

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Způsoby provozování uzlů elektrických sítí

vedoucí práce: Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

2012

autor: bc. David Jílek

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David JÍLEK**
Osobní číslo: **E10N0024P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Způsoby provozování uzlů elektrických sítí**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

Diplomová práce "Způsoby provozování uzlů elektrických sítí" bude zaměřena na tyto body:

1. Uveďte obecné způsoby provozování uzlu sítí v České republice.
2. Zaměřte se na sítě vn a na nich proveďte výpočty zemních poruch v sítích s kompenzací, v sítích izolovaných a v sítích odporově uzemněných.
3. Na základě získaných informací a znalostí porovnejte vlastnosti těchto sítí vn.



V Plzni dne 17. října 2011

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

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. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni dne

.....

P o d ě k o v á n í

Rád bych poděkoval vedoucí své diplomové práce ing. Lucie Noháčové Ph.D. za její čas a ochotu při konzultacích nad vznikajícím textem této práce. Poděkovat bych chtěl také svému konzultantovi Ing. Františku Žákovi za cenné informace, poskytnuté pro zpracování diplomové práce.

David Jílek

Anotace:

V této práci jsem rozebral, popsal a zhodnotil aktuálně používané druhy provozování uzlů distribuční soustavy elektrické energie v ČR. Podrobněji jsem se přitom zaměřil na hladinu vysokého napětí a zde realizoval výpočty zemních poruch. Na základě výpočtů a získaných informací jsem provedl porovnání typů sítí z hlediska výhodnosti, velikosti poruch a spolehlivosti.

Klíčová slova:

Síť s přímo uzemněným bodem, síť s izolovaným bodem, síť s nepřímo uzemněným bodem, Petersenova tlumivka, uzemňovací odporník, zemní spojení, jednofázový zkrat, kompenzace, poruchový proud, elektrizační soustava, přenosová soustava, distribuční soustava, pracovní uzel, transformátor, vinutí.

Ways of earthing zero point operation of electrical networks

Abstract:

In this thesis, I analyzed, described and evaluated the currently used types of the transmission networks in the Czech Republic. Moreover, I focused on the high voltage level in more detail and here I performed the calculations of the single-phased earth faults. Thanks to the calculations and obtained information I made a comparison of the types of the transmission systems based on their advantage, size of the faults and reliability.

Key words:

Network with directly earthed point, network with isolated point, network with indirectly earthed point, Petersen-suppressor, earthing resistor, earth fault, one-phase-short-circuit, compensation, fault current, electricity system, transmission system, distribution system, operational node, transformer, winding.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	10
1 Úvod	12
2 Elektrizací soustava a způsoby provozování uzlu v České republice	13
2.1 Prvky vyskytující se v elektrizační soustavě.....	14
2.2 Základní popis a funkce přenosové soustavy	15
2.2.1 Přenosová soustava v České republice.....	15
2.3 Distribuční soustava	16
2.3.1 Regulování odběru a princip HDO	17
2.4 Propojení uzlů elektrizačních soustav se zemí	19
2.4.1 Účinně uzemněná soustava.....	21
2.4.2 Izolovaná soustava	22
2.4.3 Neúčinně uzemněná soustava.....	23
2.4.3.1 Prvky používané pro nepřímé spojení uzlu se zemí	23
3 Charakteristiky napětí	26
3.1 Kvalita napětí.....	26
3.2 Přepětí v síti.....	26
3.3 Nesymetrie napětí	27
3.4 Krátkodobá přerušení a poklesy napětí	27
4 Zemní poruchy v sítích VN	28
4.1 Zemní spojení	28
4.2 Metody řešení zemního spojení.....	29
4.2.1 Metoda Souměrných složek (metoda Fortescue)	29
4.3 Výpočty zemních poruch v soustavách VN.....	32
4.3.1 Soustavy izolované od země	32
4.3.1.1 Izolovaná síť před poruchou	32
4.3.1.2 Izolovaná síť při kovovém zemním spojení	34
4.3.1.3 Odporové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem.....	35
4.3.2 Soustava s nepřímo uzemněným uzlem.....	37
4.3.2.1 Kompenzace Petersenovou tlumivkou.....	37
4.3.2.2 Soustava nepřímo uzemněná pomocí odporu	39
4.3.2.3 Kompenzace s tlumivkou s dodatečným připínáním odporníku	41
5 Modelové výpočty sítí	42
5.1 Izolovaná síť.....	42

