
3.3	POPIS KABELOVÉ SÍŤE	37
3.4	NASTAVENÍ OCHRAN	39
3.5	JEDNOFÁZOVÁ PORUCHA V SÍTI	40
3.5.1	<i>Izolovaná síť</i>	40
3.5.2	<i>Odporově uzemněná síť</i>	43
3.5.3	<i>Kompenzovaná síť</i>	46
3.6	ODDĚLENÍ ČÁSTI SÍŤE S VLASTNÍM ZDROJEM.....	53
3.6.1	<i>Izolovaná síť</i>	54
3.6.2	<i>Odporově uzemněná síť</i>	57
3.6.3	<i>Síť uzemněná přes vysokoohmový odpor</i>	57
3.6.4	<i>Kompenzovaná síť</i>	61
3.7	NÁVRH ŘEŠENÍ PROVOZU KABELOVÉ SÍŤE	65
3.8	VÝPOČTOVÝ PROGRAM.....	66
	ZÁVĚR	68
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	69
	PŘÍLOHY	70

Seznam symbolů a zkratk

\bar{a}		operátor natočení
C	[F]	kapacita
C_0	[F]	kapacita vedení proti zemi
C_{0l}	[F/m]	kapacita vedení proti zemi vztažená na jednotku délky
G	[S]	konduktance
G_0	[S]	svod vedení
I_0	[A]	nulový proud
I_1	[A]	sousledná složka proudu
I_2	[A]	zpětná složka proudu
I_a, I_b, I_c	[A]	proud fázových vodičů
I_C	[A]	kapacitní proud sítě
I_{kap}	[A]	kapacitní proud sítě
I_{kapl}	[A/m]	kapacitní proud sítě vztažený na jednotku délky
I_L	[A]	kompensační proud tlumivky
I_{NT}	[A]	jmenovitý proud transformátoru
I_{por}	[A]	poruchový proud
I_R	[A]	proud rezistorem
I_{WC}	[A]	činná složka kapacitního proudu
l	[m]	délka vedení
L	[H]	indukčnost
L_1, L_2, L_3		fázové vodiče soustavy
NN		nízké napětí
P	[W]	činný výkon
PTN		přístrojový transformátor napětí
PTP		přístrojový transformátor proudu
Q	[VAr]	jalový výkon
R	[Ω]	elektrický odpor

R_0	[Ω]	odpor uzlového odporníku
R_L	[Ω]	činný odpor tlumivky
R_P	[Ω]	přechodový odpor poruchy
R_{SR}	[Ω]	odpor sekundárního odporníku
U_0	[V]	nulové napětí
U_1	[V]	sousledná složka napětí
U_2	[V]	zpětná složka napětí
U_a, U_b, U_c	[V]	napětí fázových vodičů
U_f	[V]	fázové napětí
U_s	[V]	sdužené napětí
VN		vysoké napětí
VVN		velmi vysoké napětí
X_C	[Ω]	kapacitní reaktance
X_L	[Ω]	reaktance tlumivky
Y	[S]	admitance
Z_c	[Ω]	příčná impedance vedení
Z_g	[Ω]	impedance generátoru
$Z_{k(0)}$	[Ω]	nulová složka zkratové impedance
$Z_{k(1)}$	[Ω]	sousledná složka zkratové impedance
$Z_{k(2)}$	[Ω]	zpětná složka zkratové impedance
Z_N	[Ω]	impedance uzlu sítě
Z_s	[Ω]	impedance sítě
Z_t	[Ω]	impedance transformátoru
Z_v	[Ω]	podélná impedance vedení
ZVN		zvlášť vysoké napětí
Φ_0	[$^\circ$]	fázový posun mezi nulovým napětím a nulovým proudem

Úvod

Elektrizační soustava v České republice je rozdělena na dvě úrovně. Na přenosovou a distribuční soustavu. Přenosová soustava slouží k přenosu elektrické energie po celém území České republiky a k propojení s dalšími elektrizačními soustavami evropské sítě UCTE. Dále propojuje uzly soustavy, které slouží pro propojení s distribuční soustavou a do kterých jsou vyvedeny výkony větších elektráren. Přenosová soustava je na napěťových hladinách 400 kV a 220 kV a je provozována jako účinně uzemněná. Distribuční soustava slouží k rozvodu energie ke koncovým uživatelům. Je provozována na hladinách 110 kV, VN a NN. Na 110 kV a NN je z hlediska provozu uzlu sítě provozována jako účinně uzemněná. Na VN je provozována jako izolovaná nebo neúčinně uzemněná. Do distribuční sítě jsou připojeny menší zdroje elektrické energie.

Tato diplomová práce je zaměřena na rozdělení sítí podle způsobu provozu uzlu a na jejich chování při jednofázové poruše. Ve výpočtové části práce je zpracována analýza napěťových a proudových poměrů v kabelové síti VN při jednofázové zemní poruše.

1 Provoz elektrických sítí

1.1 Napěťové úrovně v ČR

Elektrizační soustava v České republice se skládá ze dvou částí. První je přenosová soustava (400 kV a 220 kV), která je určena pro přenos energie v rámci naší země a k propojení se zahraničními soustavami. Zpravidla je provozována jako okružní síť. Druhou část tvoří distribuční soustava (110 kV, VN a NN), která slouží k rozvedení elektřiny po menších územních celcích a k zajištění dodávky koncovému uživateli.

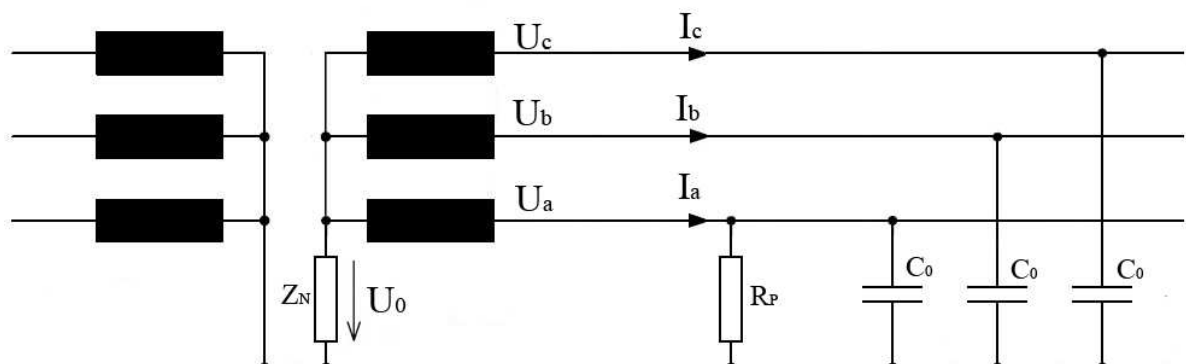
Napěťové hladiny se dělí do čtyř kategorií:

- *ZVN – zvlášť vysoké napětí: 400 kV*
- *VVN – velmi vysoké napětí: 220 kV, 110 kV*
- *VN – vysoké napětí: 6 kV, 10 kV, 22 kV, 35 kV*
- *NN – nízké napětí: 0,4 kV, 0,5 kV*

1.2 Poruchové stavy

1.2.1 Bezporuchový stav

V bezporuchovém stavu se všechny typy sítí chovají stejně. Tedy za předpokladu symetrické sítě a symetrické zátěže. Na *Obr.1.1* je obecný model sítě, kde impedance Z_N představuje způsob provozu uzlu a přechodový odpor poruchy R_P vypovídá o poruchovém či bezporuchovém stavu sítě. Ve stavu bezporuchovém je tedy $R_P = \infty$. Kapacity C_0 jsou kapacity jednotlivých fází proti zemi. Svod budeme v tomto přehledu zanedbávat.



Obr.1.1 Obecný model sítě [7]

Rozdíly nastávají až při poruchových stavech, což si následně ukážeme na jednofázových zemních poruchách.

1.2.2 Zemní zkrat

V síti s přímo uzemněným uzlem nebo s uzlem uzemněným přes nízkohmový odpor se jednofázová zemní porucha označuje jako zemní zkrat. Impedance mezi uzlem soustavy a zemí Z_N je nulová (v odporově uzemněné síti desítky Ω) a odpor R_P bývá zanedbatelný. Postiženou fází a nulovým bodem teče velký proud (několikanásobek jmenovitého proudu). Síť je nutné co nejdříve odpojit.

1.2.3 Kovové zemní spojení

V sítích izolovaných nebo kompenzovaných se jednofázová zemní porucha nazývá zemním spojením. Impedance Z_N je nekonečně velká, resp. představuje hodnotu zhášecí tlumivky. Porušená fáze je vodivě spojena se zemí bez přechodového odporu ($R_P=0$).

1.2.4 Zemní spojení s přechodovým odporem

V případě že $R_P \neq 0$ mluvíme o obloukovém zemním spojení (několik Ω) nebo o odporovém zemním spojení (několik set Ω). Oproti kovovému zemnímu spojení se změní napěťové poměry v síti, což si podrobněji ukážeme v následujících kapitolách.

1.3 Detekce zemního spojení

Při vzniku jednofázového zemního spojení je možné síť za určitých podmínek nadále provozovat. Je ale důležité zemní spojení detekovat a určit jeho polohu v síti. K tomu slouží zemní ochrany.

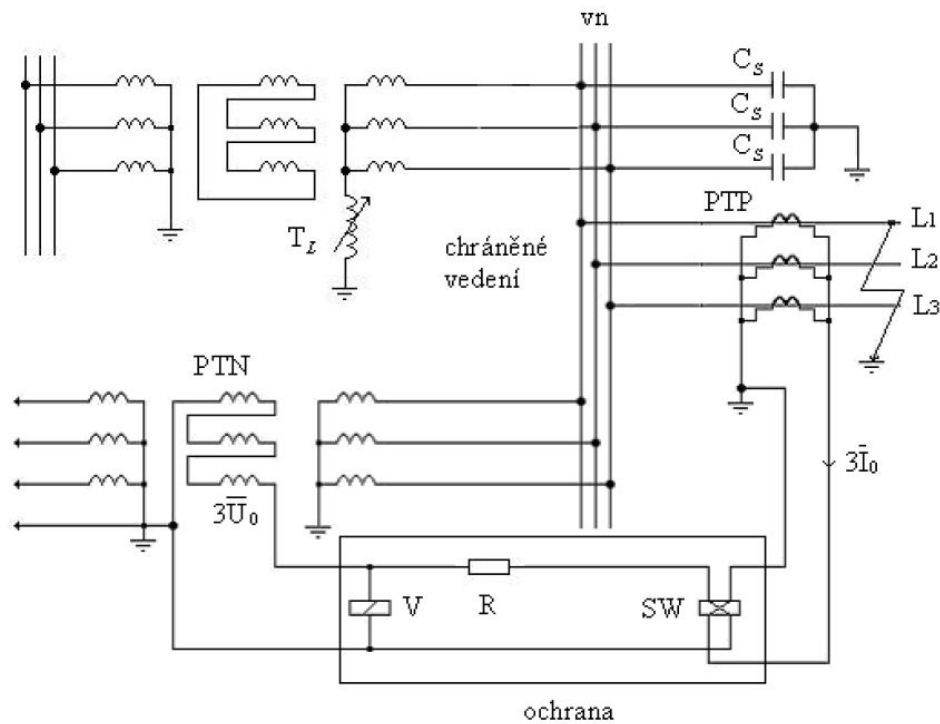
1.3.1 Zemní ochrany

Zemní ochrana sleduje velikost nulového napětí U_0 v uzlu sítě a velikost nulového proudu I_0 chráněného vývodu. Na *Obr.1.2* je zapojení zemní ochrany v kompenzované síti.

Napětí U_0 je měřeno pomocí měřicího vynutí zapojeného do otevřeného trojúhelníku jako vektorový součet jednotlivých fázových napětí. Pokud napětí U_0 překročí stanovenou mez, je detekováno zemní spojení v chráněné síti.

Pro vyhledání postiženého vývodu zemní poruchou je nutná detekce nulového proudu I_0 . To se provádí pomocí přístrojových transformátorů proudu PTP. Jejich zapojení

podle schématu *Obr.1.2* se nazývají Holmgreenova skupina PTP. Další variantou měření I_0 je použití tzv. průvlekového transformátoru. Tato varianta nevykazuje takové nepřesnosti jako použití PTP (podrobněji v dalších kapitolách).



Obr.1.2 Zapojení zemní ochrany v kompenzované síti [5]

1.3.2 Metody detekce zemního spojení

Zemní ochrany využívají pro určení postiženého vývodu různé principy podle způsobu provozu uzlu sítě.

- **Wattmetrická metoda**

Tato metoda se uplatňuje v kompenzovaných sítích, kde po kompenzaci teče místem poruchy relativně malý činný proud. Velikost tohoto činného proudu je možné krátkodobě zvýšit připojením sekundárního odporníku. Použitím wattmetrického směrového relé ochrana určí postižený vývod. Toto relé porovnává naměřený výkon (*Rov.1.1*) s nastavenými kladnými a zápornými prahovými hodnotami a určí, jestli se jedná o poruchu v dopředném nebo zpětném směru.

$$P = U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (1.1)$$

- **Varmetrická metoda**

Zemní ochrana založená na varmetrickém principu sleduje směr jalového výkonu podle rovnice (Rov.1.2). Tato metoda se používá v izolovaných sítích, kde se kapacitní proud sítě uzavírá postiženou fází. Proud I_0 je tedy rozdílem celkového kapacitního proudu sítě a kapacitního proudu chráněného vývodu. Směr jalového výkonu postiženého vedení se od zdravých vedení spolehlivě liší.

$$Q = U_0 \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0 \quad (1.2)$$

- **Konduktanční metoda (G_0); Admitanční metoda (Y_0)**

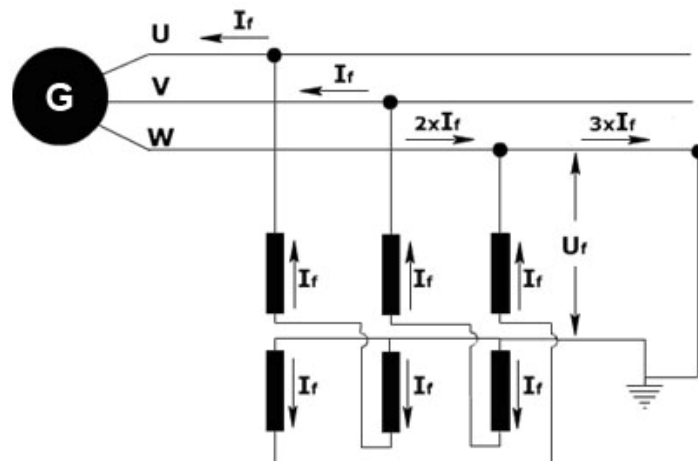
Tyto metody mají využití při vysokoohmovém zemním spojení. Zejména v kompenzovaných sítích v kombinaci se sekundárním odporníkem. Konduktanční metoda reaguje na poměr I_0 a U_0 , proto je na velikosti těchto hodnot relativně nezávislá. Oproti admitanční metodě je konduktanční metoda směrová. Admitanční metoda je využívána spíše jako doplňková. [8]

Toto je jen několik základních metod. Dnešní moderní zemní ochrany nabízejí kombinaci různých principů vyhledávání zemního spojení. Problematice nastavení zemních ochran pro jednotlivé typy provozu sítí se budu věnovat ve výpočtové části diplomové práce.

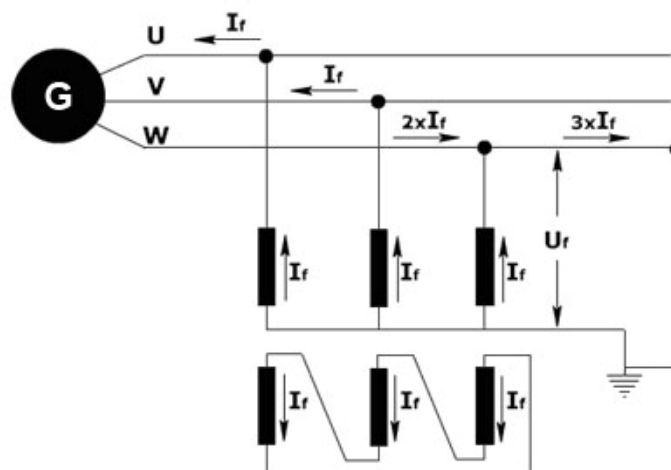
1.4 Zemní transformátor

V místě, kde je třeba síť uzemnit, ale není vyveden uzel transformátoru (např. sekundární vinutí je zapojeno do trojúhelníku), lze použít zemní transformátor. Zemní transformátor připojujeme k třífázové síti za účelem umělého vytvoření jejího nulového bodu. V zásadě máme dva způsoby jak ho navinout:

- *S hlavním vinutím zapojeným do lomené hvězdy (ZN)*
- *S hlavním vinutím zapojeným do hvězdy, se stabilizačním vinutím zapojeným do trojúhelníka (YNd)*



Obr.1.3 Zemní transformátor ZN [4]



Obr.1.4 Zemní transformátor YN(d) [4]

Na *Obr.1.3* a *Obr.1.4* je vidět princip použití zemního transformátoru a rozložení proudů při jednofázovém zemním spojení. Vyvedení výkonu z generátoru je zde jako příklad neuzemněné sítě.

Mezi uměle vytvořený nulový bod a zem je možné připojit zhášecí tlumivku nebo odpor. Případně se dá zvětšit impedance zemního transformátoru připojením tlumivky, resp. rezistoru ke stabilizačnímu vinutí.

2 Způsoby provozu uzlu

Soustava se z hlediska propojení uzlu sítě (nulového bodu) se zemí provozuje na jednotlivých napěťových hladinách různě. V úvahu se bere bezpečnost a také možnost dočasného provozu sítě s jednofázovou poruchou.

Dělení podle způsobu provozu uzlu:

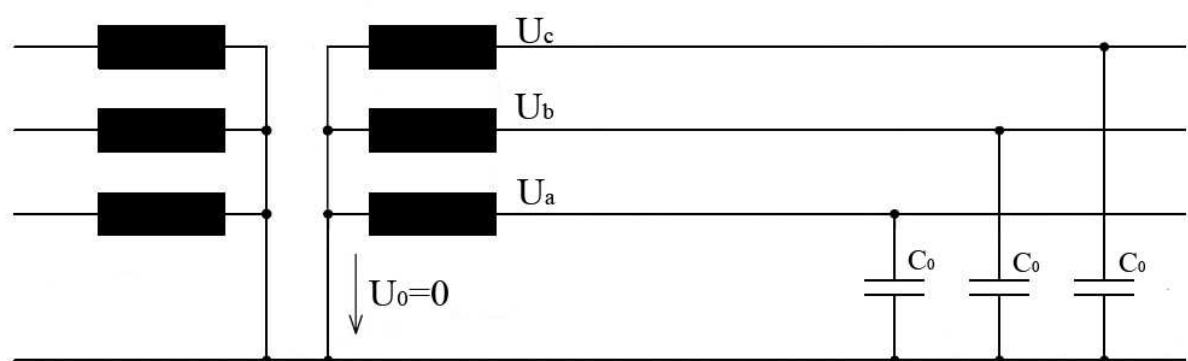
- *soustava účinně uzemněná: ZVN, VVN, NN*
- *soustava neúčinně uzemněná (přes odpor nebo zhášecí tlumivku): VN*
- *soustava izolovaná: VN, (NN)*

2.1 Přímou uzemněný uzel

2.1.1 Bezporuchový stav

V ČR se sítě s přímo uzemněným uzlem provozují na hladinách ZVN, VVN a NN; tedy na 400 kV, 220 kV, 110 kV a 0,4 kV.

Napětí jednotlivých fází proti zemi je jak při bezporuchovém stavu, tak při zkratu fázové. Vodiče jsou tedy dimenzovány na fázové napětí. To přináší velkou ekonomickou výhodu zvláště na hladinách ZVN a VVN.

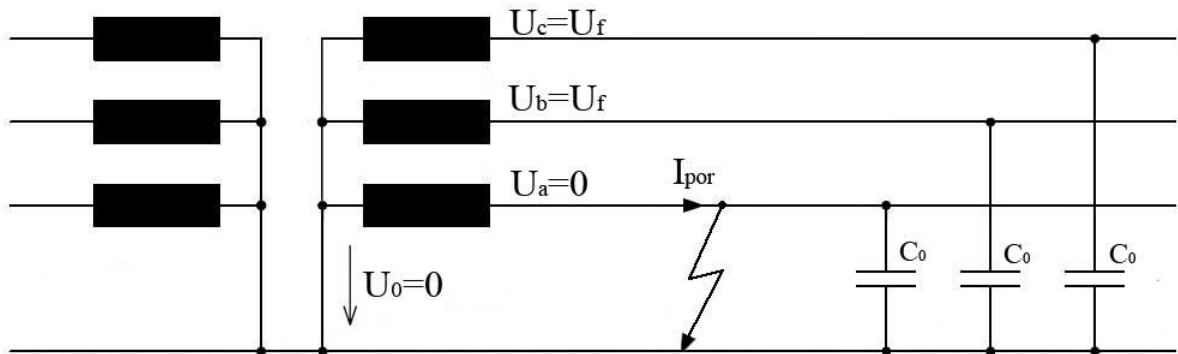


Obr.2.1 Sít' s přímo uzemněným uzlem [7]

2.1.2 Jednofázový zkrat

Při jednofázovém zkratu teče postiženou fází zkratový proud, jak je vidět na Obr.2.2. Tento proud je prakticky omezen pouze reaktancí transformátoru a reaktancí vedení (jejich

činné odpory můžeme zanedbat). Zkratový proud je tedy nepřímoúměrný vzdálenosti místa zkratu od místa uzemnění a má převážně induktivní charakter.



Obr.2.2 Jednofázový zkrat v síti s přímo uzemněným uzlem [7]

Zkratové proudy v účinně uzemněné síti nabývají značných hodnot (obzvláště u blízkých zkratů). Velikost proudu je dána vztahem *Rov.2.1*. Tyto proudy nadměrně namáhají vodiče (zejména u kabelových vedení), proto je třeba co nejrychleji zajistit vypnutí postižené části sítě.

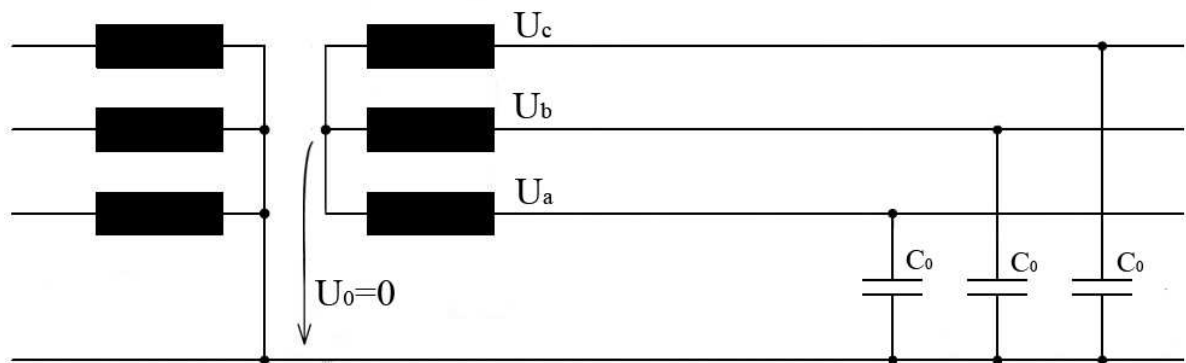
$$\bar{I}_{por} = \frac{3 \cdot \bar{U}_f}{\bar{Z}_{k(1)} + \bar{Z}_{k(2)} + \bar{Z}_{k(0)}} \quad (\text{A}) \quad (2.1)$$

\bar{I}_{por}	poruchový (zkratový) proud
\bar{U}_f	fázové napětí
$\bar{Z}_{k(1)}$	sousledná složka zkratové impedance
$\bar{Z}_{k(2)}$	zpětná složka zkratové impedance
$\bar{Z}_{k(0)}$	nulová složka zkratové impedance

2.2 Izolovaný uzel

2.2.1 Bezporuchový stav

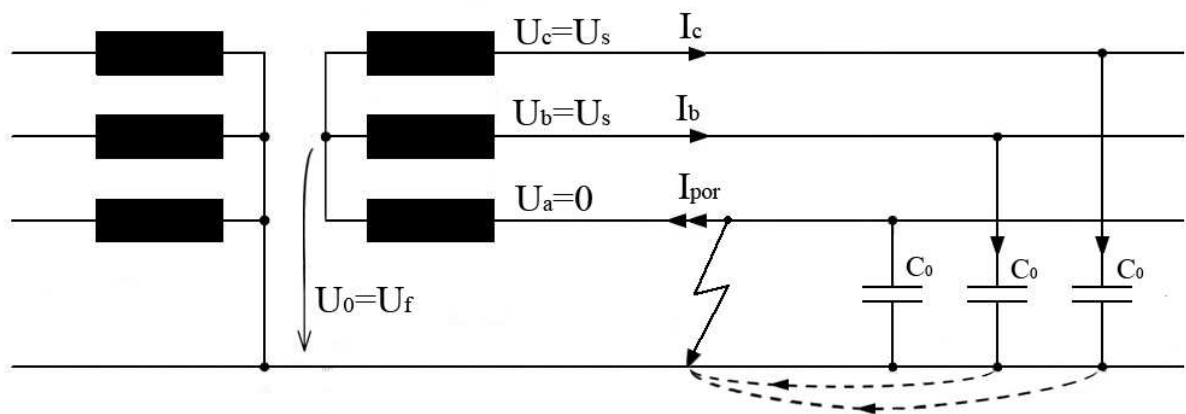
Síť s izolovaným uzlem se provozuje na hladině VN, v malých průmyslových závodech nebo ve vlastní spotřebě elektráren či tepláren. Napětí uzlu proti zemi je v bezporuchovém stavu nulové (Obr.2.3), protože vektorový součet proudů procházejících kapacitami proti zemi je také nulový. Ve skutečnosti se ale projevuje nesymetrie sítě. U netransponovaných vedení je tato nesymetrie nejmarkantnější a v jejím důsledku vzniká malé napětí mezi uzlem sítě a zemí. Toto napětí však nepřesáhne 1% jmenovitého fázového napětí sítě a můžeme si tedy tento jev dovolit zanedbat.



Obr.2.3 Sít' s izolovaným uzlem [7]

2.2.2 Zemní spojení - kovové

Mezi jednotlivými fázovými vodiči a zemí je v bezporuchovém stavu fázové napětí. Při zemním spojení, kdy se potenciál jedné fáze dostává na zem, se napětí zdravých fází proti zemi mění na sdružené, jak je vidět na Obr.2.4. Velikost napětí uzlu sítě proti zemi je rovna velikosti fázového napětí postižené fáze, ovšem s opačnou polaritou (Rov.2.3).



Obr.2.4 Kovové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem [7]

Mezi postiženou fází a zemí není v tomto případě žádný přechodový odpor. Poruchový proud je vektorovým součtem proudů procházejících kapacitami zdravých fází proti zemi. Jeho velikost se určí podle vztahu Rov.2.2 .

$$\bar{I}_{por} = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}} = \frac{\bar{U}_f}{\frac{1}{3j\omega C}} = \bar{U}_f \cdot 3j\omega C \quad (\text{A}) \quad (2.2)$$

$$\bar{U}_0 = \bar{I}_{por} \cdot \frac{1}{3j\omega C} = -\bar{U}_f \quad (2.3)$$

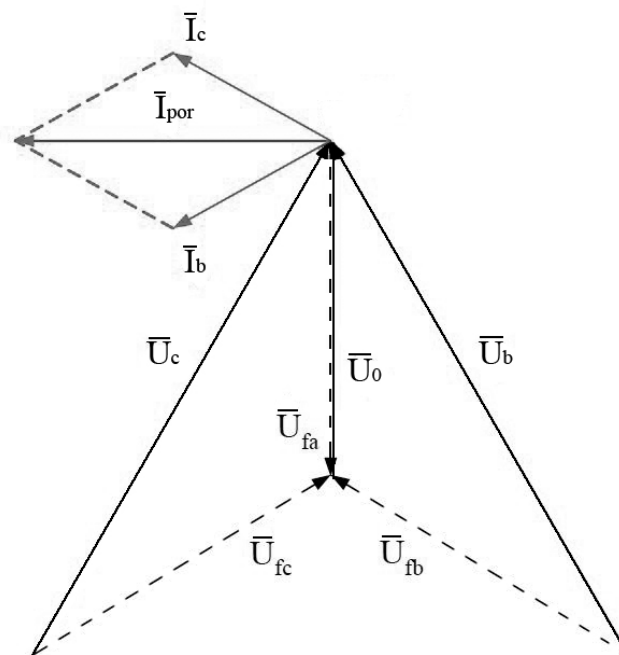
\bar{I}_{por} poruchový proud

\bar{U}_f fázové napětí

\bar{U}_0 napětí uzlu proti zemi

C kapacita zdravých fází proti zemi

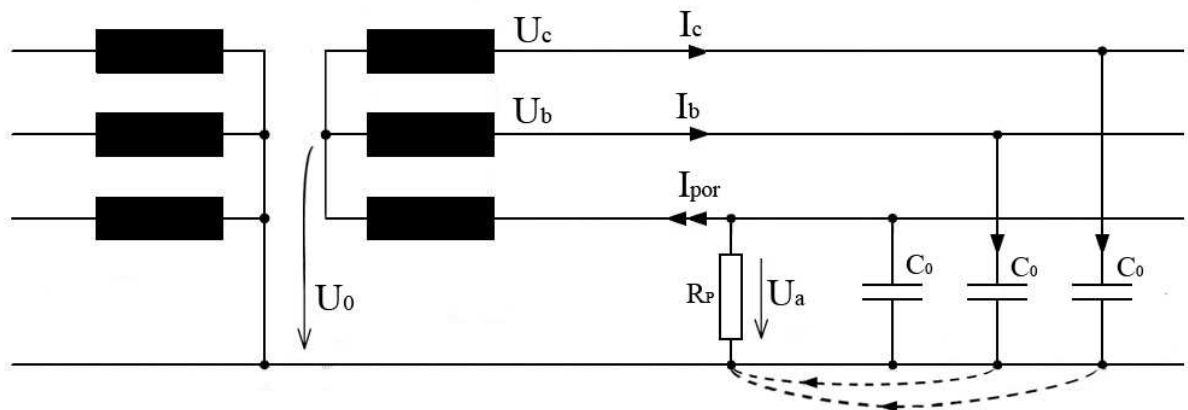
Na Obr.2.5 je znázorněn vektorový diagram napětí a proudů při kovovém zemním spojení. Poruchový proud procházející místem zemního spojení má kapacitní charakter. Při vzniku oblouku je pak problematické jeho zhášení.



Obr.2.5 Fázorový diagram při kovovém zemním spojení [7]

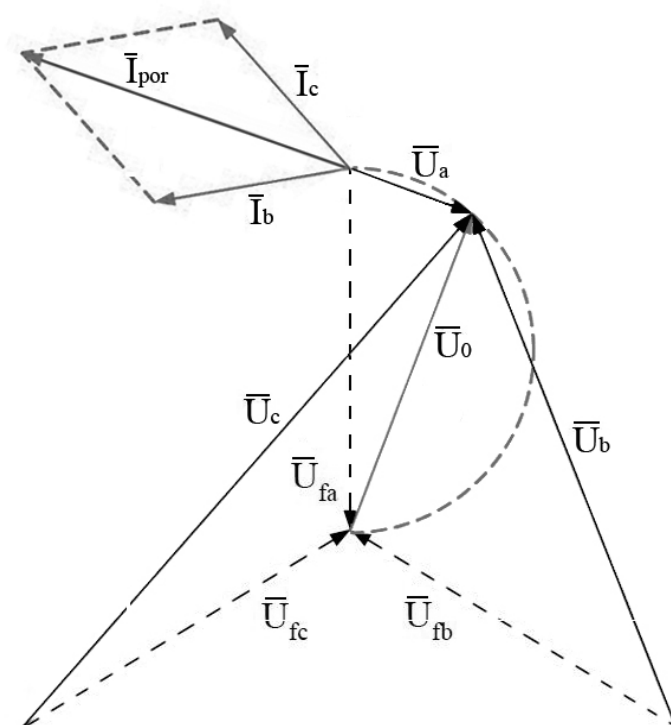
2.2.3 Zemní spojení - odporové

V případě, že mezi postiženým vodičem a zemí hoří oblouk nebo je zde jiný přechodový odpor, jedná se o odporové zemní spojení.



Obr.2.6 Odporové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem [7]

Úbytek napětí na přechodovém odporu U_a posouvá U_0 po pomyslné kružnici, jak je zobrazeno na Obr.2.7, v závislosti na velikost přechodového odporu R_p . Díky tomu napětí na jedné ze zdravých fází vzroste na hodnotu větší než je sdružené napětí sítě. Velikost napětí uzlu U_0 je dána vztahem Rov.2.5. Poruchový proud v tomto případě nemá čistě kapacitní charakter.



Obr.2.7 Fázorový diagram při odporovém zemním spojení [7]

$$\bar{I}_{por} = \frac{\bar{U}_f}{Z} = \frac{\bar{U}_f}{R_p + \frac{1}{3j\omega C}} = \frac{\bar{U}_f \cdot 3j\omega C}{3j\omega CR_p + 1} \quad (2.4)$$

$$\bar{U}_0 = \bar{I}_{por} \cdot \frac{1}{3j\omega C} = \frac{\bar{U}_f \cdot 3j\omega C}{3j\omega CR_p + 1} \cdot \frac{1}{3j\omega C} = \frac{\bar{U}_f}{3j\omega CR_p + 1} \quad (2.5)$$

\bar{I}_{por}	poruchový proud
\bar{U}_f	fázové napětí
\bar{U}_0	napětí uzlu proti zemi
C	kapacita zdravých fází proti zemi
R_p	přechodový odpor

Jednoznačně největší výhodou izolované sítě je možnost provozu s jednofázovou poruchou. V takovém případě je síť provozována dočasně do vyhledání místa poruchy. Při zemním spojení je ale na zdravých fázích sdružené napětí, na které musí být vedení dimenzováno. To je z ekonomického hlediska nevýhoda. Další nevýhodou je, že při přerušovaném obloukovém zemním spojení vzniká v síti opakovaně přepětí.

Jak už jsem nastínil, proud tekoucí místem poruchy má převážně kapacitní charakter. Označuje se také jako kapacitní proud sítě I_{kap} a je měřítkem pro rozsah sítě a volbu způsobu provozu uzlu. I_{kap} nezávisí na vzdálenosti poruchy od transformátoru, ale na celkovém rozsahu sítě a to včetně nepostižených vývodů.

V praxi se kapacita vedení proti zemi přepočítává na jednotku délky C_{0l} . Výrobci kabelů udávají buďto kapacitu vztaženou na jednotku délky nebo kapacitní proud vztažený na jednotku délky I_{kapl} (případně obojí). Hodnota celkové C_0 , resp. I_{kapl} se pak určí podle vztahu *Rov.2.6*, resp. *Rov.2.7*. V tabulce *Tab.2.1* je několik příkladů kabelů a jejich hodnot udávaných výrobcem. [9]

$$C_0 = C_{0l} \cdot l \quad (\mu F, \mu F/km, km) \quad (2.6)$$

$$I_{kap} = I_{kapl} \cdot l \quad (A, A/km, km) \quad (2.7)$$

C_0	kapacita vedení proti zemi
C_{0l}	kapacita vedení proti zemi vztažená na jednotku délky
I_{kap}	kapacitní proud sítě
I_{kapl}	kapacitní proud sítě vztažený na jednotku délky
l	délka vedení

Tab.2.1 Hodnoty kapacity vedení a kapacitních proudů pro různé kabely (izolace XPE) [9]

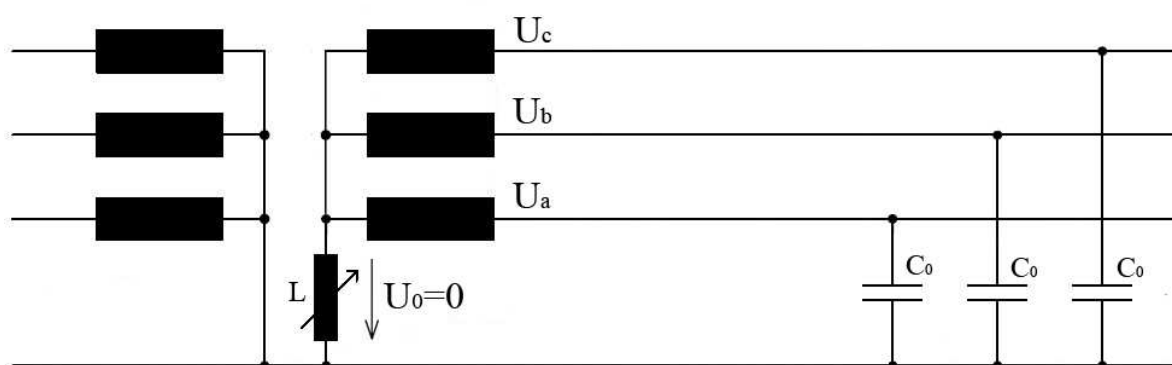
S [mm ²]	6 kV		10 kV		22 kV	
	C ₀ [μF/km]	I ₀ [A/km]	C ₀ [μF/km]	I ₀ [A/km]	C ₀ [μF/km]	I ₀ [A/km]
1 x 50	0,250	0,817	0,250	1,361	0,180	2,156
1 x 120	0,350	1,143	0,350	1,906	0,240	2,875
1 x 240	0,450	1,470	0,450	2,450	0,300	3,594
1 x 400	0,550	1,797	0,550	2,995	0,370	4,432

Podle ČSN je maximální hodnota kapacitního proudu pro provoz izolované sítě $I_{\text{kap}}=20\text{A}$. Rozsáhlejší sítě s vyšším I_{kap} musí být provozovány jako sítě kompenzované. Norma doporučuje přechod na kompenzovanou síť již při $I_{\text{kap}}>10\text{A}$. [10]

2.3 Kompenzovaná síť

2.3.1 Bezporuchový stav

Kompenzovaná síť se u nás provozuje na hladině VN, konkrétně na hladinách 6 kV až 35 kV, a výjimečně na hladině 0,5 kV. Mezi uzel transformátoru a zem je zapojena zhášecí tlumivka. Často také nese jméno svého vynálezce – Petersenova tlumivka. Tato tlumivka je plynule nastavitelná. Dříve se nastavení provádělo přepínáním odboček, dnes se toto řeší vysouváním jádra tlumivky.

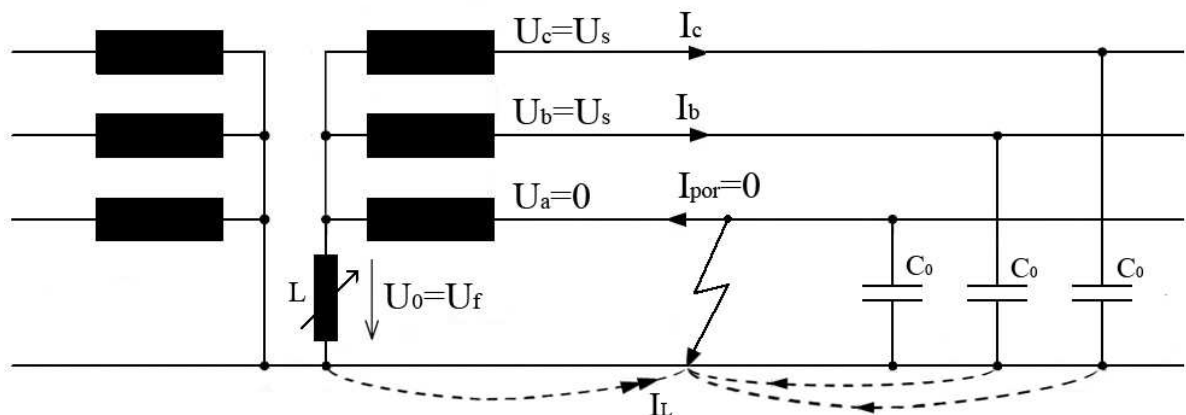


Obr.2.8 Síť uzemněná přes zhášecí tlumivku (kompenzovaná síť) [7]

Při bezporuchovém stavu symetrické sítě je na tlumivce nulové napětí a neteče skrz ní žádný proud. V praxi se však ale vyskytuje na vedení nesymetrie. Tlumivka tvoří s touto kapacitní nesymetrií paralelní rezonanční obvod. Toho se využívá při ladění tlumivky. V distribuční síti se často mění konfigurace sítě. V síti většího průmyslového závodu, zase může dojít k jejímu rozšíření. Tlumivka se přeladuje vždy na aktuální stav sítě. Musí být naladěna při bezporuchovém stavu, aby byla zajištěna okamžitá kompenzace hned při vzniku poruchy.

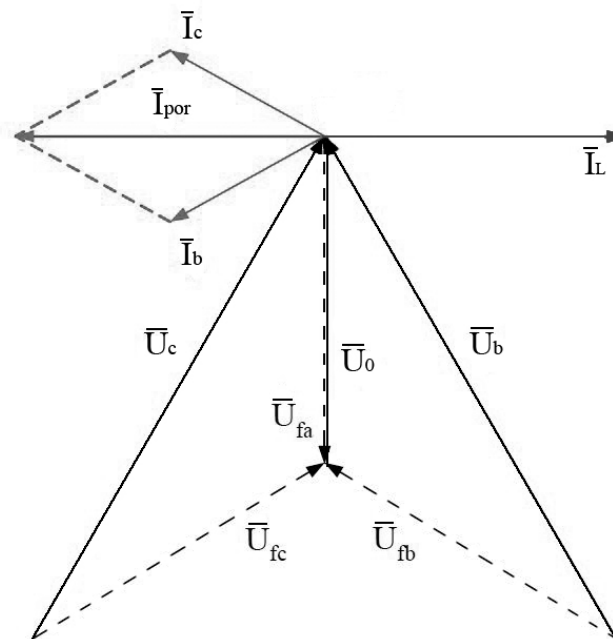
2.3.2 Ideálně vykompenzované zemní spojení

Při vzniku zemního spojení teče zemí do místa poruchy kapacitní poruchový proud. Pokud je tlumivka správně naladěna, dodává stejně velký proud jako je proud poruchový, ovšem induktivního charakteru. Tlumivka tedy kompenzuje zemní poruchový proud v místě poruchy (Obr.2.9).



Obr.2.9 Kompenzace kapacitního proudu v kompenzované síti [7]

Budeme předpokládat kovové zemní spojení. Napěťové poměry ve vykompenzované síti jsou stejné jako v síti izolované. Na zdravých fázích je sdružené napětí a mezi uzlem sítě a zemí, tedy na tlumivce, je napětí fázové. Velikost tlumivky se odvozuje dle rovnic Rov.2.8 a Rov.2.9. Na Obr.2.10 je fázorový diagram proudů a napětí ve vykompenzovaném stavu.