5.1.1	Parametry sítě	42
5.1.2	Výpočty.....	43
5.1.3	Grafické výstupy	46
5.2	Síť uzemněná pomocí odporníku	47
5.2.1	Parametry sítě	47
5.2.2	Výpočty.....	48
5.2.3	Grafické výstupy	50
5.3	Kompenzovaná síť	52
5.3.1	Parametry sítě	52
5.3.2	Výpočty.....	53
5.3.3	Grafické výstupy	56
6	Závěr.....	58
	Použitá literatura.....	60

Seznam symbolů a zkratek

vvn	velmi vysoké napětí	
vn	vysoké napětí	
nn	nízké napětí	
ω	úhlová rychlost	(rad.s ⁻¹)
f	frekvence	(Hz)
φ	fázový posun mezi U a I	(°)
\bar{F}	Fortescue matice	
a	operátor natočení ve složkové soustavě	
C	celková kapacita sítě proti zemi	(μ F)
X_c	kapacitní reaktance	(Ω)
L	indukčnost tlumivky	(mH)
X_l	indukční reaktance	(Ω)
Z_{cg}	kapacitní a svodová impedance	(Ω)
R_G	činný svodový odpor	(Ω)
Z_t	impedance transformátoru	(Ω)
P_k	ztráty nakrátko	(W)
Z_v	impedance vedení	(Ω)
Z	celková impedance	(Ω)
I_p	poruchový složkový proud	(A)
U_0	uzlové napětí	(V)
$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_0$	složkové proudy sousledná, zpětná a nulová	(A)

$\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$	proudy fází a,b,c	(A)
I_c	proud procházející kapacitou sítě proti zemi	(A)
I_{por}	poruchový proud	(A)
I_R	proud procházející uzlovým odporníkem	(A)
$\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$	napětí fází a,b,c proti zemi	(V)
\bar{U}_f	fázové napětí	(V)
$\bar{U}_{fa}, \bar{U}_{fb}, \bar{U}_{fc}$	fázory fázového napětí fází a,b,c	(V)
S	zdánlivý výkon tlumivky	(VA)
S_t	zdánlivý výkon transformátoru	(VA)
u_k	napětí nakrátko	(%)
$\cos \varphi$	účinnost	
p	převod transformátoru	
HDO	hromadné dálkové ovládání	

1 Úvod

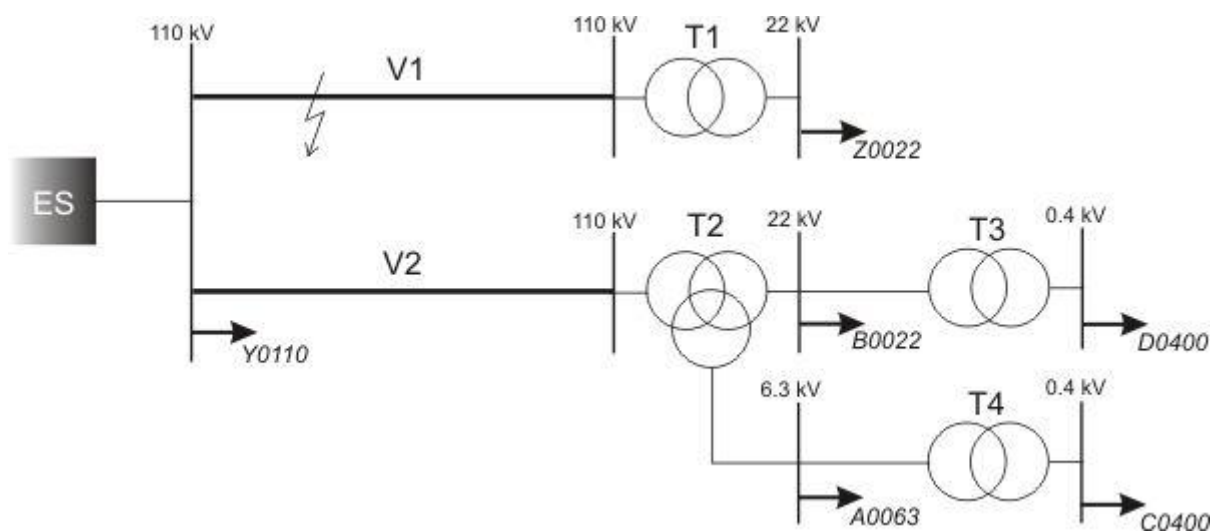
V dnešní době je provoz uzlů v distribuční síti konstruován tak, aby se při výrobě elektrické energie v elektrárně nebo jiném zařízení generující tuto energii, dostal elektrický proud k uživateli s co nejmenšími ztrátami a náklady na přenos. Elektrárny totiž pracují s výkonem v řádech megawattů a generují desítky tisíc ampér. Proto se napětí podle potřeby zvyšuje až na úroveň velmi vysokého napětí 400 kV, díky čemuž se hodnota proudu sníží a stejně tak i tepelné ztráty tímto proudem vyvolané. Velmi vysoké napětí se však používá zejména v části vedoucí od elektráren do velkých rozvodů. V části zvané distribuční soustava, vedoucí právě z těchto rozvodů, se napětí transformuje na hodnotu vysokého napětí. V České republice se pracuje s hodnotami vysokého napětí 35 a 22 kV a na rozdíl od velmi vysokého či nízkého napětí se zde uzel uzemňuje nepřímo či se úplně od země izoluje. V této části dochází kvůli nepříznivým vlivům k poruchám, třífázovým i dvoufázovým zkratům, ale hlavně se zde vyskytují jednofázová zemní spojení. Poměr poruch je závislý na tom, zda se jedná o venkovní vedení či izolované podzemní kabely.