Obr.2.10 Fázorový diagram kompenzace kapacitního proudu [7]

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_f}{j\omega L} = -j \frac{\bar{U}_f}{\omega L} \quad (2.8)$$

$$\bar{I}_L = -\bar{I}_{kap}$$

$$-j \frac{\bar{U}_f}{\omega L} = -\bar{U}_f \cdot 3j\omega C_0$$

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_0} \quad (2.9)$$

L indukčnost zhášecí tlumivky

C_0 kapacita vedení proti zemi

\bar{I}_{kap} kapacitní proud sítě

\bar{I}_L kompenzační proud tlumivky

\bar{U}_f fázové napětí

2.3.3 Skutečný stav v kompenzované síti

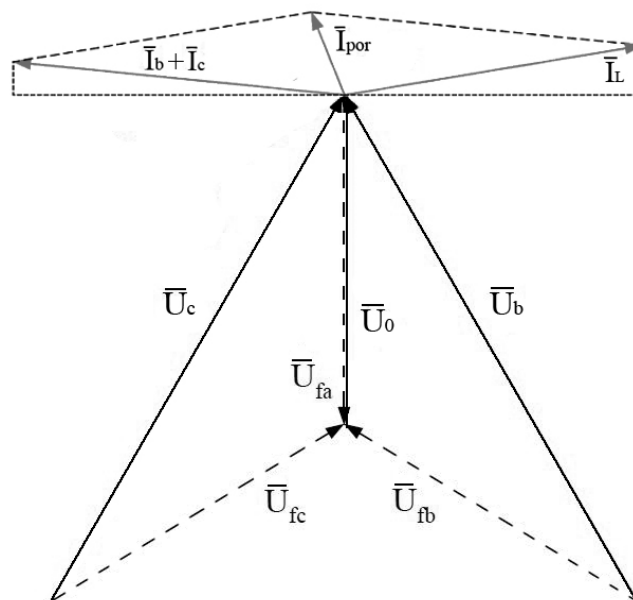
V ideálním případě vykompenzovaného zemního spojení neteče místem poruchy a postiženým vodičem žádný proud. Ve skutečnosti tomu tak ale není. Místem poruchy teče

zbytkový proud, který je převážně tvořen činným odporem tlumivky a svodem vedení. Dále k němu přispívá nevykompenzovaný kapacitní proud způsobený nepřesným naladěním zhášecí tlumivky. Tlumivka kompenzuje pouze 1. harmonickou, takže dále přispívají kapacitní proudy vyšších harmonických. Zbytkový poruchový proud se dá tedy vyjádřit pomocí Rov.2.10.

$$\bar{I}_{por} = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \cdot \bar{U}_0 \quad (2.10)$$

\bar{I}_{por}	poruchový proud
R_L	činný odpor tlumivky
G_0	svod vedení
C_0	kapacita vedení proti zemi
L	indukčnost zhášecí tlumivky
\bar{U}_0	napětí uzlu proti zemi

Napěťové a proudové poměry jsou znázorněny ve fázorovém diagramu.



Obr.2.11 Fázorový diagram zemního spojení ve skutečně kompenzované síti [7]

Zbytkový poruchový proud má výrazně menší hodnotu než poruchový proud v izolované síti a má téměř činný charakter. Zejména to pozitivně působí na úspěšné zhašení oblouku a na jeho obtížné znovuzapálení.

Stejně jako u izolované sítě je největší výhodou možnost provozu s jednofázovým zemním spojením. Dlouhodobý provoz však není vhodný, protože na zdravých fázích je stále sdružené napětí. Další výhodou je fakt, že uzemnění stožárů VN může být dimenzováno pouze na zbytkový proud, aniž by vznikalo nebezpečné dotykové napětí. Stejně tak krokové napětí v místě poruchy vychází z velikosti zbytkového proudu.

Nevýhodou jsou nemalé náklady na samotnou zhášecí tlumivku. Dále nutnost udržování vyladěného stavu. K tomu slouží automatika ladění, což je další finanční nárok. Protože postiženým vodičem teče malý činný proud, je obtížné hledání a určování zemního spojení (podrobněji v dalších kapitolách).

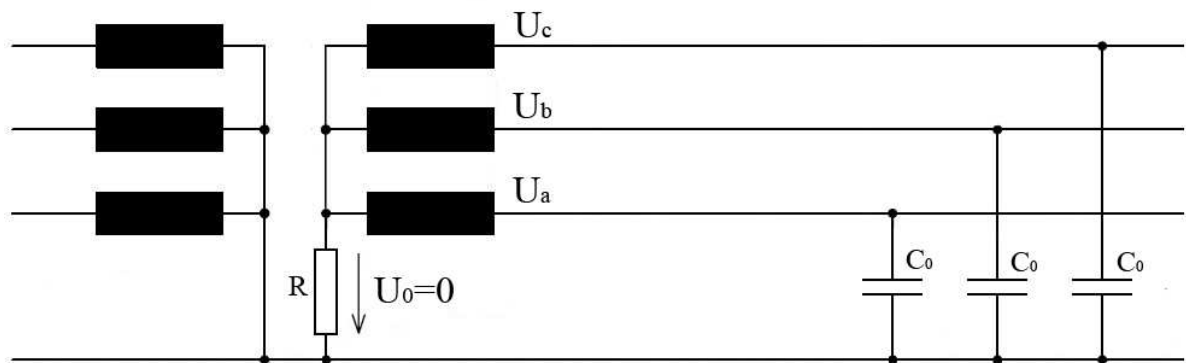
Podle ČSN nesmí mít zbytkový poruchový proud hodnotu větší než $I_{por}=60A$. Maximální rozsah kompenzované sítě musí být volen tak, aby pro kapacitní proud před kompenzací platilo: $I_{kap}<100A$ pro venkovní vedení; $I_{kap}<300A$ pro smíšená vedení; $I_{kap}<450A$ pro kabelové sítě. [10]

2.4 Uzel uzemněný přes rezistor

2.4.1 Bezporuchový stav

Síť s uzlem uzemněným přes rezistor se provozuje převážně u kabelových, případně smíšených vedení VN. S čistě kabelovou sítí se setkáváme převážně v městských zástavbách. Protože při zemních poruchách na kabelech se většinou jedná o poruchy trvalého rázu, ztrácí samozhášení krátkodobých poruch za pomoci zhášecí tlumivky význam. U kabelových vedení se nedoporučuje ani provoz s jednofázovým zemním spojením z důvodu namáhání izolace kabelů. Kabelová síť je kapacitně téměř souměrná. To je další důvod proč nepoužívat kompenzační tlumivku, protože by bylo obtížné její ladění.

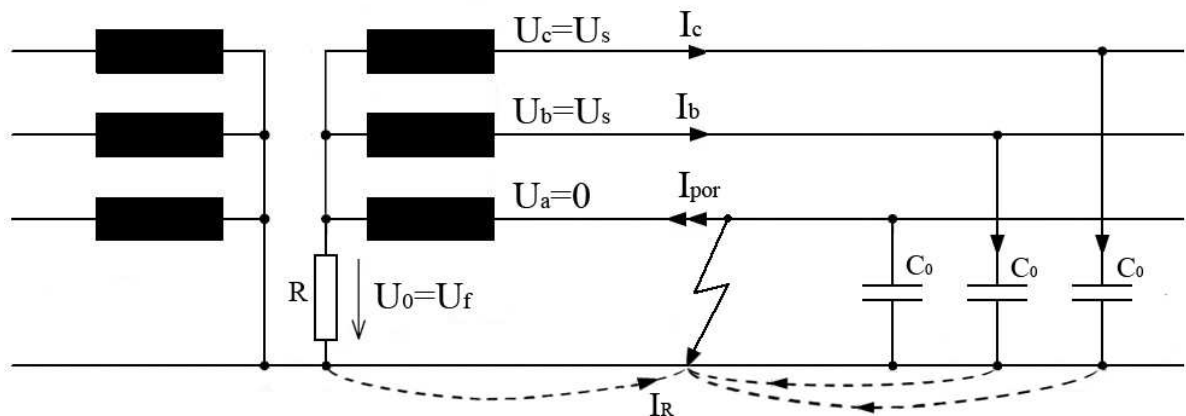
V bezporuchovém stavu jsou napěťové poměry stejné jako v předchozích případech. Odporník je trvale připojen mezi uzel transformátoru a zem a je na něm nulové napětí.



Obr.2.12 Síť uzemněná přes rezistor [7]

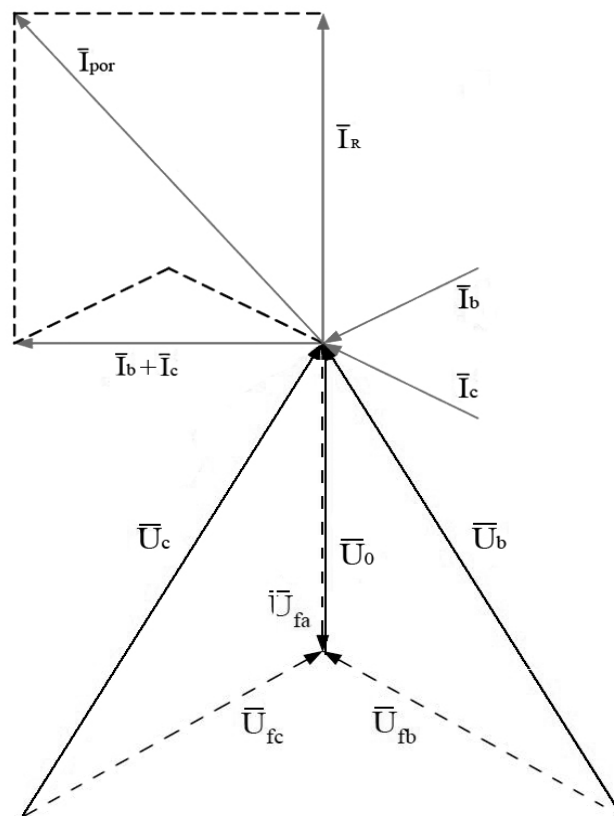
2.4.2 Jednofázová zemní porucha

Při jednofázové zemní poruše se napětí na rezistoru zvýší na hodnotu blízkou fázovému napětí (uvažujeme ještě podélné parametry vedení a vzdálenost poruchy).



Obr.2.13 Jednofázová porucha v síti uzemněné přes rezistor [7]

Místem poruchy pak protéká proud, který je dán součtem proudu činným odporem a kapacitního proudu celé sítě. Dá se tedy říci, že velikost poruchového proudu závisí na celkové velikosti sítě a zároveň klesá se vzdáleností místa zkratu od transformátoru. Na Obr.2.14 je fázorový diagram sítě při jednofázové poruše. Napětí na zdravých fázích jsou sdružená.



Obr.2.14 Fázorový diagram jednofázové poruchy v odporově uzemněné síti [7]

$$\bar{I}_{por} = \bar{I}_R + \bar{I}_{kap} = \left(\frac{1}{R} + j3\omega C_0 \right) \cdot \bar{U}_f \quad (2.11)$$

\bar{I}_{por}	poruchový proud
\bar{I}_R	proud rezistorem
\bar{I}_{kap}	kapacitní proud sítě
R	odpor rezistoru
C_0	kapacita vedení proti zemi
\bar{U}_f	fázové napětí

Poruchový proud vyjádřený Rov.2.11 je maximální poruchový proud v místě poruchy. Je dán vektorovým součtem jmenovitého proudu rezistoru a kapacitního proudu sítě. Zanedbáváme přechodový odpor poruchy, podélné parametry vedení a odpor země (blízká porucha).

Uzlový odpor R omezuje poruchový proud, ale také tlumí vzniklá přepětí. Podmínka pro tlumení je, že jmenovitý proud rezistoru nesmí být menší než kapacitní proud sítě. Minimální velikost uzlového odporu je odvozena v *Rov.2.12*.

$$I_R \geq I_{kap}$$

$$\frac{U_f}{R} \geq 3\omega C_0 U_f$$

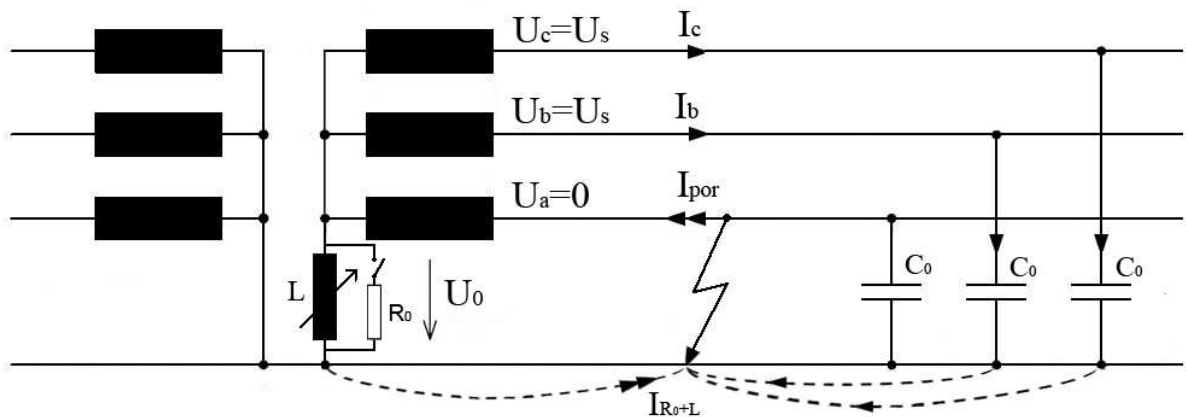
$$R \leq \frac{1}{3\omega C_0} \quad (2.12)$$

I_R	jmenovitý proud rezistoru
I_{kap}	kapacitní proud sítě
R	odpor rezistoru
C_0	kapacita vedení proti zemi
U_f	fázové napětí

Výhodou odporově uzemněné sítě je, že oproti účinnému uzemnění omezuje poruchový proud. To se příznivě odrazí při dimenzování vodičů. Oproti izolované a kompenzované síti zajišťuje jednoznačné vyhodnocení poruchy pro ochrany a snadné určení postiženého vývodu. Dále omezuje přepětí. Určitou nevýhodou naopak je, že nedovoluje provoz s jednofázovou zemní poruchou. Toto je ale u kabelových sítí stejně nežádoucí stav, protože při takovém provozu hrozí přechod jednofázové poruchy na vícefázovou.

2.5 Přechodně uzemněný uzel

Přechodného uzemnění uzlu se využívá u kompenzovaných sítí pro krátkodobé zvýšení hodnoty činné složky poruchového proudu. Toto je realizováno paralelním připojením rezistoru k tlumivce, nebo připojením vhodného rezistoru k pomocnému vinutí kompenzační tlumivky (podrobněji ve výpočtové části diplomové práce). Schéma kompenzované sítě s přechodným uzemněním uzlu je na obrázku *Obr.2.15*.



Obr.2.15 Přechodně uzemněná síť [7]

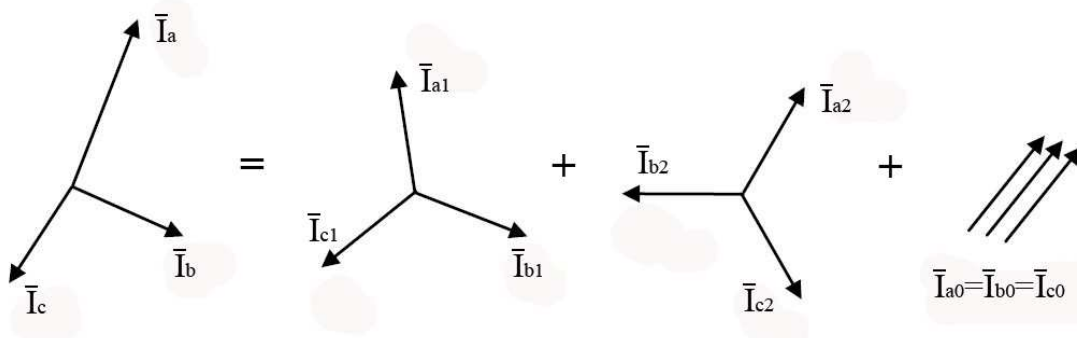
Přechodné uzemnění sítě se děje automaticky v součinnosti se zemními ochranami. Krátkodobé zvýšení činné složky poruchového proudu zaručí bezpečnou identifikaci postižené části sítě. Automatika spínání přechodného uzemnění nabízí nastavení časové prodlevy mezi vznikem zemního spojení a připnutím rezistoru. Stejně tak nastavení doby připnutí rezistoru. Přechodné uzemnění probíhá buď jednorázově, nebo opakovaně. To záleží na režimu ochrany, která buď odpojuje postižený vývod vedení, nebo pracuje pouze v signalizačním režimu.

3 Výpočet napěťových a proudových poměrů v kabelové síti VN

V této části práce se budu věnovat praktickému výpočtu napěťových a proudových poměrů v rozsáhlé kabelové síti při jednofázové poruše. Pro výpočet jsem použil metodu souměrných složek. Dále jsem vypracoval výpočtový program v softwaru MS Excel, s jehož pomocí jsem modeloval jednofázové poruchy v ustálených stavech.

3.1 Metoda souměrných složek

Při jakékoliv nesymetrii v soustavě se tato soustava stává nesouměrnou. Matematický popis nesouměrné soustavy je nepřehledný a složitý. Proto se aplikuje metoda souměrných složek. Pomocí této metody rozdělíme nesouměrnou třífázovou soustavu na tři souměrné třífázové složky. Tyto složky se nazývají: sousledná (s indexem 1), zpětná (2) a nulová (0). Souměrná třífázová soustava obsahuje pouze souslednou složku. Ostatní dvě složky pak vyjadřují míru nesymetrie v soustavách nesouměrných. Grafický rozklad nesouměrné soustavy na souměrné složky je na *Obr.3.1*.



Obr.3.1 Grafické znázornění rozkladu na souměrné složky [6]

Stejně jako graficky lze rozklad popsat matematicky.

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_a &= \bar{I}_{a1} + \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{a0} \\
 \bar{I}_b &= \bar{I}_{b1} + \bar{I}_{b2} + \bar{I}_{b0} \\
 \bar{I}_c &= \bar{I}_{c1} + \bar{I}_{c2} + \bar{I}_{c0}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Soustavu rovnic *Rov.3.1* zjednodušíme tak, že fázory jednotlivých souměrných složek vztáhneme vždy k jednomu základnímu fázoru.

$$\begin{aligned}\bar{I}_a &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_b &= \bar{a}^{-2} \cdot \bar{I}_1 + \bar{a} \cdot \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_c &= \bar{a} \cdot \bar{I}_1 + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{I}_2 + \bar{I}_0\end{aligned}\quad (3.2)$$

Fázor \bar{a} je operátor natočení, jehož pomocí vyjadřujeme fázový posun mezi fázory jednotlivých souměrných složek. Fázory nulové složky mají stejný směr, proto se operátorem natočení nepronásobují. V rovnicích *Rov.3.3* a *Rov.3.4* jsou vyjádřeny operátory natočení \bar{a} a \bar{a}^2 ve složkovém a v exponenciálním tvaru.

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

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

Úpravou rovnic *Rov.3.2* a jejich převedením do maticového tvaru získáváme rovnici *Rov.3.5*.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^{-2} & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^{-2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} \quad \text{neboli} \quad \bar{I} = \bar{F} \cdot \bar{I}_{(s)} \quad (3.5)$$

Matice \bar{F} se nazývá Fortescue matice. Její inverzní tvar (*Rov.3.6*) se používá při hledání fázorů jednotlivých souměrných složek z fázorů nesouměrné třífázové soustavy, jak je vidět v rovnici *Rov.3.7*.

$$\bar{F}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^{-2} \\ 1 & \bar{a}^{-2} & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^{-2} \\ 1 & \bar{a}^{-2} & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad \text{neboli} \quad \bar{I}_{(s)} = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{I} \quad (3.7)$$

Pro jednotlivé souměrné složky lze tedy zapsat soustavu rovnic:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_a + \bar{a} \cdot \bar{I}_b + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{I}_c) \\ \bar{I}_2 &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_a + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{I}_b + \bar{a} \cdot \bar{I}_c) \\ \bar{I}_0 &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Metoda souměrných složek je také známá pod názvem Fortescue metoda. Stejným způsobem ji lze aplikovat na nesouměrnou soustavu napětí. Tato metoda se nejčastěji používá pro analýzu napěťových a proudových poměrů při jednofázových poruchách. Dále se používá například pro určování míry nesymetrie v nesouměrných soustavách.

3.2 Náhradní schéma

Náhradní schéma pro zemní spojení v izolované síti můžeme tvořit stejně jako pro jednofázový zkrat v síti uzemněné. Platí proto stejné charakteristické rovnice (fáze a je spojena se zemí):

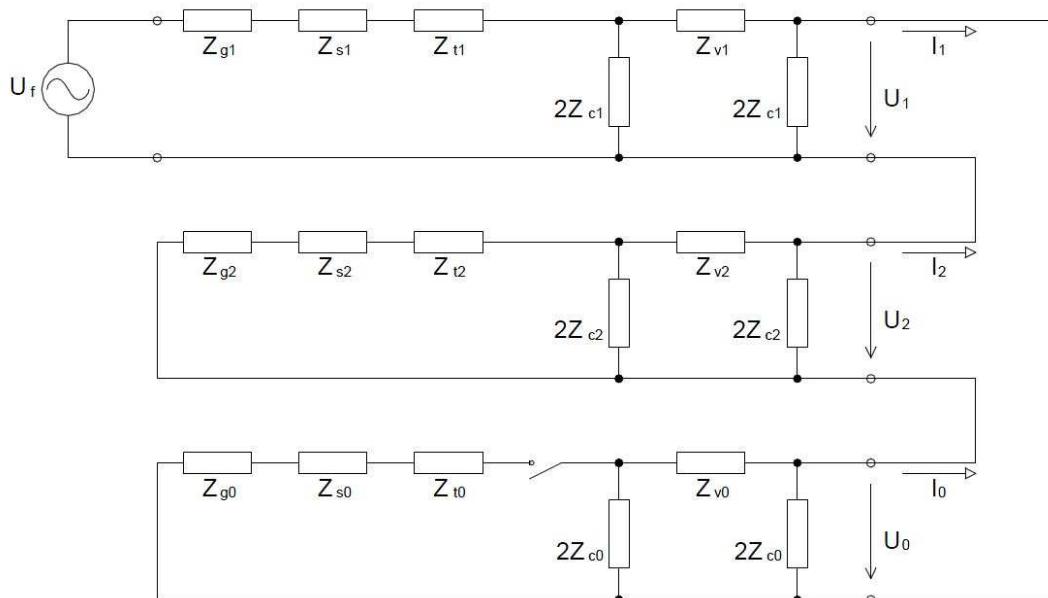
$$U_a = 0 \quad I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad (3.9)$$

Pokud nyní použijeme Rov.3.7 pro analýzu souměrných složek proudu I_a , dostaneme Rov.3.10.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{a1} \\ \bar{I}_{a2} \\ \bar{I}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^{-2} \\ 1 & \bar{a}^{-2} & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\bar{I}_{a1} = \bar{I}_{a2} = \bar{I}_{a0} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_a \quad (3.11)$$

Z Rov.3.11 vyplývá, že při tvorbě náhradního schématu lze náhradní schémata jednotlivých souměrných složek sériově propojit, protože proudy které jimi tečou jsou stejné.



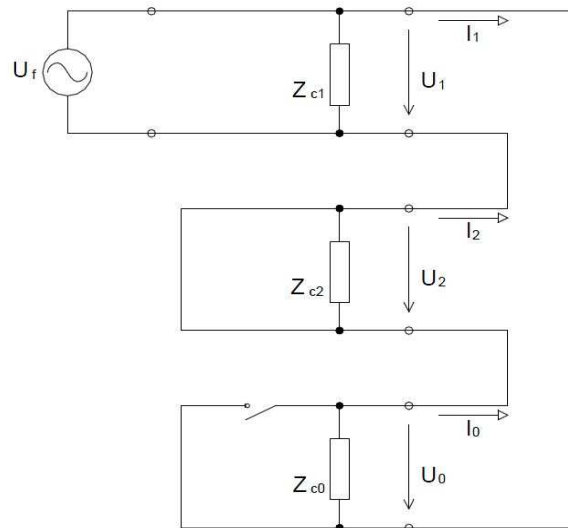
Obr.3.2 Propojení náhradních schémat složkových soustav

Z_g	impedance generátoru
Z_s	impedance sítě
Z_t	impedance transformátoru
Z_v	podélná impedance vedení
Z_c	příčná impedance vedení
index "1"	sousledná složka
index "2"	zpětná složka
index "0"	nulová složka

Jednotlivé parametry ve schématu musí být přepočteny na stejnou napěťovou hladinu. Pokud není uzel transformátoru uzemněn, nemůže se přes transformátor přenášet nulová složka proudu. Proto je v náhradním schématu pro nulovou složku vypínač.

Kapacitní reaktance vedení je mnohonásobně větší než reaktance ostatních prvků

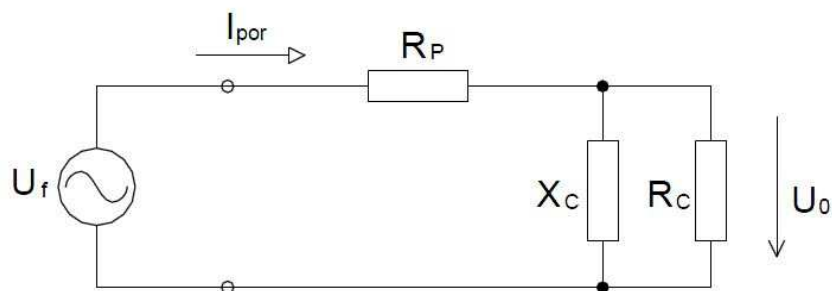
elektrizační soustavy (Podobné platí i pro rezistance, které jsou v porovnání s reaktancemi příslušných prvků zanedbatelné). Podélné parametry můžeme tedy zanedbat a náhradní schéma zjednodušit na *Obr.3.3*.



Obr.3.3 Zjednodušené náhradní schéma složkových soustav

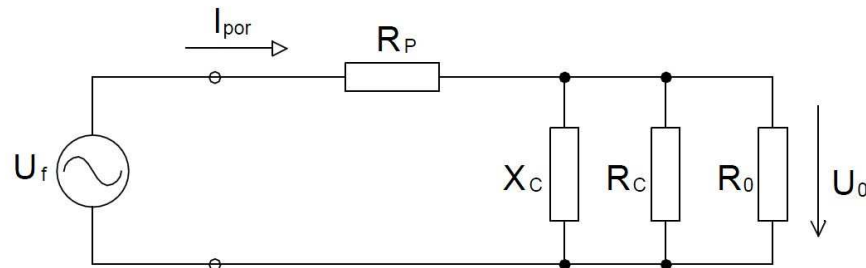
Impedance sousledné a zpětné složky velikost poruchového proudu nijak neovlivní, proto je můžeme vypustit. Náhradní schéma můžeme překreslit do výsledného tvaru *Obr.3.4*. Za nulovou složku impedance je dosazeno z rovnice *Rov.3.12*. V případě, že zemní spojení není kovové, ale odporové, musíme navíc uvažovat přechodový odpor R_P , který je v sérii.

$$Z_{c0} = R_C - jX_C \quad (3.12)$$



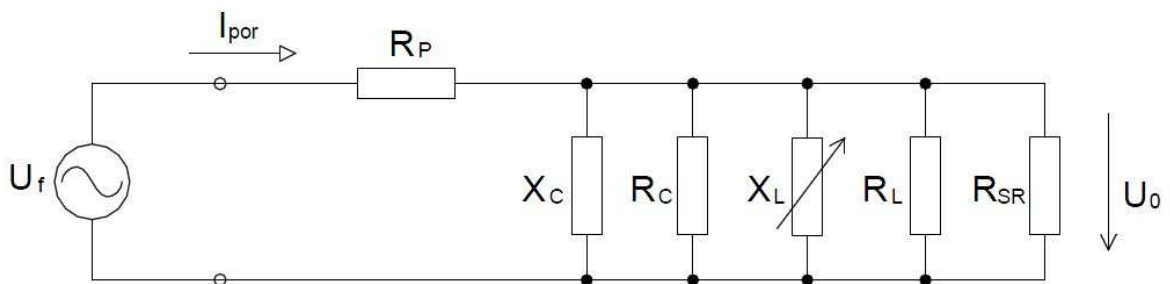
Obr.3.4 Náhradní schéma pro izolovanou síť

Náhradní schéma pro odporově uzemněnou síť se tvoří stejně. Nulová impedance se rozšíří o uzlový odpor R_0 . Na obrázku *Obr.3.5* je toto náhradní schéma znázorněno.



Obr.3.5 Náhradní schéma pro odporově uzemněnou síť

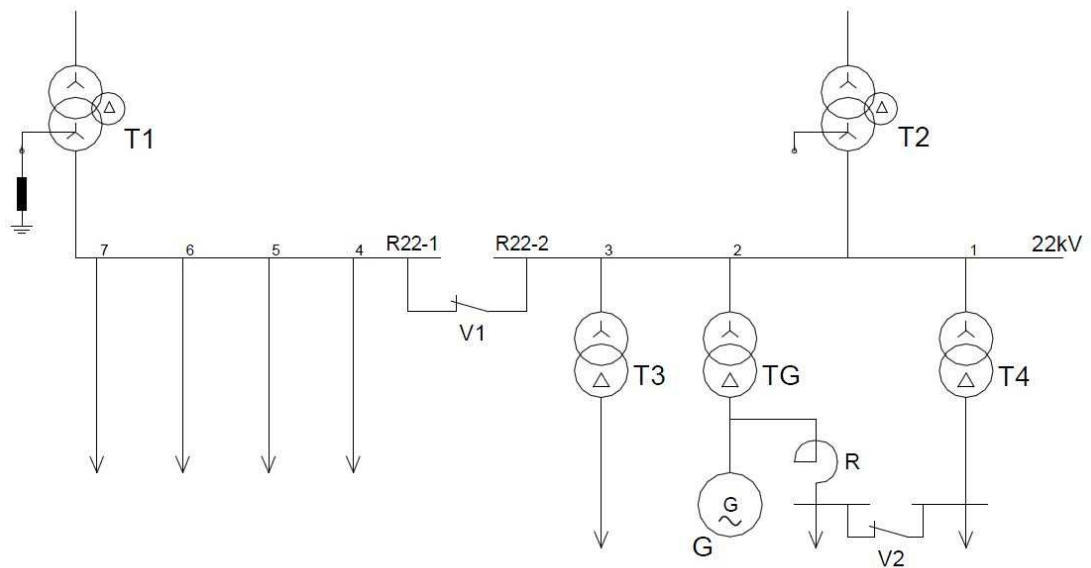
Podobné bude také náhradní schéma pro kompenzovanou síť (*Obr.3.6*). Nulová impedance je navíc tvořena reaktancí zhášecí tlumivky X_L a jejím činným odporem R_L . Pokud je k tlumivce připojen sekundární odporník, musíme uvažovat jeho odpor R_{SR} .



Obr.3.6 Náhradní schéma pro síť uzemněnou přes zhášecí tlumivku

3.3 Popis kabelové sítě

Pro následující výpočty mám zadanou kabelovou síť podle zjednodušeného schématu *Obr.3.7*. Síť je na napěťové hladině 22 kV. Je propojena s napěťovou hladinou 110 kV dvěma distribučními transformátory. Dále je zde generátor, jeho vlastní spotřeba a několik distribučních vývodů. Přípojnice s generátorem (R22-2) je s distribučními vývody (R22-1) propojena přes vypínač, aby bylo možné oddělení těchto dvou částí.



Obr.3.7 Schéma kabelové sítě

Popis schématu:

Transformátory	T1, T2 :	Yynd	110/22 kV	63 MVA
Transformátor	T3 :	Yd	22/6 kV	10 MVA
Transformátor	T4 :	Yd	22/6 kV	6,3 MVA
Blokový transf.	TG :	Yd	22/6 kV	63 MVA
Generátor	G :		6 kV	63 MVA
Vypínače	V1, V2			
Reaktor	R			

Celkový kapacitní proud sítě je součtem kapacitních proudů jednotlivých vývodů. Jsou to kabely $1 \times 240\text{mm}^2$ s XPE izolací a kapacitním proudem $I_C = 3,6 \text{ A/km}$.

Vývod 1:	$l = 0,5 \text{ km}$	$I_C = 1,8 \text{ A}$
Vývod 2:	$l = 0,5 \text{ km}$	$I_C = 1,8 \text{ A}$
Vývod 3:	$l = 1,5 \text{ km}$	$I_C = 5,4 \text{ A}$
Vývod 4:	$l = 30 \text{ km}$	$I_C = 108 \text{ A}$
Vývod 5:	$l = 25 \text{ km}$	$I_C = 90 \text{ A}$
Vývod 6:	$l = 17,5 \text{ km}$	$I_C = 63 \text{ A}$
Vývod 7:	$l = 20 \text{ km}$	$I_C = 72 \text{ A}$

Celkový kapacitní proud: $I_C = 342 \text{ A}$

Činná složka kapacitního proudu, neboli svodový proud, činí 2%. Jeho velikost se určí z rovnice *Rov.3.13*.

$$I_{wc} = \frac{2}{98} \cdot I_C = \frac{2}{98} \cdot 342 = 6,98 \text{ A} \quad (3.13)$$

Transformátory T1 a T2 mají vyvedený uzel k případnému připojení uzlového odporu, nebo zhášecí tlumivky. Tomu se ale budu podrobněji věnovat v dalších kapitolách.

3.4 Nastavení ochran

Zemní ochrany se nastavují na rozběhové (popudové) hodnoty nulového napětí U_0 a nulového proudu I_0 . Při překročení těchto hodnot ochrana detekuje zemní spojení. Ochrana po detekci zemního spojení chráněné vedení odpojuje, nebo pouze signalizuje poruchu. To záleží na typu provozu sítě. Výrobci udávají hodnoty rozběhových napětí U_0 od 10% a proudu I_0 od 1%.

Pro nastavení I_0 je rozhodující použitý typ součtového transformátoru. Jeho jmenovitý proud se volí podle předpokládaného maximálního proudu. Například pro síť podle schématu *Obr.3.7*, která bude provozována jako izolovaná s $I_C = 342 \text{ A}$, volím součtový transformátor 400/5 A.

Velmi důležitá je také třída přesnosti u měřících transformátorů. Například na vývodu 3, kde je transformátor 10MVA, je jmenovitý proud transformátorem:

$$I_{NT} = \frac{S}{U \cdot \sqrt{3}} = \frac{10000}{22 \cdot \sqrt{3}} = 262,4 \text{ A} \quad (3.14)$$

Vývod bude osazen měřícími transformátory 300/5A $\pm 0,5\%$. Relativní odchylka měřícího transformátoru pak je:

$$\Delta I = 300 \cdot 0,005 = 1,5 \text{ A} \quad (3.15)$$

Pokud se vektorově sčítají proudy naměřené měřícími transformátory s přesností 0,5% (0,2%), výsledná odchylka může být větší než 0,5% (0,2%). Proto je nevhodné nastavovat I_0 na nejnižší hodnoty. Nepřesnost měření spolu s nesymetrickým zatížením by mohly zapříčinit falešné detekování zemního spojení.

3.5 Jednofázová porucha v síti.

Tato kapitola je zaměřena na napěťové a proudové poměry v kabelové síti. Porovnám tyto poměry v izolované, odporově uzemněné a kompenzované síti. Případy budu demonstrovat na tabulkových a grafických výstupech výpočtového programu.

3.5.1 Izolovaná síť

Zemní spojení v izolované síti lze znázornit náhradím schématem *Obr.3.4*. V síti podle schématu *Obr.3.7* je kapacitní proud $I_C = 342$ A. To platí pro kovové zemní spojení kdy je $R_p=0$. Pomocí výpočtového programu jsem provedl analýzu napěťových a proudových poměrů pro rostoucí R_p a to v rozsahu 0-3 k Ω .

V tabulce *Tab.3.1* jsou hodnoty poruchového proudu I_{por} a napětí uzlu U_0 pro různé přechodové odpory.

Tab.3.1 Hodnoty I_{por} a U_0 v závislosti na R_p v izolované síti

R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)	R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)
0	342,1	12 702	600	21,1	784
10	328,6	12 202	800	15,8	588
20	298,6	11 089	1000	12,7	471
30	263,5	9 783	1200	10,6	393
50	202,0	7 500	1400	9,1	337
80	142,9	5 306	1600	7,9	295
100	118,3	4 392	1800	7,1	262
200	62,2	2 310	2000	6,3	236
300	41,9	1 556	2500	5,1	189
370	34,1	1 266	2500	5,1	189
400	31,6	1 172	3000	4,2	157

Součtový transformátor pro měření poruchového proudu má převod 400/5A. Na ochraně nastavíme hodnotu 2%. Napětí U_0 nastavíme na hodnotu 10% fázového napětí.

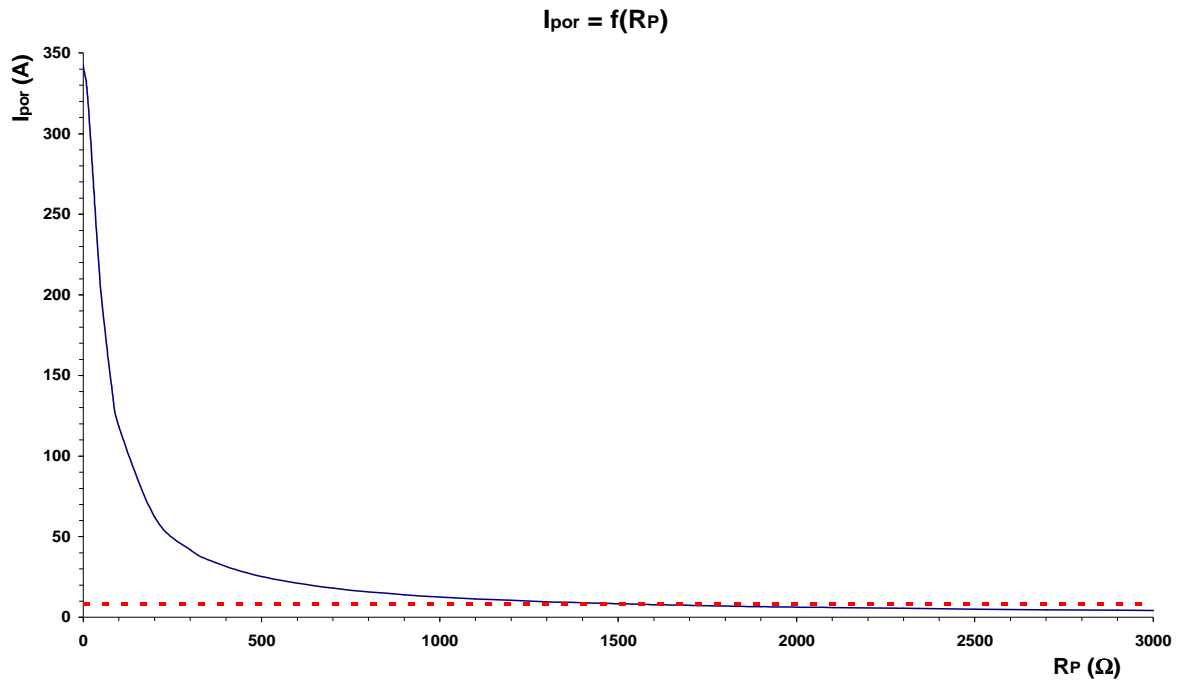
Nastavení ochran:

$$2\% \text{ z } 400\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 8 \text{ A}$$

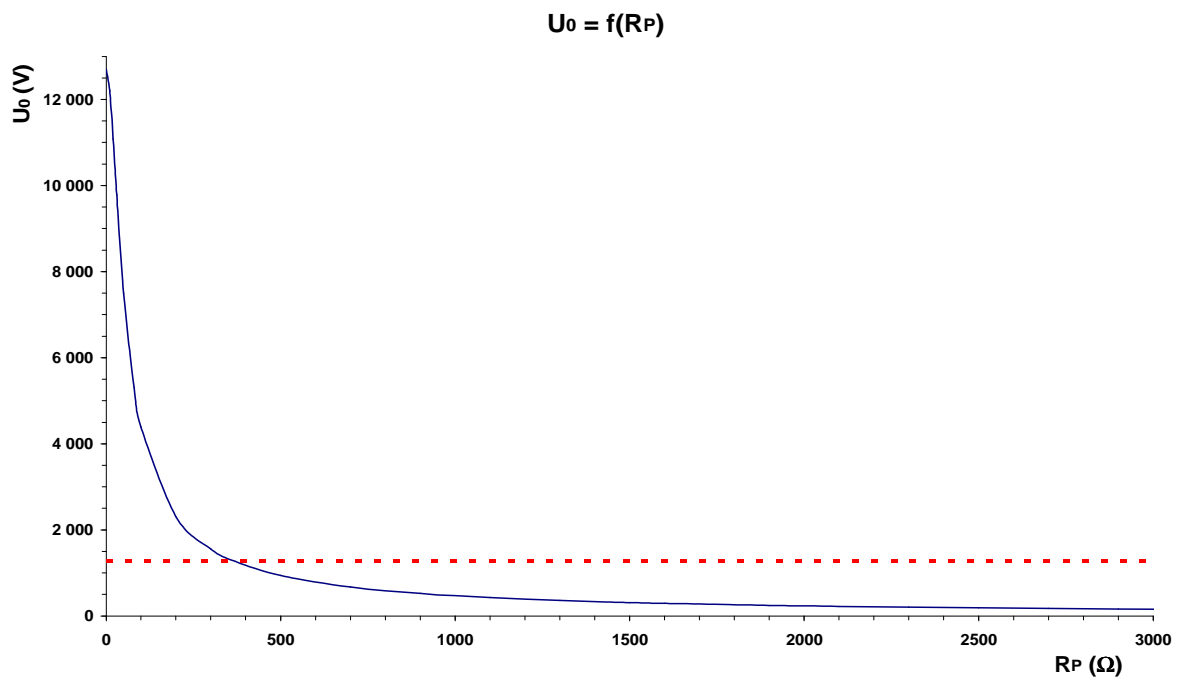
$$10\% \text{ z } 12\,702\text{V} \quad \Rightarrow U_0 = 1\,270 \text{ V}$$

V grafech *Obr.3.8* a *Obr.3.9* jsou graficky znázorněny průběhy poruchového proudu

I_{por} a napětí U_0 v závislosti na přechodovém odporu. Také jsou zde znázorněny hodnoty nastavené na ochranách.



Obr.3.8 I_{por} v závislosti na R_P v izolované síti

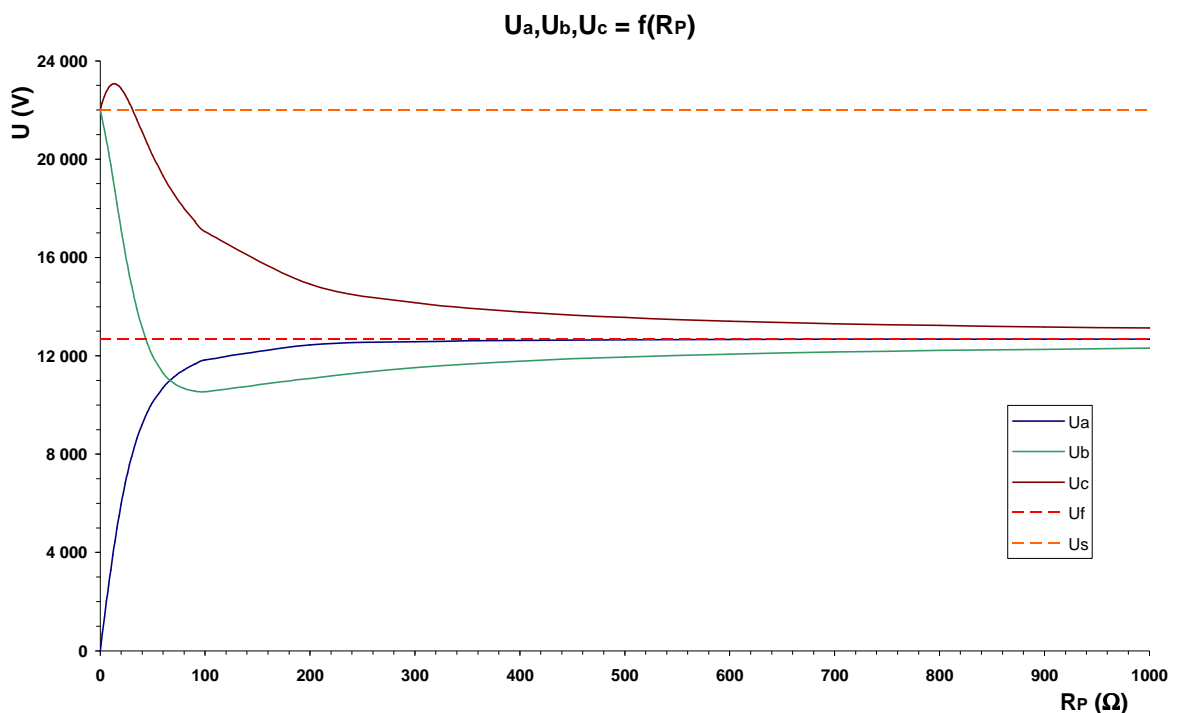


Obr.3.9 U_0 v závislosti na R_P v izolované síti

Z grafů a z tabulky je vidět, že proudový člen zemní ochrany přestává detekovat zemní spojení při $R_P=1600\Omega$. Napěťový člen reaguje pouze do $R_P=370\Omega$.