Na základě tohoto faktu je důležité vědět jaký způsob provozování uzlu na úrovni vysokého napětí je nejlepší a které si dokáže se zemními spojeními poradit. Každý provozovatel distribuční sítě se snaží zmenšit počet i velikost poruch a tím zvýšit spolehlivost a kvalitu přenosu. Je tedy třeba volit vhodný typ provozování uzlu a vedení. Navíc je nutné síť podrobně analyzovat a tak určit její spolehlivost.

Tato práce se v první části zabývá popisem způsobů uzemnění uzlů, které se v České republice používají. Další část se potom zaměřuje na výpočty zemních poruch na úrovni vysokého napětí jak u venkovního tak kabelového vedení. Zemní poruchy jsou zvláštním druhem nesouměrného zkratu, při analýze tedy mohou být použity jen některé způsoby výpočtů. Jedním ze způsobů analýzy jednofázové poruchy je metoda Fortescue, která rozkládá nesouměrnou složku na tři souměrné. Na základě mé analýzy vyvodím závěry obsahující, jaký způsob uzemnění a vedení je neoptimálnější pro provoz i při vzniku poruchy a kde co nejrychleji můžeme poruchu odstranit.

2 Elektrizací soustava a způsoby provozování uzlu v České republice

Vyrobenou elektrickou energii je před užitím potřeba přenést od generátoru ke spotřebiči. To je základní funkce, kterou plní systém nazývaný se elektrická přenosová soustava. Tvoří páteřní síť v České republice a propojuje výrobce energie se spotřebiteli. Přenos elektrické energie však není jedinou funkcí, kterou přenosová soustava plní. Během přenosu mění parametry různých veličin a tak zajišťuje co největší efektivitu pro snížení ztrát, snaží se o udržení tvaru a frekvence sinusového průběhu a nízké úbytky napětí. Navíc se stará o bezpečnost při přenosu, omezování či případnou lokalizaci poruch a jistotu dodávky. [12]



Obrázek 2-1: Příklad přenosové soustavy [17]

Přenosová soustava musí splňovat tyto podmínky:

- Bezpečnost – nesmí ohrožovat lidské životy a majetek.
- Spolehlivost – záruka přenosu výkonu na danou vzdálenost při stálosti parametrů jako je frekvence a tvar napětí.
- Hospodárnost – investiční náklady a náklady na provoz a údržbu by neměly být zbytečně vysoké, stejně tak i výkonové ztráty při přenosu.

2.1 Prvky vyskytující se v elektrizační soustavě

Alternátor

Přeměňuje kinetickou energii na elektrickou. Kinetickou energii získáváme z tepelné a tu zase z chemické energie. V podstatě se tedy nejedná o výrobu ale jen řetězec přeměn různých energií, na jehož konci je právě alternátor. Princip je následující: Ve vodiči je indukováno napětí, pokud se vodič a magnetické pole vůči sobě pohybují.

Transformátor

Využívá změny poměru elektrického napětí a proudu, zatímco velikost výkonu zůstává zachována. Využívá přitom elektromagnetické indukce mezi primárním a sekundárním vinutím. Velikost převodu závisí na poměru závitů mezi těmito vinutími. Transformátory se dělí podle počtu fází (jednofázové, trojfázové, speciálně přepínatelné), podle počtu vinutí (dvoj-troj-více vinut'ové), použití (energetické, bezpečnostní, měřicí) atd.