Při jednofázovém zemním spojení je na zdravých fázích přepětí. V izolované síti toto přepětí není ničím omezováno. Jak jsem již uvedl v kapitole 2.2.3, při odporovém zemním spojení se na jedné ze zdravých fází objeví dokonce napětí vyšší než sdružené napětí. Kovové zemní spojení s $R_P=0$ prakticky neexistuje. V praxi se setkáváme s přechodovými odpory v řádech jednotek až desítek Ω (je považováno za kovové zemní spojení). Právě při těchto hodnotách přechodového odporu přesahuje napětí U_c hodnotu 23kV (v případě této modelové sítě).

V grafu *Obr.3.10* je znázorněn průběh napětí na jednotlivých fázových vodičích v závislosti na velikosti přechodového odporu R_P (porucha je na vodiči *a*). Tento průběh koresponduje s fázorovým diagramem *Obr.2.7*.



Obr.3.10 Napětí fázových vodičů v závislosti na R_P v izolované síti

Detekce zemního spojení je zajištěna pouze do hodnoty přechodového odporu $R_P=1600\Omega$. Při menším přechodovém odporu tečou místem poruchy velké proudy. Tepelný výkon vyvolaný tak velkým proudem by měl destruktivní účinky. Dále by byly ohroženy

zdravé fáze vysokým přepětím. Z obou důvodů by hrozil přechod na vícefázový zkrat. Podle ČSN nelze provozovat izolovanou síť při jednofázovém zemním spojení, pokud je $I_C > 20A$. Toto je důkaz, že by to bylo nevýhodné. [10]

3.5.2 Odporově uzemněná síť

Náhradní schéma pro odporově uzemněnou síť je naznačeno v *Obr.3.5*. V tomto případě je mezi vyvedený uzel transformátoru T1 a zem připojen uzlový odporník, jak je vidět ve schématu *Obr.3.7*. Použitý uzlový odporník vyráběný firmou EGE, spol. s.r.o. má tyto parametry:

<u>NER 450/22,5/22:</u>	Jmenovité napětí	$U_N = 13,3 \text{ kV}$
	Jmenovitý proud	$I_N = 450 \text{ A}$
	Doba zatížení	$t_z = 6 \text{ s}$
	Trvalé zatížení	$I_{Nt} = 22,5 \text{ A}$
	Jmenovitý odpor	$R_0 = 29,5 \Omega$

Uzlový odporník zvětšuje činnou složku proudu a také tlumí vzniklá přepětí. Pokud je přechodový odpor nenulový, chovají se tyto dva odpory jako napěťový dělič. Respektive na přechodovém odporu dochází vlivem průchodu činného proudu k takovému úbytku napětí, že směr tohoto fázoru omezí napětí na zdravých fázích. Aby byla splněna podmínka pro správné tlumení (*Rev.2.12*), nesmí být jmenovitý proud uzlového odporníku nižší než kapacitní proud sítě. Tato podmínka je v tomto případě splněna.

V tabulce *Tab.3.2* jsou hodnoty poruchového proudu I_{por} a napětí uzlu U_0 pro různé přechodové odpory v rozsahu 0-3k Ω .

Tab.3.2 Hodnoty I_{por} a U_0 v závislosti na R_p v odporově uzemněné síti

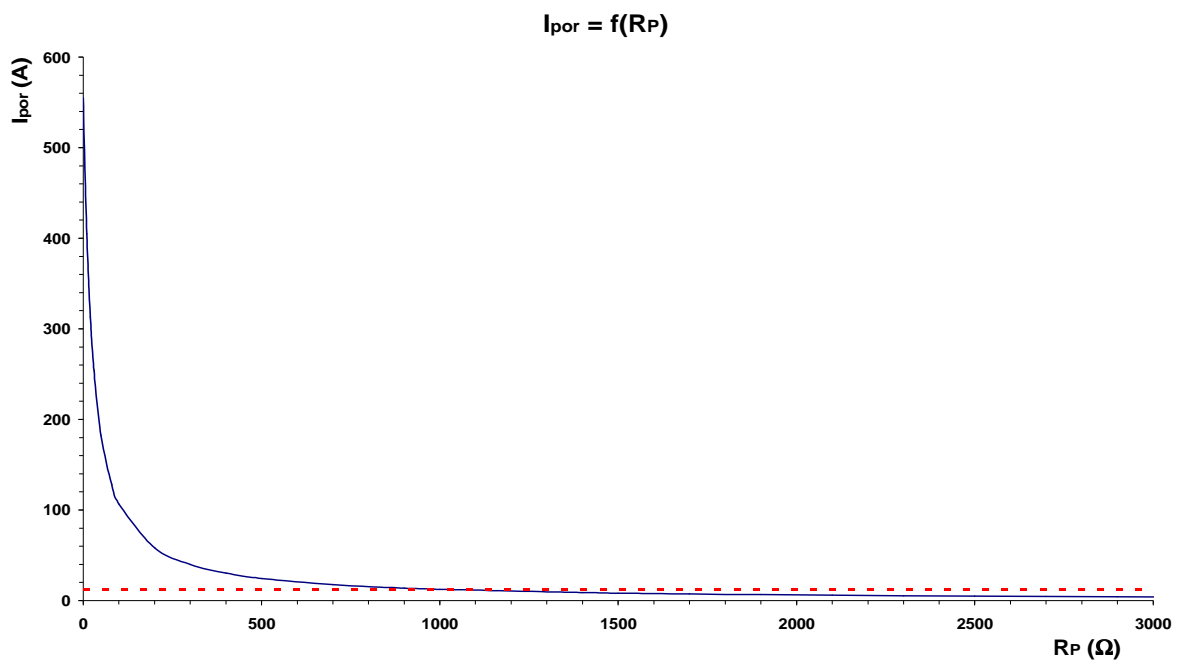
R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)	R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)
0	555,2	12 702	600	20,5	470
10	405,0	9 264	800	15,5	355
20	313,2	7 166	1000	12,5	285
30	253,8	5 806	1200	10,4	239
50	182,8	4 183	1400	9,0	205
80	128,3	2 934	1600	7,8	180
100	106,9	2 445	1800	7,0	160
200	58,1	1 330	2000	6,3	144
300	39,9	913	2500	5,0	115
400	30,4	695	2500	5,0	115
500	24,5	561	3000	4,2	96

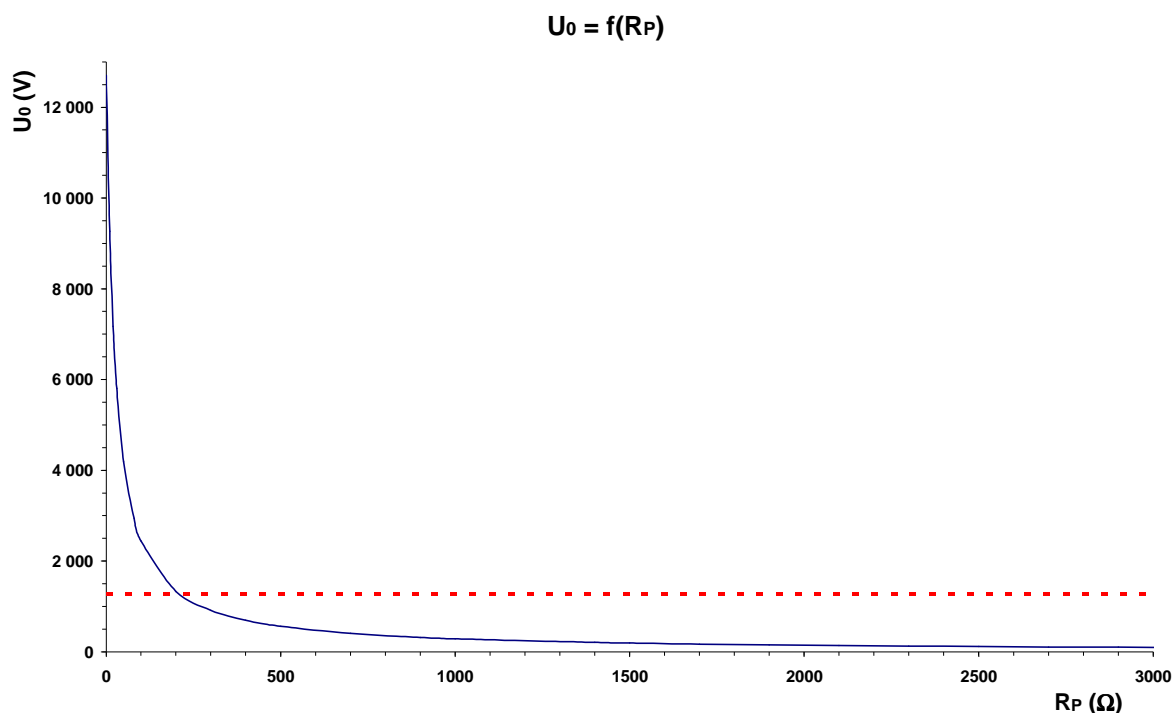
Při nulovém přechodovém odporu teče místem poruchy proud $I_{por}=555\text{A}$. Součtový transformátor pro měření poruchového proudu bude mít převod 600/5A. Na ochraně nastavíme hodnotu 2%. Nastavení napětí U_0 bude stejné jako v předchozím případě, 10% fázového napětí.

Nastavení ochran:

$$2\% \text{ z } 600\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 12 \text{ A}$$

$$10\% \text{ z } 12\,702\text{V} \quad \Rightarrow U_0 = 1\,270 \text{ V}$$

Obr.3.11 I_{por} v závislosti na R_p v odporově uzemněné síti

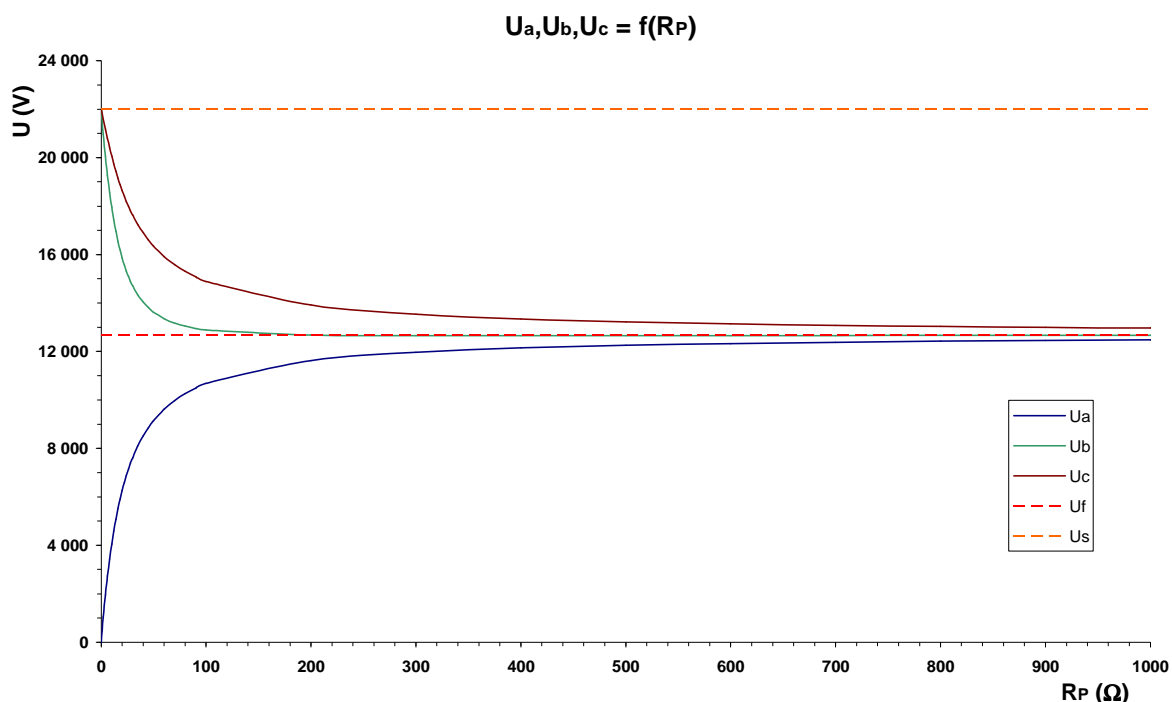


Obr.3.12 U_0 v závislosti na R_P v odporově uzemněné síti

Na Obr.3.11 a Obr.3.12 jsou grafy závislostí poruchového proudu I_{por} a napětí U_0 na přechodovém odporu. Jsou zde opět vyznačeny meze, kdy reagují ochrany.

Jak je vidět, proudový člen zemní ochrany reaguje do $R_P=1000\Omega$ a napěťový člen do $R_P=200\Omega$. To jsou ještě nižší hodnoty než v izolované síti. Pokud bychom nastavili proudový člen na 1,5% ($I_0 = 9$ A) detekoval by poruchu do $R_P=1400\Omega$. Mohli bychom se ale setkat s již zmíněným problémem s nepřesností měřících transformátorů.

Výhodou odporově uzemněné sítě zůstává to, že tlumí přepětí na zdravých vodičích. Graf Obr.3.13 ukazuje napětí na jednotlivých fázových vodičích v závislosti na přechodovém odporu R_P .



Obr. 3.13 Napětí fázových vodičů v závislosti na R_P v odporově uzemněné síti

Zvýšení činné složky poruchového proudu usnadňuje identifikaci postiženého vývodu. Odporově uzemněná síť se ale s jednofázovou poruchou neprovozuje. Stejně jako v předchozím případě hrozí nebezpečný přechod na vícefázový zkrat.

3.5.3 Kompenzovaná síť

Náhradní schéma kompenzované sítě je na obrázku Obr. 3.5. V síti podle schématu Obr. 3.7 je mezi uzel transformátoru T1 a zem na místo uzlového odporníku připojena zhášecí tlumivka. Použijeme zhášecí tlumivku vyráběnou firmou EGE, spol. s.r.o. Tato tlumivka má následující parametry:

<u>ASR 4.0:</u>	Jmenovité napětí	$U_N = 13,3 \text{ kV}$
	Jmenovitý krátkodobý výkon (2h)	$S_N = 5200 \text{ kVA}$
	Jmenovitý trvalý výkon	$S_{Nt} = 4700 \text{ kVA}$
	Jmenovitý krátkodobý proud	$I_N = 390 \text{ A}$
	Jmenovitý trvalý proud	$I_{Nt} = 350 \text{ A}$
<u>Vinutí:</u>	Hlavní vinutí	$U_N = 13,3 \text{ kV}$
	Měřicí vinutí	100 V
	Pomocné výkonové vinutí	500 V

Pokud je zhášecí tlumivka přesně vyladěna, kompenzuje kapacitní proud sítě v místě poruchy. Výsledný proud je pak zlomkem původního proudu a má činný charakter. Je dán pouze svodem vedení a činnými ztrátami v tlumivce. Míra činného proudu tlumivkou je u zhášecích tlumivek firmy EGE okolo 1%.

V praxi se ale tlumivka neladí přesně. Tlumivka tvoří s kapacitní nesymetrií ve vyladěném stavu paralelní rezonanci a je tudíž namáhána vysokým rezonančním napětím. Toto je ale problém spojený spíše s venkovním vedením. Kabelové sítě mají nesymetrii podstatně menší a napětí na tlumivce nedosahuje nebezpečných hodnot. Rozladění zhášecí tlumivky nabízí dvě možnosti: přeladění nebo podladění. Výhodnější je stav kdy je tlumivka podladěna, tedy X_L je záměrně větší než X_C . Při vyhledávání místa zemního spojení postupným zkracováním postiženého vývodu se postupně zmenšuje kapacita vedení C a kapacitní reaktance X_C narůstá. Tím se kompenzovaná síť přibližuje k vyladěnému stavu.

V tabulce *Tab.3.3* jsou hodnoty poruchového proudu I_{por} a napětí uzlu U_0 v závislosti na přechodovém odporu R_p v rozsahu 0-5k Ω . Ve výpočtovém programu jsem nastavil kompenzační tlumivku tak, aby byla o 1% podladěna. Činná složka proudu procházejícího tlumivkou je 1%. Jeho velikost v případě, že tlumivka kompenzuje plný kapacitní proud sítě ($R_p=0$) je určena v rovnici *Rov.3.16*.

$$I_{WL} = \frac{1}{99} \cdot I_L = \frac{1}{99} \cdot 342 = 3,45 \text{ A} \quad (3.16)$$

Tab.3.3 Hodnoty I_{por} a U_0 v závislosti na R_p v kompenzované síti

R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)	R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)
0	10,9	12 702	1700	4,5	5 217
20	10,8	12 497	2000	4,1	4 720
50	10,5	12 201	2300	3,7	4 309
80	10,3	11 918	2600	3,4	3 963
100	10,1	11 737	2900	3,2	3 669
200	9,4	10 903	3100	3,0	3 496
300	8,8	10 176	3400	2,8	3 264
500	7,7	8 972	3700	2,6	3 062
800	6,6	7 612	4000	2,5	2 883
1100	5,7	6 605	4500	2,3	2 627
1400	5,0	5 830	5000	2,1	2 412

Pro měření poruchového proudu v kompenzované síti volím součtový transformátor s převodem 100/1 A. Na ochraně nastavíme rozběhový proud 5%, nebo eventuelně 3%. Rozběhové napětí U_0 ponecháme na 10% fázového napětí.

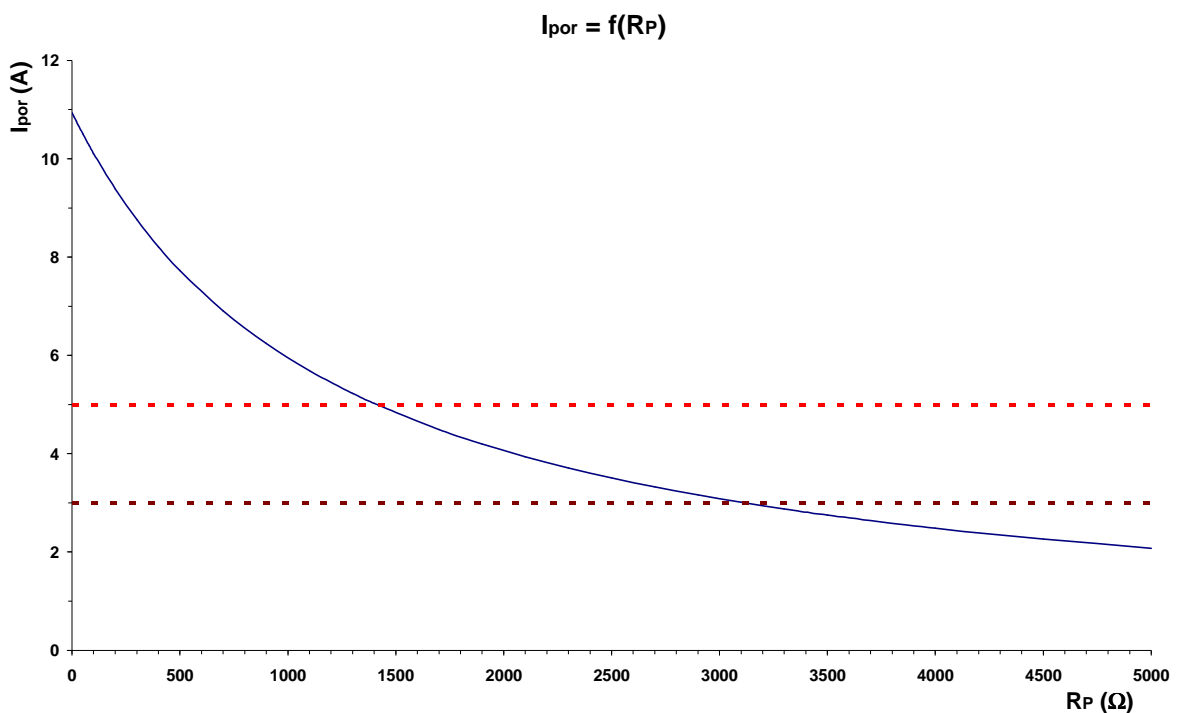
Nastavení ochran:

$$5\% \text{ z } 100\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 5 \text{ A}$$

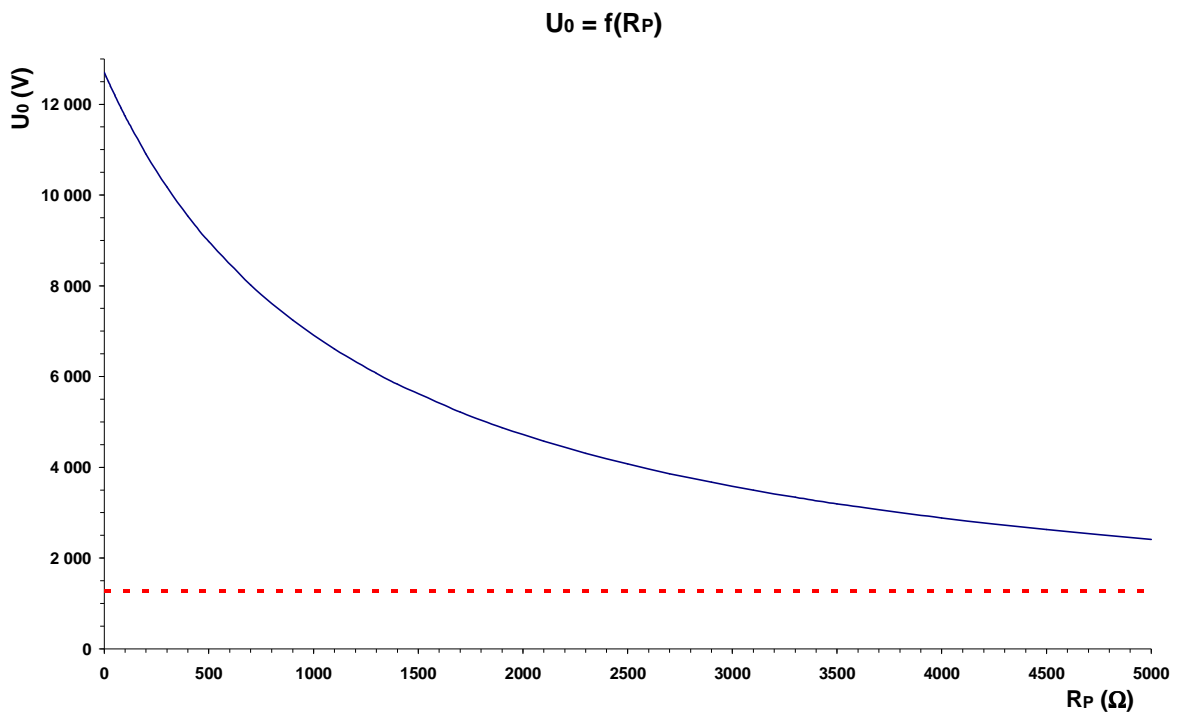
$$(3\% \text{ z } 100\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 3 \text{ A})$$

$$10\% \text{ z } 12\,702\text{V} \quad \Rightarrow U_0 = 1\,270 \text{ V}$$

Grafy *Obr.3.14* a *Obr.3.15* zobrazují závislosti poruchového proudu I_{por} a napětí U_0 na přechodovém odporu. Vyznačeny jsou také hodnoty nastavené na ochranách.



Obr.3.14 I_{por} v závislosti na R_P v kompenzované síti



Obr.3.15 U_0 v závislosti na R_P v kompenzované síti

Zemní ochrana je schopna identifikovat postižený vývod podle proudového členu nastaveného na hodnotu 5A do přechodového odporu $R_P=1400\Omega$. Při nastavení na hodnotu 3A až do $R_P=3100\Omega$. V tomto případě bychom se ale mohli setkat s již zmíněným problémem falešného detekování zemního spojení. Napětí U_0 je ale nad rozběhovou hodnotou v celém rozsahu zkoumání (0-5k Ω) a detekce zemního spojení je tedy zajištěna. Vhodným řešením je dovybavit zhášecí tlumivku sekundárním odporníkem, který krátkodobě zvýší hodnotu činného proudu. Použijeme sekundární odporník vyráběný firmou EGE, spol. s.r.o.

<u>SRA 2250/6:</u>	Jmenovité napětí	$U_N = 500 \text{ V}$
	Jmenovitý proud	$I_N = 2250 \text{ A}$
	Doba zatížení	$t_z = 6 \text{ s}$
	Jmenovitý odpor	$R_{SR} = 0,22 - 6 \Omega$

Sekundární odporník SRA 2250/6 je vybaven automatikou, která podle charakteru zemní poruchy určí a nastaví velikost připínaného odporu tak, aby byla zajištěna bezpečná identifikace postiženého vývodu zemní ochranou. Odporník je vybaven pěti výkonovými

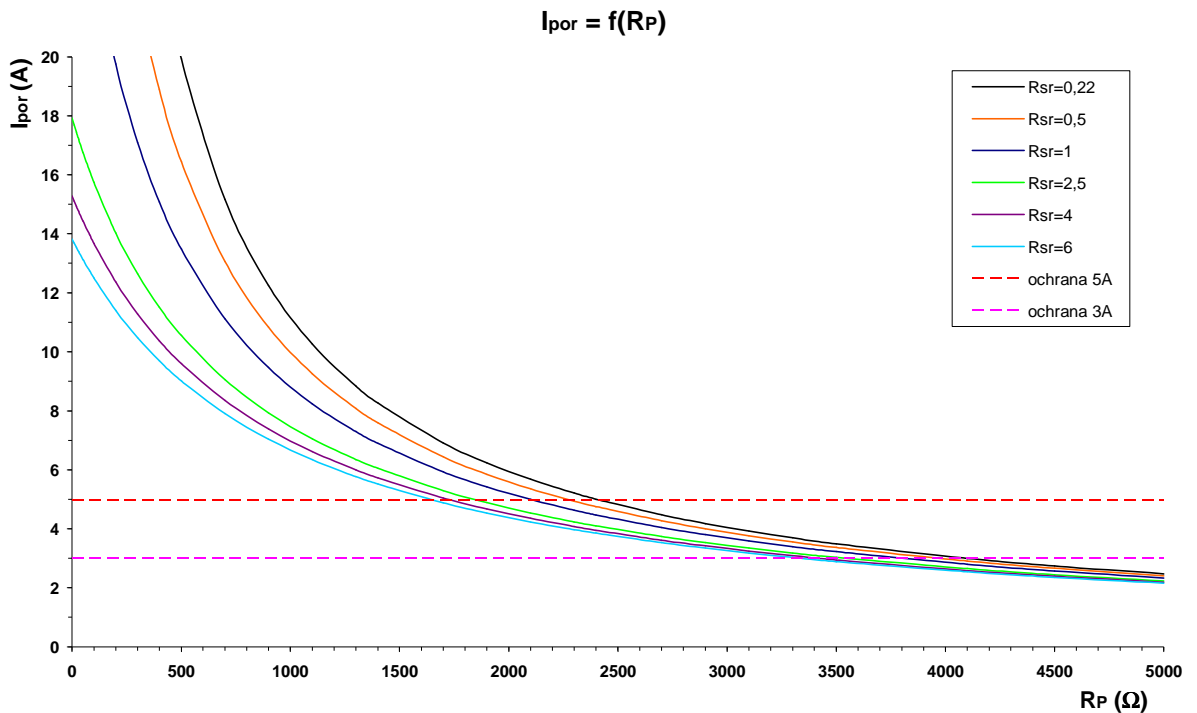
odpory ($4 \times 1 \Omega$ a $1 \times 2 \Omega$). Pomocí stykačů jsou odpory zapojeny do sériové, paralelní nebo sérioparalelní kombinace. Výsledný odpor je tak možné stupňovitě nastavovat v rozmezí $0,22 - 6 \Omega$. Odporník je připínán buď jednorázově, nebo v sekvenci několika po sobě jdoucích přípnutí. Sekundární odporník je ke zhasací tlumivce připojen přes pomocné výkonové vinutí. Velikost připínaného odporu je tedy nutné přepočítat na primární stranu. Příkladem přepočtu je rovnice *Rov.3.17*.

$$R_{SR}' = R_{SR} \cdot \left(\frac{13,3}{0,5} \right)^2 = 0,22 \cdot \left(\frac{13,3}{0,5} \right)^2 = 155,66 \Omega \quad (3.17)$$

V tabulce *Tab.3.4* jsou hodnoty zvýšeného I_{por} v závislosti na přechodovém odporu. Výpočet hodnot I_{por} jsem provedl pro několik velikostí sekundárního odporu. Stejná závislost je graficky zobrazena v obrázku *Obr.3.16*. Opět jsou zde vyznačeny rozběhové hodnoty ochran.

Tab.3.4 Hodnoty I_{por} v závislosti na R_p v kompenzované síti s použitím SRA 2250/6

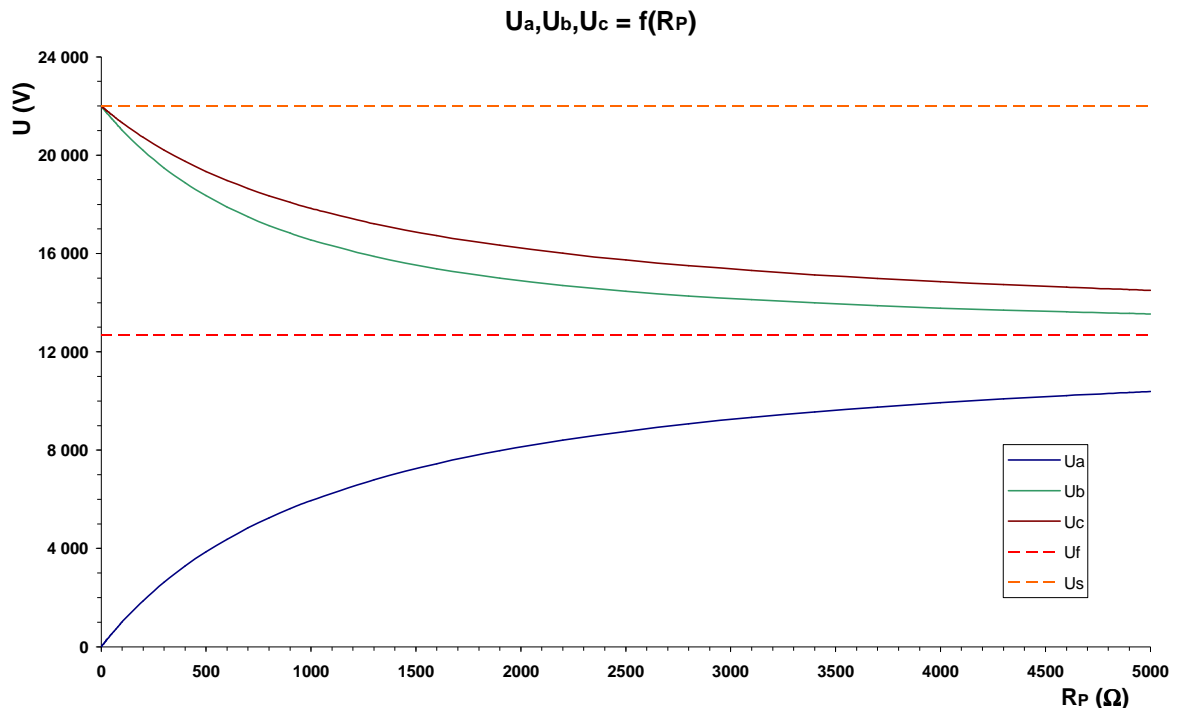
$R_{sr} (\Omega)$	0,22	0,5	1	2,5	4	6
$R_p (\Omega)$	$I_{por} (A)$	$I_{por} (A)$	$I_{por} (A)$	$I_{por} (A)$	$I_{por} (A)$	$I_{por} (A)$
0	92,3	46,5	28,6	17,9	15,3	13,8
300	29,0	22,2	17,1	12,6	11,3	10,5
600	17,2	14,6	12,2	9,8	8,9	8,4
900	12,2	10,8	9,5	7,9	7,4	7,0
1200	9,5	8,6	7,7	6,7	6,3	6,0
1500	7,8	7,2	6,5	5,8	5,5	5,3
1800	6,6	6,1	5,7	5,1	4,9	4,7
2100	5,7	5,4	5,0	4,5	4,4	4,2
2400	5,0	4,8	4,5	4,1	3,9	3,9
2700	4,5	4,3	4,0	3,7	3,6	3,5
3000	4,0	3,9	3,7	3,4	3,3	3,3
3200	3,8	3,7	3,5	3,3	3,2	3,1
3500	3,5	3,4	3,2	3,0	2,9	2,9
3800	3,2	3,1	3,0	2,8	2,8	2,7
4100	3,0	2,9	2,8	2,6	2,6	2,5
4400	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4
4700	2,6	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3
5000	2,5	2,4	2,3	2,2	2,2	2,2



Obr.3.16 I_{por} v závislosti na R_P v kompenzované síti s použitím SRA 2250/6

Při zvýšení poruchového proudu pomocí sekundárního odporníku je zemní ochrana nastavená na rozběhový proud 5A schopna identifikovat postižené vedení do velikosti přechodového odporu $R_P=2400\Omega$. Při nastavení na 3A se tato hranice posouvá až na $R_P=4100\Omega$.

Na obrázku *Obr.3.17* je graficky znázorněn průběh napětí na fázových vodičích v závislosti na velikosti přechodového odporu.



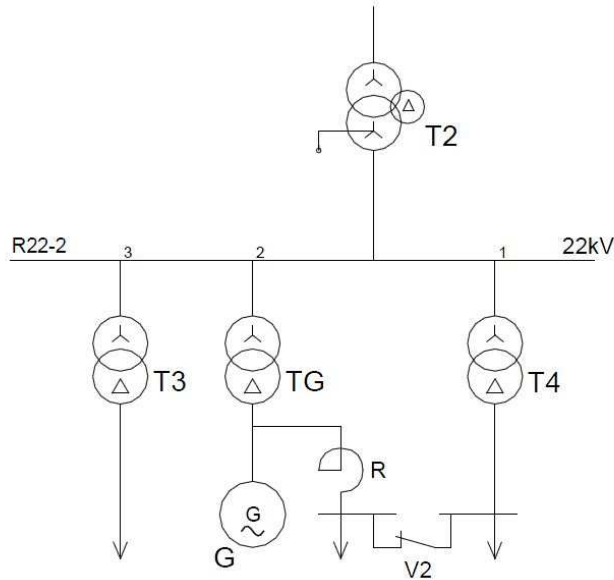
Obr.3.17 Napětí fázových vodičů v závislosti na R_P v kompenzované síti

Napětí na zdravých fázích je tlumeno průchodem zbytkového poruchového proudu přes přechodový odpor. Tento proud není velký, proto je tlumení pozvolné a při přechodových odporech v řádech stovek Ω je na zdravých fázích stále výrazné přepětí. To, že napětí U_c je tlumeno méně než napětí U_b , je důsledkem podladění zhášecí tlumivky. Pokud by byla tlumivka přeladěna, platilo by $U_b > U_c$. Kdyby byla tlumivka vyladěna přesně a byl tak zcela vykompenzován kapacitní proud sítě, zbytkový proud by měl výhradně činný charakter a velikosti napětí U_b a U_c by byly stejné.

Velikost poruchového proudu v kompenzované kabelové síti je relativně malá a přijatelná pro provozování s jednofázovou poruchou. Nevýhodou je přepětí na zdravých fázích, obzvláště při nižších hodnotách přechodového odporu. Vyhledávání zemního spojení je v tomto případě možné až do velikosti přechodového odporu $R_P = 4100 \Omega$. Z těchto důvodů se jeví provoz s kompenzační tlumivkou (a sekundárním odporníkem) jako nejvýhodnější řešení takovéto kabelové sítě. Toto řešení ale samozřejmě bude také náročné na pořizovací náklady.

3.6 Oddělení části sítě s vlastním zdrojem

Schéma oddělené části sítě s vlastním zdrojem je na obrázku *Obr.3.18*.



Obr.3.18 Schéma oddělené části kabelové sítě

Vývod 1: $l = 0,5 \text{ km}$ $I_C = 1,8 \text{ A}$

Vývod 2: $l = 0,5 \text{ km}$ $I_C = 1,8 \text{ A}$

Vývod 3: $l = 1,5 \text{ km}$ $I_C = 5,4 \text{ A}$

Celkový kapacitní proud: $I_C = 9 \text{ A}$

$$I_{wc} = \frac{2}{98} \cdot I_C = \frac{2}{98} \cdot 9 = 0,18 \text{ A} \quad (3.18)$$

K oddělení malé části sítě s vlastním zdrojem může dojít z několika důvodů:

- Při zemním spojení na některém z vývodů přípojnice R22-1 (schéma *Obr.3.7*) odepneme vypínač a R22-2 tak bude bez poruchy. Generátor pak dodává energii do distribuční sítě přes transformátor T2.
- Při zemním spojení ve vlastní spotřebě elektrárny (na R22-2). Přípojnice R22-1 bude napájena transformátorem T1 a bude tedy bez zemního spojení.
- Dále například můžeme chtít snížit zkratový výkon na přípojnicích R22-1 a R22-2. Odepnutím vypínače přerušíme paralelní chod transformátorů T1 a T2.

Ve všech těchto případech je nutné zabývat se napěťovými a proudovými poměry v této malé síti. Nyní opět provedu analýzu napěťových a proudových poměrů pomocí výpočtového programu a to pro izolovanou, odporově uzemněnou a kompenzovanou síť.

3.6.1 Izolovaná síť

Budeme předpokládat, že předtím než byla část sítě s vlastním zdrojem oddělena, byla rozsáhlá síť podle schématu *Obr.3.7* provozována jako kompenzovaná. Oddělená síť je nyní izolovaná, protože vyvedený uzel transformátoru T2 není nijak uzemněn (*Obr.3.18*).

Na vývodech zůstávají součtové transformátory z předchozího stavu, tedy s převodem 100/1 A. V této malé síti sice nehrozí velká nesymetrie zatížení, ale problém s měřicími transformátory zůstává (viz. kapitola 3.4). Přestože kapacitní proud sítě je $I_C = 9$ A, ponecháme nastavení ochran pro I_0 na 5%, eventuelně 3%. Rozběhové napětí U_0 necháme na 10% fázového napětí.

Nastavení ochran:

$$5\% \text{ z } 100\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 5 \text{ A}$$

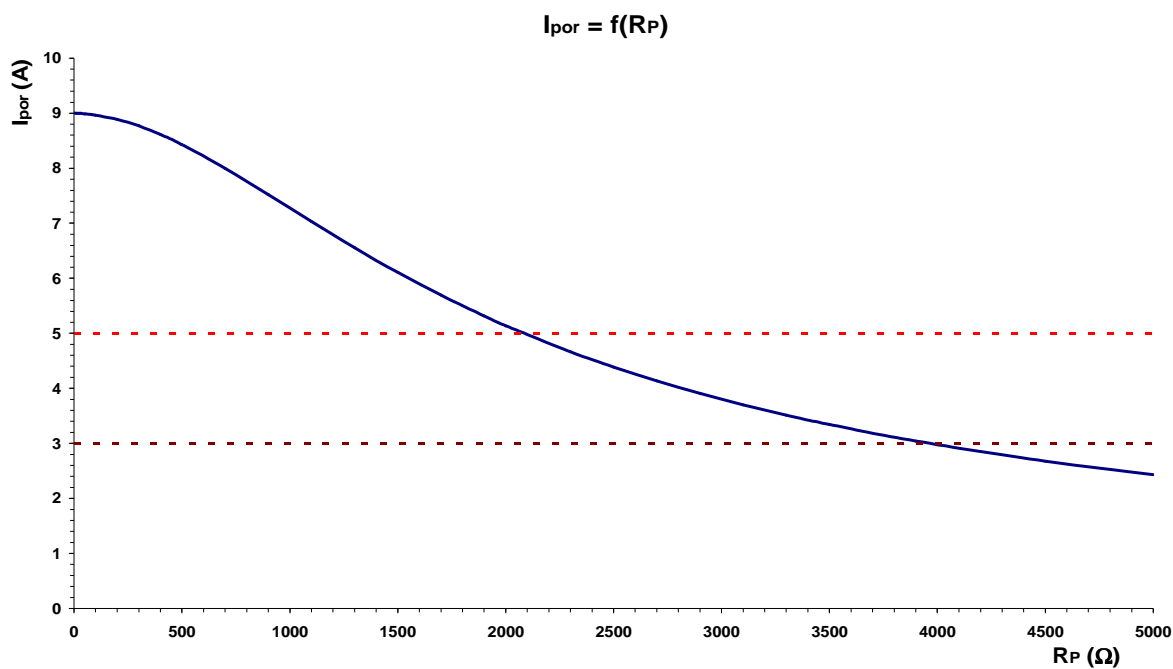
$$(3\% \text{ z } 100\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 3 \text{ A})$$

$$10\% \text{ z } 12\,702\text{V} \quad \Rightarrow U_0 = 1\,270 \text{ V}$$

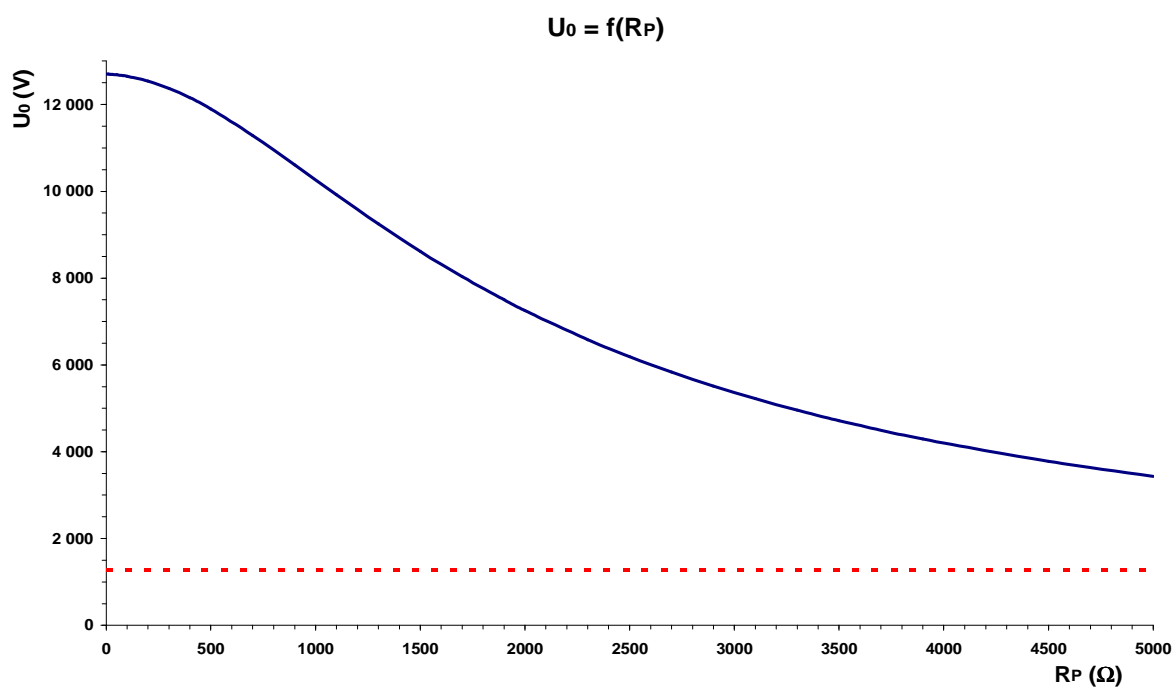
Tab.3.5 Hodnoty I_{por} a U_0 v závislosti na R_p v izolované síti

R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)	R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)
0	9,00	12 702	1300	6,55	9 248
50	8,99	12 685	1500	6,11	8 616
100	8,97	12 652	1700	5,69	8 032
150	8,93	12 604	2000	5,14	7 253
200	8,89	12 540	2300	4,67	6 582
300	8,77	12 373	2600	4,26	6 007
400	8,61	12 155	3000	3,80	5 364
500	8,43	11 896	3500	3,34	4 716
700	8,00	11 287	3900	3,04	4 293
900	7,52	10 611	4500	2,68	3 778
1100	7,03	9 920	5000	2,43	3 431

V tabulce *Tab.3.5* jsou hodnoty poruchového proudu I_{por} a napětí uzlu U_0 pro různé přechodové odpory $0-5k\Omega$. V grafech *Obr.3.19* a *Obr.3.20* jsou tyto hodnoty znázorněny graficky spolu s nastavením ochran.

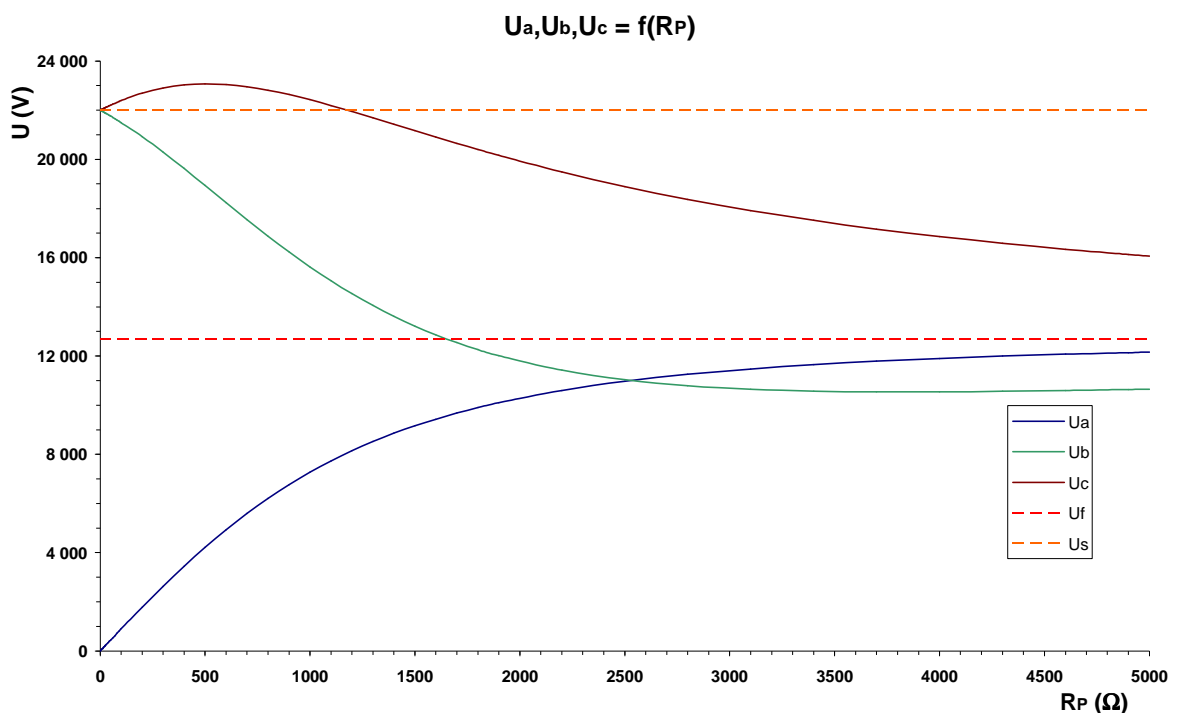


Obr.3.19 I_{por} v závislosti na R_P v izolované síti



Obr.3.20 U_0 v závislosti na R_P v izolované síti

Jak je vidět z tabulky a grafů, detekce zemního spojení je zajištěna v celém rozsahu. Napětí U_0 neklesá pod rozběhovou hodnotu. Proudový člen nastavený na 5A reaguje do hodnoty $R_p=2000\Omega$ a při nastavení na 3A až do $R_p=3900\Omega$. Tato malá izolovaná kabelová síť lze provozovat s jednofázovým zemním spojením. Nežádoucí je ale přepětí na zdravých fázích. Průběh napětí na fázových vodičích v závislosti na přechodovém odporu R_p je na obrázku *Obr.3.21*.



Obr.3.21 Napětí fázových vodičů v závislosti na R_p v izolované síti

Napětí U_c , které je v bezporuchovém stavu na hodnotě fázového napětí, překračuje do přechodového odporu $R_p=1100\Omega$ hodnotu 22kV. V celém zkoumaném rozsahu pak neklesá pod 16 kV. To je pro trvalý provoz kabelového vodiče nebezpečný jev.

3.6.2 Odporově uzemněná síť

V tomto případě je transformátor T2 uzemněn přes uzlový odporník vyráběný firmou EGE, spol. s.r.o.

<u>NER 300/22:</u>	Jmenovité napětí	$U_N = 13,3 \text{ kV}$
	Jmenovitý proud	$I_N = 300 \text{ A}$
	Doba zatížení	$t_z = 6 \text{ s}$
	Jmenovitý odpor	$R_0 = 44,3 \Omega$

Tab. 3.6 Hodnoty I_{por} a U_0 v závislosti na R_p v odporově uzemněné síti

$R_p (\Omega)$	$I_{\text{por}} (\text{A})$	$U_0 (\text{V})$	$R_p (\Omega)$	$I_{\text{por}} (\text{A})$	$U_0 (\text{V})$
0	287,3	12 702	1100	11,1	491
30	171,2	7 568	1300	9,4	418
60	121,9	5 389	1500	8,2	364
100	88,1	3 895	2000	6,2	275
200	52,0	2 300	2500	5,0	221
300	36,9	1 632	3000	4,2	184
400	28,6	1 264	3500	3,6	158
500	23,3	1 032	4000	3,1	139
700	17,1	755	4500	2,8	124
900	13,5	595	5000	2,5	111

Při nulovém přechodovém odporu teče místem poruchy proud $I_{\text{por}}=287\text{A}$. Součtový transformátor pro měření poruchového proudu s převodem 100/1A není dostačující. Nebylo by ani možné síť provozovat s jednofázovou poruchou. Proto je přechod z kompenzované sítě na síť uzemněnou přes nízkoohmový odpor nevhodný (v tomto případě).

3.6.3 Síť uzemněná přes vysokoohmový odpor

Uzemnění sítě přes vysokoohmový odpor není v ČSN definováno. Na takto uzemněnou síť se pohlíží jako na izolovanou. Mezi vyvedený uzel transformátoru T2 a zem je tedy připojen vysokoohmový odpor.

<u>Vysokoohmový odpor:</u>	Jmenovité napětí	$U_N = 13,3 \text{ kV}$
	Jmenovitý proud	$I_N = 44,3 \text{ A}$
	Jmenovitý odpor	$R_0 = 300 \Omega$

V tabulce *Tab.3.7* jsou hodnoty poruchového proudu I_{por} a napětí uzlu U_0 při jednofázovém zemním spojení pro různé přechodové odpory v rozsahu 0-5k Ω .

Tab.3.7 Hodnoty I_{por} a U_0 v závislosti na R_p v síti uzemněné přes vysokohmový odpor

R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)	R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)
0	43,5	12 702	1300	8,0	2 339
50	37,2	10 875	1500	7,1	2 077
100	32,5	9 503	1700	6,4	1 868
150	28,9	8 434	2000	5,6	1 623
200	25,9	7 581	2200	5,1	1 493
300	21,6	6 302	2600	4,4	1 286
400	18,4	5 391	3000	3,9	1 129
500	16,1	4 709	3500	3,4	980
700	12,9	3 758	4000	3,0	866
900	10,7	3 126	4500	2,7	776
1100	9,2	2 676	5000	2,4	702

Nastavení ochran zůstává stejné jako u izolované sítě. Ze stejných důvodů.

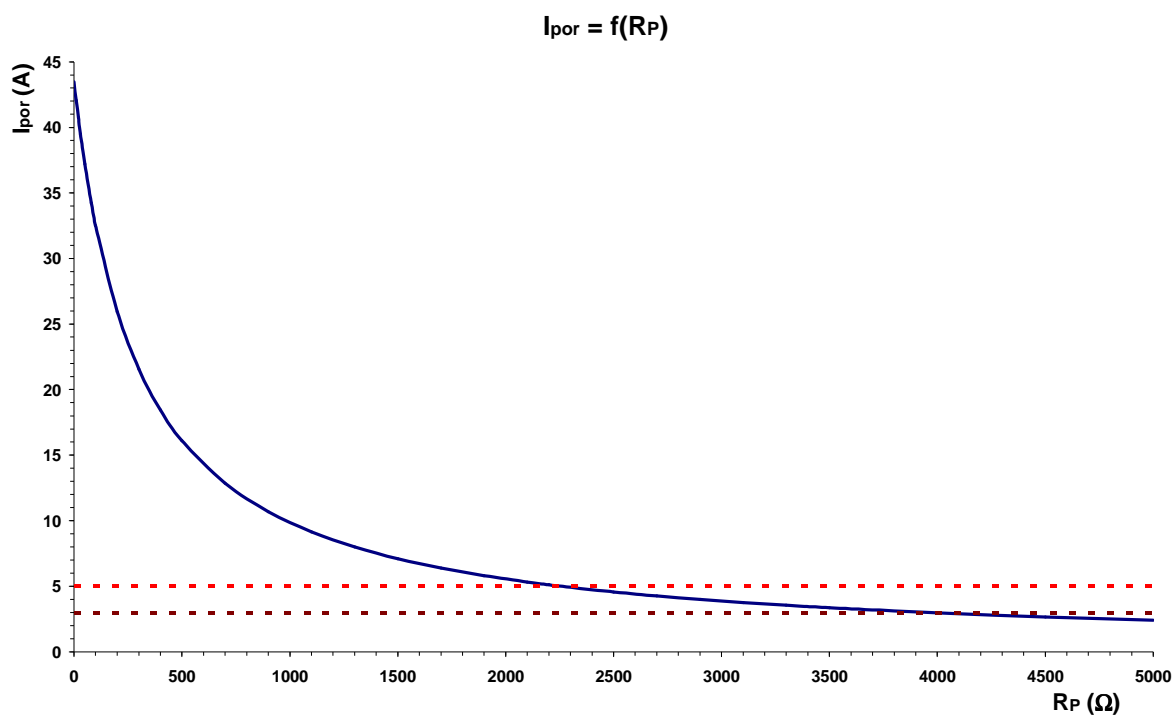
Nastavení ochran:

$$5\% \text{ z } 100\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 5 \text{ A}$$

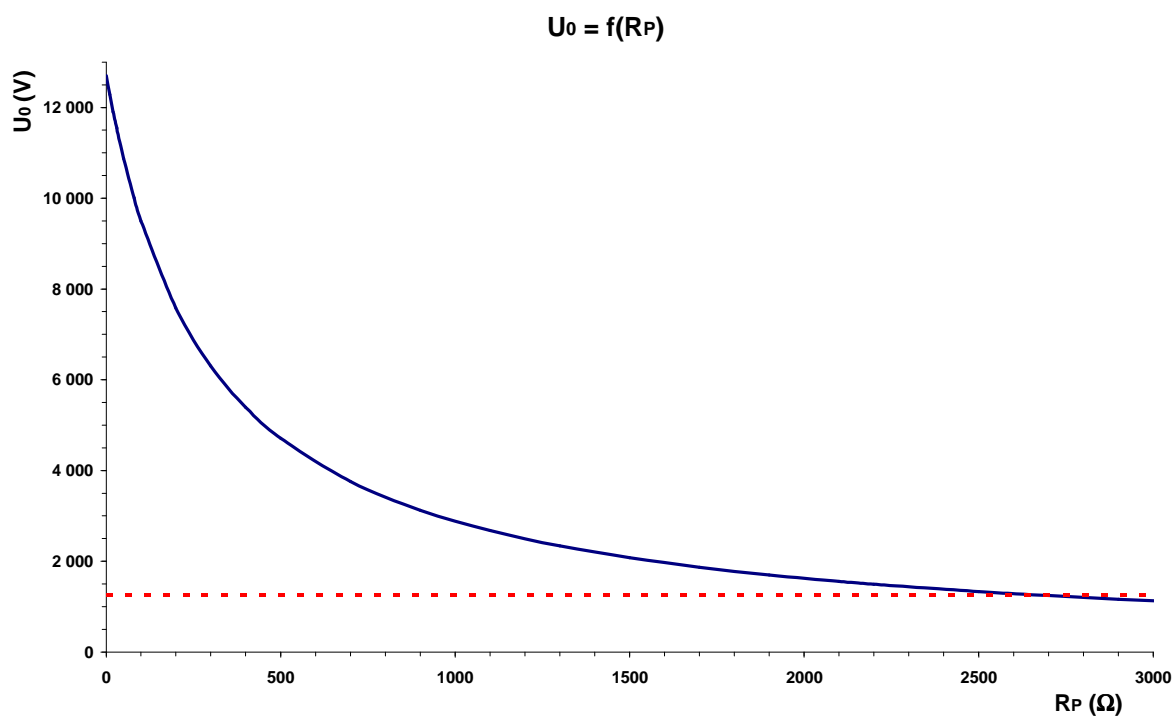
$$(3\% \text{ z } 100\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 3 \text{ A})$$

$$10\% \text{ z } 12\,702\text{V} \quad \Rightarrow U_0 = 1\,270 \text{ V}$$

Na *Obr.3.22* a *Obr.3.23* jsou grafy závislostí poruchového proudu I_{por} a napětí U_0 na přechodovém odporu. Jsou zde opět vyznačeny meze, kdy reagují ochrany.

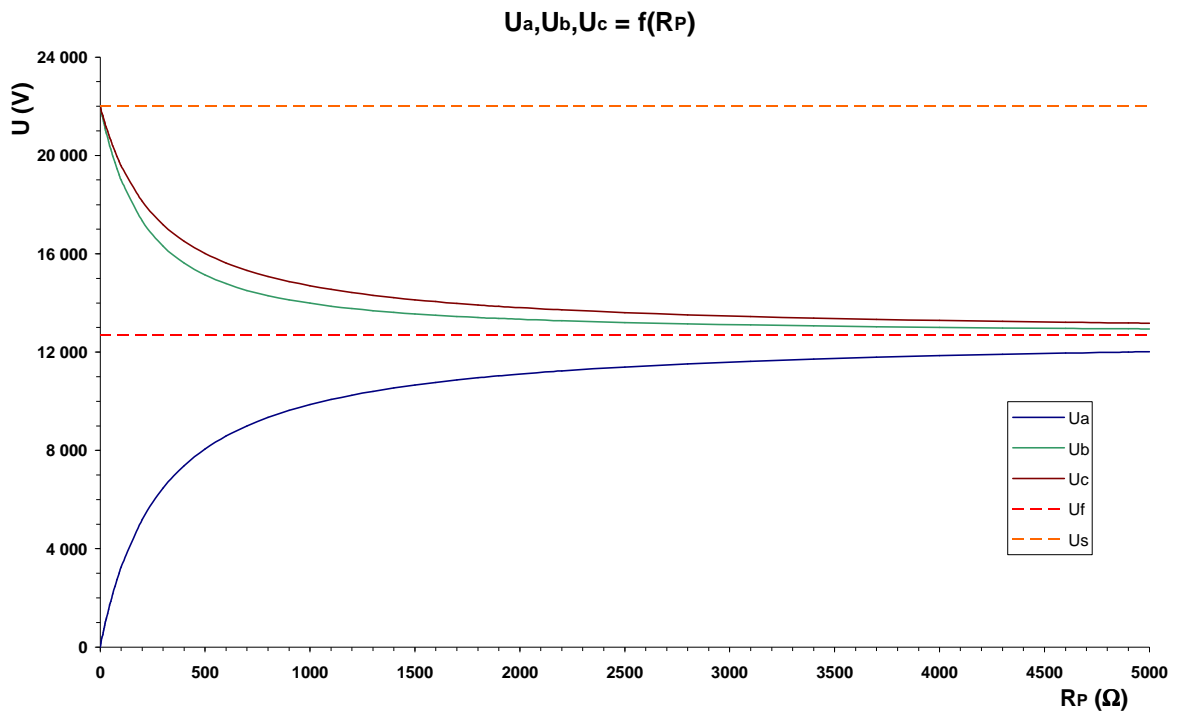


Obr.3.22 I_{por} v závislosti na R_P v síti uzemněné přes vysokohmový odpor



Obr.3.23 U_0 v závislosti na R_P v síti uzemněné přes vysokohmový odpor

Napěťový člen zemní ochrany reaguje oproti izolované síti jen do $R_P=2600\Omega$. Proudový člen detekuje zemní spojení při podobných hodnotách jako v izolované síti. Při nastavení ochrany na 5A do $R_P=2200\Omega$ a při nastavení na 3A do $R_P=4000\Omega$. Oproti izolované síti je zde výrazné tlumení přepětí na zdravých fázích. To je zobrazeno v grafu Obr.3.24.



Obr.3.24 Napětí fázových vodičů v síti uzemněné přes vysokohomový odpor

Síť uzemněnou přes vysokohomový odpor 300Ω je možné se zemním spojením provozovat. Podle ČSN nesmí zbytkový poruchový proud přesáhnout hodnotu 60A, což se v tomto případě neděje. [10]

V izolované síti je sice z důvodu vyššího U_0 větší spolehlivost detekce zemního spojení, ale v síti uzemněné přes vysokohomový odpor je díky zvýšení činné složky poruchového proudu zajištěna snazší identifikace postiženého vývodu. Důležitou předností je oproti izolované síti již zmíněné tlumení přepětí na zdravých fázových vodičích.

3.6.4 Kompenzovaná síť

V tomto případě je transformátor T2 uzemněn přes zhášecí tlumivku. Použitá zhášecí tlumivka vyráběná firmou EGE, spol. s.r.o. má následující parametry:

<u>ASR 0.16:</u>	Jmenovité napětí	$U_N = 13,3 \text{ kV}$
	Jmenovitý krátkodobý výkon (2h)	$S_N = 250 \text{ kVA}$
	Jmenovitý trvalý výkon	$S_{Nt} = 200 \text{ kVA}$
	Jmenovitý krátkodobý proud	$I_N = 19 \text{ A}$
	Jmenovitý trvalý proud	$I_{Nt} = 15 \text{ A}$
<u>Vinutí:</u>	Hlavní vinutí	$U_N = 13,3 \text{ kV}$
	Měřicí vinutí	100 V
	Pomocné výkonové vinutí	500 V

Podladění zhášecí tlumivky jsem tentokrát ve výpočtovém programu nastavil na 2%. Činné ztráty v tlumivce tvoří 1%. V tabulce *Tab.3.8* jsou hodnoty poruchového proudu I_{por} a napětí uzlu U_0 v závislosti na přechodovém odporu R_p v rozsahu 0-5k Ω .

Tab.3.8 Hodnoty I_{por} a U_0 v závislosti na R_p v kompenzované síti

R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)	R_p (Ω)	I_{por} (A)	U_0 (V)
0	0,325	12 702	1300	0,316	12 355
50	0,325	12 688	1500	0,315	12 303
100	0,324	12 674	1700	0,313	12 251
150	0,324	12 661	2000	0,311	12 174
200	0,324	12 647	2300	0,309	12 098
300	0,323	12 620	2600	0,308	12 023
400	0,322	12 593	3000	0,305	11 924
500	0,321	12 566	3500	0,302	11 802
700	0,320	12 513	3900	0,299	11 705
900	0,319	12 460	4500	0,296	11 564
1100	0,317	12 407	5000	0,293	11 447

Nastavení ochran ponecháme stejné jako při provozování rozsáhlé kabelové sítě s kompenzační tlumivkou.

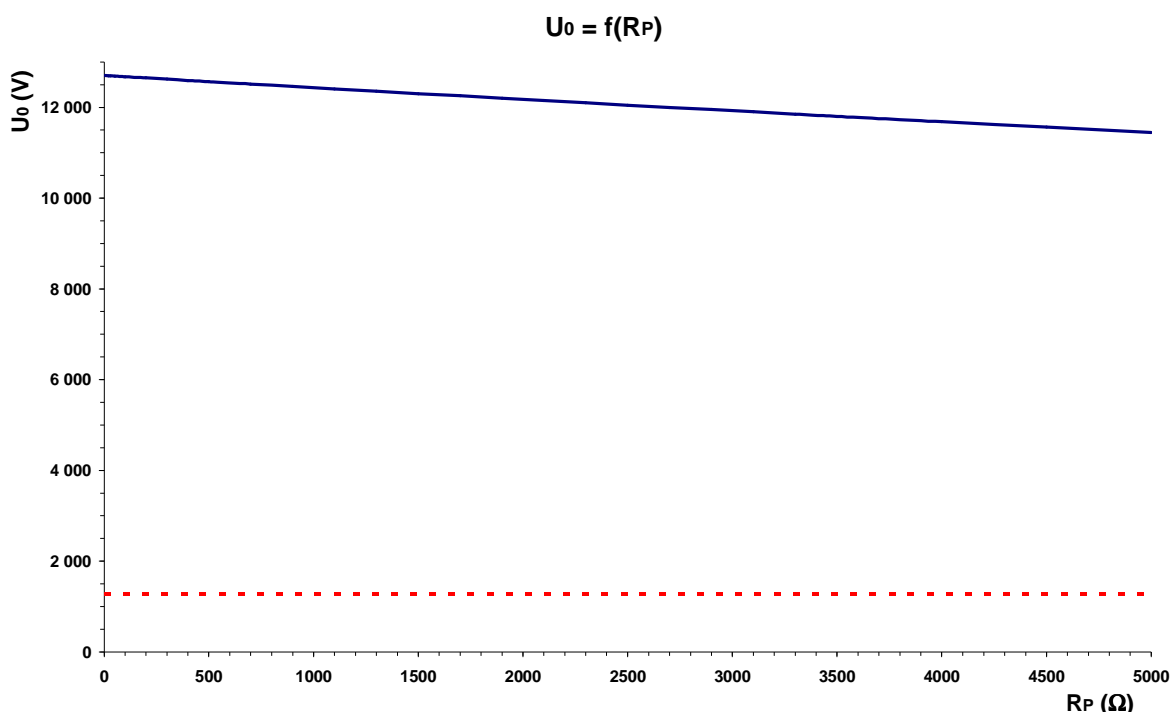
Nastavení ochran:

$$5\% \text{ z } 100\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 5 \text{ A}$$

$$(3\% \text{ z } 100\text{A} \quad \Rightarrow I_0 = 3 \text{ A})$$

$$10\% \text{ z } 12\,702\text{V} \quad \Rightarrow U_0 = 1\,270 \text{ V}$$

Zbytkový poruchový proud se v celém zkoumaném rozsahu pohybuje kolem 300mA. Tak nízký proud v podmínkách, kdy přecházíme z rozsáhlé sítě na malou síť prakticky není možné zaznamenat. Napětí U_0 jen pozvolna klesá, jak je vidět na obrázku *Obr.3.25*.



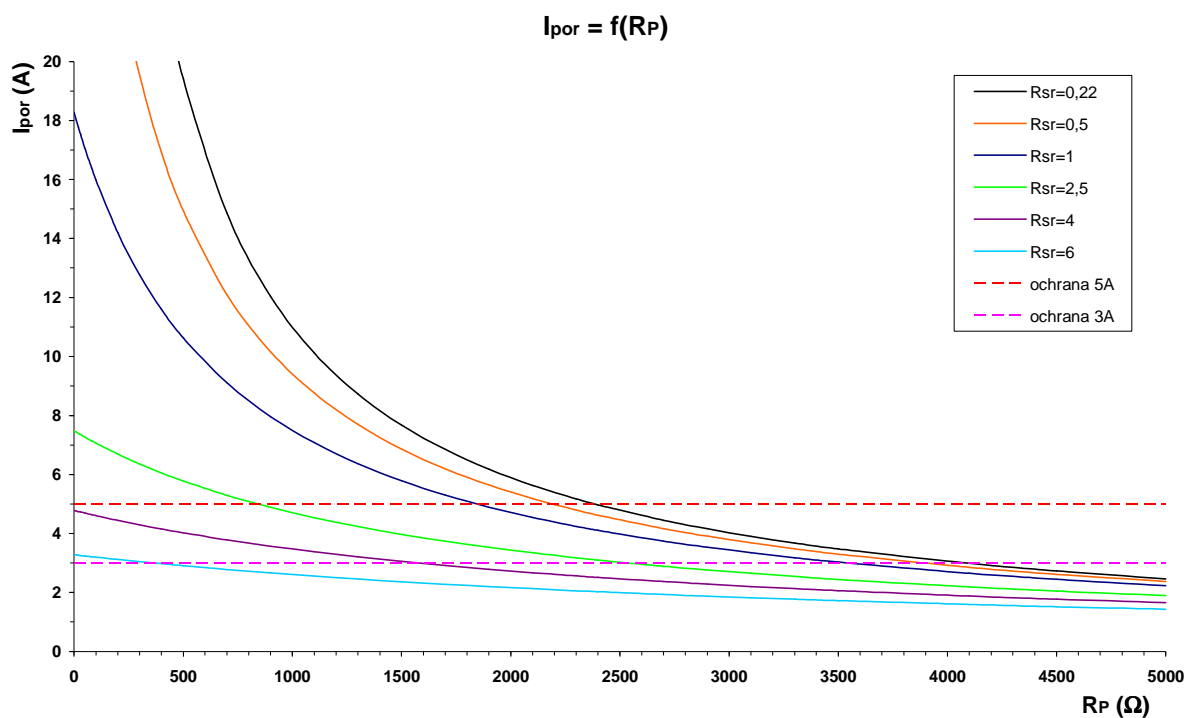
Obr.3.25 U_0 v závislosti na R_P v kompenzované síti

Zemní spojení je tedy podle napětí U_0 snadno identifikovatelné. Při použití sekundárního odporníku dočasně připínaného k pomocnému výkonovému vinutí zhášecí tlumivky se zvýší hodnota poruchového proudu. Použijeme stejný sekundární odporník SRA 2250/6, jaký byl v kombinaci s kompenzační tlumivkou v rozsáhlé síti (kapitola 3.5.3).

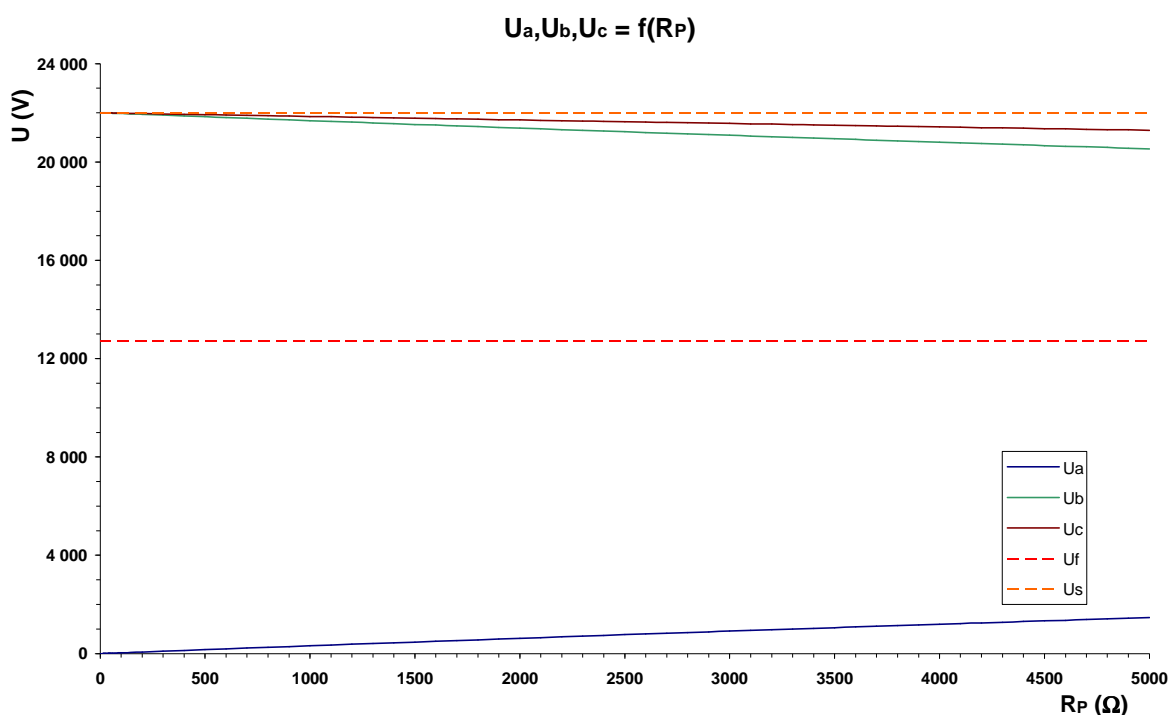
V tabulce *Tab.3.9* jsou velikosti poruchových proudů pro různé stupně sekundárního odporníku. Tyto výsledky jsou následně zobrazeny také graficky v grafu *Obr.3.26*.

Tab.3.9 Hodnoty I_{por} v závislosti na R_p v kompenzované síti s použitím SRA 2250/6

R_s (Ω)	0,22	0,5	1	2,5	4	6
R_p (Ω)	I_{por} (A)	I_{por} (A)	I_{por} (A)	I_{por} (A)	I_{por} (A)	I_{por} (A)
0	82,1	36,3	18,3	7,5	4,8	3,3
300	27,9	19,5	12,8	6,4	4,3	3,0
600	16,8	13,4	9,8	5,5	3,9	2,8
900	12,0	10,2	8,0	4,9	3,6	2,7
1200	9,4	8,2	6,7	4,4	3,3	2,5
1500	7,7	6,9	5,8	4,0	3,1	2,4
1800	6,5	5,9	5,1	3,6	2,8	2,2
2100	5,6	5,2	4,5	3,3	2,7	2,1
2400	5,0	4,6	4,1	3,1	2,5	2,0
2700	4,4	4,2	3,7	2,9	2,4	1,9
3000	4,0	3,8	3,4	2,7	2,2	1,8
3200	3,8	3,6	3,3	2,6	2,2	1,8
3500	3,5	3,3	3,0	2,4	2,1	1,7
3800	3,2	3,1	2,8	2,3	2,0	1,7
4100	3,0	2,9	2,6	2,2	1,9	1,6
4400	2,8	2,7	2,5	2,1	1,8	1,5
4700	2,6	2,5	2,4	2,0	1,7	1,5
5000	2,5	2,4	2,2	1,9	1,7	1,4

Obr.3.26 I_{por} v závislosti na R_p v kompenzované síti s použitím SRA 2250/6

S použitím sekundárního odporníku je zemní ochrana schopna detekovat postižený vývod při nastavení na 5A do $R_P=2400\Omega$ a při nastavení na 3A do $R_P=4100\Omega$. Přes přechodový odpor prochází sice téměř činný, ale velmi malý zbytkový poruchový proud. Dochází tak jen k malému tlumení vzniklého přepětí. Průběh napětí fázových vodičů v závislosti na přechodovém odporu poruchy je v grafu *Obr.3.17*.



Obr.3.17 Napětí fázových vodičů v závislosti na R_P v kompenzované síti

Vlastnosti této malé kabelové sítě provozované s kompenzační tlumivkou jsou v ohledu detekce zemního spojení srovnatelné s předchozími posuzovanými případy (izolovaný uzel a uzel uzemněný přes vysokohmový odpor). Místem poruchy protéká zanedbatelný proud a lze tak síť pohodlně provozovat s jednofázovým zemním spojením. Přepětí na zdravých fázích ale ve zkoumaném rozsahu přechodového odporu (0-5k Ω) klesá z 22kV pouze na 21kV. Jak již bylo řečeno, toto je u kabelové sítě velmi nepříznivý jev.

3.7 Návrh řešení provozu kabelové sítě

Kabelová síť podle schématu *Obr.3.7* má kapacitní proud $I_C=342\text{A}$. Provozovat tuto síť jako izolovanou nepřipadá podle ČSN v úvahu.

Při uzemnění přes odpor je výrazně tlumeno přepětí. Identifikace postiženého vývodu je ale zajištěna pouze do velikosti přechodového odporu $R_P=1400\Omega$. Činná složka poruchového proudu navíc pomáhá ochranám reagujícím na velikost činného výkonu. Toto řešení je pro kabelové sítě doporučované, ale z důvodu vysokých hodnot poruchového proudu nedovoluje provoz s jednofázovou poruchou.

Jako optimální se pro takto rozsáhlou síť ukázalo řešení provozu s kompenzační tlumivkou. Zemní spojení je v síti detekováno v celém zkoumaném rozsahu ($0-5\text{k}\Omega$) a postižený vývod je identifikován do hodnoty přechodového odporu $R_P=4100\Omega$ (bez připínaného sekundárního odporníku do $R_P=3100\Omega$). Velikost poruchového proudu není pro kabelovou síť nebezpečná a lze ji proto provozovat s jednofázovým zemním spojením. Tento provoz by však neměl být dlouhodobý, protože zdravé fázové vodiče jsou namáhány přepětím, které je účinně tlumeno až při hodnotách přechodového odporu v řádech $\text{k}\Omega$ (*Obr.3.17*).

Při oddělení malé části sítě s vlastním zdrojem vycházím z předpokladu, že síť byla před oddělením neúčinně uzemněna přes transformátor T1 (kompenzovaná síť). Po oddělení tedy přechází na síť izolovanou. V této malé kabelové síti podle schématu *Obr.3.18* je kapacitní proud $I_C=9\text{A}$. Provoz s jednofázovým zemním spojením je možný. Zemní spojení je detekováno v celém zkoumaném rozsahu ($0-5\text{k}\Omega$) a postižený vývod je identifikován do hodnoty přechodového odporu $R_P=3900\Omega$. V síti je ale velké přepětí, které do hodnoty přechodového odporu $R_P=1100\Omega$ přesahuje 22kV a v celém zkoumaném rozsahu neklesá pod 16kV (*Obr.3.17*).

Pro (neúčinné) uzemnění je možné využít vyvedený uzel transformátoru T2. Další možností by bylo vybavit přípojnicí R22-2 zemním transformátorem (kapitola 1.4). Uzemnění přes nízkohmový odpor se ale neukázalo jako vhodné.

Provoz oddělené sítě jako kompenzované je možný. Zemní spojení je detekováno v celém zkoumaném rozsahu ($0-5\text{k}\Omega$) a postižený vývod je identifikován do hodnoty přechodového odporu $R_P=4100\Omega$. (Kompenzační tlumivka ale musí být vybavena sekundárním odporníkem.) Poruchový proud je v případě jednofázového zemního spojení

zanedbatelný, ale přepětí neklesá pod 21kV. Toto řešení nepřináší oproti izolovanému provozu žádné výrazné výhody a je navíc zbytečně nákladné.

Jako výhodné řešení se ukázalo uzemnění sítě přes vysokohmový odpor (300Ω). Identifikace postiženého vývodu je v tomto případě zajištěna do $R_p=4000\Omega$. Provoz s jednofázovým zemním spojením je možný a přepětí v síti je výrazně tlumeno. Již při hodnotě přechodového odporu $R_p=500\Omega$ je přepětí utlumeno pod 16kV (Obr.3.24). Výhodu tohoto provozu si ukážeme na příkladu:

Příklad:

V síti podle schématu Obr.3.7 nastane zemní spojení na vývodu 3. Síť je kompenzovaná. Přechodový odpor zemního spojení má hodnotu $R_p=1000\Omega$. Hodnota poruchového proudu je $I_C=5,9A$ a přepětí na fázovém vodiči c je $U_C=17,8kV$ (na fázových vodičích je v bezporuchovém stavu napětí $U_f=12,7kV$).

Budeme-li chtít odstranit zemní spojení z přípojnice R22-1, odepneme vypínač V1. Zemní spojení tak trvá na přípojnici R22-2, která je v izolovaném stavu. Hodnota poruchového proudu je nyní $I_C=7,3A$, ale napětí $U_C=22,4kV$.

Pokud bude oddělená síť uzemněna přes vysokohmový odpor (300Ω), dostáváme se na hodnoty: $I_C=9,8A$; $U_C=14,7kV$

Takové omezení přepětí je jistě výhodné, jelikož poruchový proud je stále v přijatelných mezích.

3.8 Výpočtový program

Pro analýzu napětěvých a proudových poměrů v síti jsem vytvořil výpočtový program v softwaru MS Excel. Tento soubor je přiložen na CD pod názvem DP_vypocty_Srbeny.xls. Ukázka výpočtového prostředí je vytištěna v příloze.

Program má barevně vyznačené vstupy. Ostatní pole jsou výpočtová (nic se nezadáva). Základním vstupem je jmenovitá hodnota napětí sítě U_N . Dále je nutné nakonfigurovat vedení a procentuálně vyjádřit činnou složku kapacitního proudu (svod). Program dopočítá jeho kapacitní proud a svodový proud. Dalším vstupem je přechodový odpor poruchy R_p .

Program počítá napětěvé a proudové poměry v síti s izolovaným uzlem. Je možné připojit uzlový odporník nebo kompenzační tlumivku (eventuelně obojí). Hodnota odporu

uzlového odporníku se zadává buď přímo, nebo je dopočítána ze zadaného jmenovitého proudu odporníku. Kompenzační tlumivce se zadávají procentně činné ztráty a také míra rozladění v procentech (pro podladění záporné hodnoty). Dále je možné k tlumivce připojit sekundární odporník. Zadávaná hodnota sekundárního odporu je pak přepočítána na primární stranu vinutí tlumivky.

Jako hlavní výstupy programu jsou: poruchový proud I_{por} , napětí uzlu proti zemi U_0 a napětí fázových vodičů U_a, U_b, U_c . Hodnoty jsou vyjádřeny v absolutní hodnotě i ve složkovém tvaru. Dále jsou tyto hodnoty dopočítávány jako funkce přechodového odporu R_p . Výsledky jsou zpracovány tabulkově a graficky. Na dalších výstupech je vidět například kapacita vedení C , indukčnost kompenzační tlumivky L , nebo proud tlumivkou či uzlovým odporníkem (I_{tlum} , I_{R0}).

První dvě záložky jsou provázány tak, aby bylo možné jednoduše analyzovat napěťové a proudové poměry při oddělení malé části sítě. Možnost nastavení provozu uzlu však zůstává. (viz. příklad v kapitole 3.7)

Závěr

Diplomovou práci jsem zpracoval ve třech kapitolách. V první kapitole jsem se zabýval provozem sítí na jednotlivých napěťových hladinách a popsal jsem možné poruchové stavy. Dále jsem nastínil problematiku zemních ochran a metody detekce zemního spojení.

V druhé kapitole jsem podrobně rozebral možnosti provozu uzlu sítě. Tedy síť účinně uzemněnou, izolovanou a neúčinně uzemněnou (přes nízkoohmový odpor nebo kompenzační tlumivku). Nastínil jsem výhody a nevýhody jednotlivých provozů a možnosti provozu jednotlivých sítí dle ČSN.

Třetí kapitola navazuje na předchozí praktickým výpočtem. Na modelové kabelové síti VN (s kapacitním proudem $I_c=342A$) jsem provedl analýzu napěťových a proudových poměrů při jednofázové zemní poruše. Analyzoval jsem síť v izolovaném stavu, neúčinně uzemněnou přes vysokoohmový odpor a jako kompenzovanou. Jako nejvýhodnější řešení způsobu provozu uzlu této modelové sítě se ukázal provoz s kompenzační tlumivkou (zdůvodnění takového řešení je v kapitole 3.7).

Dalším bodem zadání bylo oddělení malé části sítě s vlastním zdrojem a přechodem na izolovaný uzel. Analýza napěťových a proudových poměrů ukázala, že takový provoz je možný. Výhodnějším řešením je ale uzemnit tuto oddělenou síť přes vysokoohmový odpor 300Ω (viz. kapitola 3.6.3 a příklad v kapitole 3.7)

Pro všechny řešené případy provozu rozsáhlé kabelové sítě i malé oddělené sítě jsem zvlášť provedl návrh nastavení ochran.

Pro analýzu napěťových a proudových poměrů jsem vytvořil výpočtový program v softwaru MS Excel. Jeho popisu je věnována kapitola 3.8. Ukázka výpočtového prostředí je v příloze a celý program je pak na přiloženém CD.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MERTLOVÁ, Jiřina a NOHAČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 168 s. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [2] ŠTROBLOVÁ, Milada a HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. *Elektrické sítě městské a průmyslové*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. 149 s. ISBN 80-7082-154-X.
- [3] www.ege.cz [online]. 2013 [cit. 25.3.2013]. *Zemní spojení v kompenzovaných sítích*. Dostupné z: <http://www.ege.cz/index.php?docid=49&lang=CZ>.
- [4] www.ocrev.it [online]. 2013 [cit. 25.3.2013]. *Earthing-transformers*. Dostupné z: <http://www.ocrev.it/transformers.html>.
- [5] JANÍČEK, František, CHLADNÝ, Vladimír, ELECHOVÁ, Žaneta, BELÁŇ, Anton. *Digitalne ochrany v elektrizačnej sustavě*. Bratislava: STU, 2004. 187 s. ISBN 80-227-2135-2.
- [6] PERCINA, Drahomír. *Nekontaktní indikátory poruchových stavu na VN vedení*. Brno, 2011. Zkrácená verze disertační práce. [online]. 2013 [cit. 10.4.2013]. Dostupné z: http://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5917/Thesis_Pernica_C.pdf?sequence=1
- [7] Zemní spojení v trojfázových soustavách. [online]. 2013 [cit. 16.2.2013]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [8] POSPIŠIL, Jaroslav. *Inovace systému chránění rozvodů vn při vzniku zemních poruch*. Elektro: odborný časopis pro Elektrotechniku [online]. 2013 [cit. 10.4.2013]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25492
- [9] www.kabloelektro.cz [online]. 2013 [cit. 16.2.2013]. *Katalog*. Dostupné z: <http://kabloelektro.cz/category/elektroinstalace>.
- [10] ČSN 33 3070. *Elektrotechnické předpisy. Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. Praha: Český normalizační institut, 1981. 20 s.
- [11] MERTLOVÁ, Jiřina, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla, TAJTL, Tomáš. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 190 s. ISBN 80-7043-307-8.
- [12] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 154 s. ISBN 80-7082-703-3.

Přílohy

Příloha A – Výpočtový program (MS Excel)

U_N (kV)	22
U_f (V)	12701,7059221718

R_p (Ω)	100
U_p (V)	986,331958525736+571,844087589436i
	1140,112447

Z_0 (Ω)	863,806351768482-558,784452917602i
Z (Ω)	963,806351768482-558,784452917602i

I_{por} (A)	9,86331958525736+5,71844087589436i
	11,40112447

U_0 (V)	-11715,3739636461+571,844087589433i
	11729,32192

Napětí na fázových vodičích		
U_a (V)	986,3319585257+571,844087589433i	1140,112447
U_b (V)	-18066,226924732-10428,1559124106i	20859,88953
U_c (V)	-18066,226924732+11571,8440875894i	21454,51307

Vedení (vývody)			
Výv.	I_d (A/km)	l (km)	I_c (A)
1	3,6	1	3,6
2	3,6	1,5	5,4
3	3,6	30	108
4	3,6	25	90
5	3,6	17,5	63
6	3,6	20	72
			I_c (A)
			342

Vedení	
I_{vc} (%)	2
I_c (A)	342i
I_{vc} (A)	6,979591837
C (F)	2,85689E-05
X_C (Ω)	-37,1394910005023i
R_{svod} (Ω)	1819,83505902461
Z_{ved} (Ω)	0,757633246887849-37,1240290975046i
I_{ved} (A)	21,8347998399513+315,128273459267i

Odporník	
zapojen? (1/0)	0
I_N (A)	450
R_0 (Ω)	0
I_{R0} (A)	0
	0

Zhášecí tlumivka	
zapojena? (1/0)	1
chyba X_L (%)	-2
I_{vL} (%)	1
I_L (A)	$-309,409832583373i$
I_{vL} (A)	$-11,97148025$
L (H)	$0,120583045$
X_L (Ω)	$37,8822808205123i$
R_{tlum} (Ω)	$3750,34580123072$
$R_{sr}'(\Omega)$	0
Z_{tlum} (Ω)	$0,382610263337148+37,8784160703776i$
I_{tlum} (A)	$-11,9714802546939-309,409832583373i$

Sekundární odporník	
zapojen? (1/0)	0
U_{max} (kV)	23
U_{fmax} (V)	$13279,05619$
R_{sr} (Ω)	1
$R_{sr}'(\Omega)$	0