Vedení

Je tvořeno vodiči, obsahujícími volné částice s elektrickým nábojem. Zodpovídá za přesun toku elektronů od výroby ke spotřebě. Nedílnou součástí každého vodiče je elektrický odpor, který naopak toku elektronů brání. Vedení má velký vliv na přenos, proto se věnuje velká pozornost volbě typu, průřezu a izolaci vodičů. Rozlišujeme venkovní či kabelové vedení.

Kompenzační zařízení

Kvůli energetické efektivitě je výhodné udržovat nízký fázový posuv mezi napětím a proudem. To platí za předpokladu, že se účinník rovná jedné. V praxi se toho dosahuje pomocí kompenzačních kapacitorů, které svým jalovým výkonem působí proti jalovému výkonu induktivního charakteru, vznikajícímu v transformátorech a dalších zařízeních indukčního charakteru. Z ekonomických důvodů se účinník udržuje na hodnotě kolem 0,95.

Zabezpečovací a měřicí zařízení

Pro zajištění bezpečnosti se veličiny v soustavě neustále sledují a měří. Mezi měřicí zařízení patří například měřicí transformátory napětí a proudu, měřicí relé atd. Jistící prvky jsou pojistky, jističe, chrániče, vypínače atd. [3,4]

2.2 Základní popis a funkce přenosové soustavy

Elektrickou energii tvoří řada navzájem na sobě závislých veličin. Tohoto faktu se při jejím přenosu hojně využívá. Při výrobě v elektrárnách má výkon hodnotu desítek či stovek MW, z alternátoru pak tečou až desítky tisíc ampérů. Alternátory přitom pracují s napětím pouze několik tisíc voltů. Přenos takovéto energie není optimální, vodiče by musely mít značný průřez v řádech metrů, musely by odolávat velkým magnetickým silám a ztráty by byly neúměrně vysoké. Proto se na různých místech přenosové soustavy používají transformátory. Některé velikost napětí zvyšují a jiné snižují. Za alternátorem v elektrárně se používá transformátor, který napětí zvýší až na hodnotu 400 kV. Vzhledem k tomu, že transformátory výkon zachovávají, musí se při zvýšení napětí elektrický proud snížit. Přenášet takto transformovanou energii je jak praktické tak ekonomicky výhodné. Na výstupu přenosové soustavy jsou zařazeny snižující transformátory. V tomto bodě končí přenosová a začíná distribuční soustava, která rozvádí energii ke spotřebitelům. [1, 12]

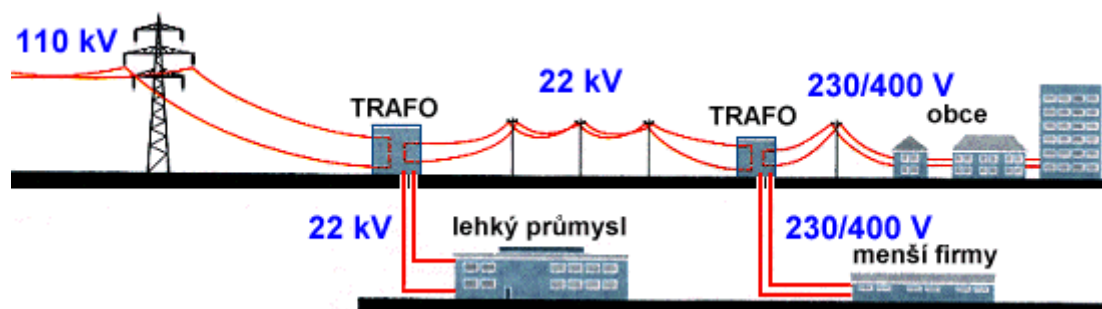
2.2.1 Přenosová soustava v České republice

V sedmdesátých letech existovaly dvě organizace starající se o propojení států Evropy. UCTPE provozovala elektrifikaci západní Evropy a IPS/UPS propojovala východní Evropu a Sovětský svaz. Tehdejší Československá republika byla napojena na systém IPS/UPS. Na začátku devadesátých let se IPS/UPS rozdělila na dvě části: IPS Baltic a CENTREL. CENTREL, který tehdy propojoval státy střední východní Evropy včetně České republiky, se na přelomu tisíciletí spojil s UCTE.

V současnosti v České republice řídí provoz přenosové soustavy společnost ČEPS,a.s. a je propojená s Evropskou sítí provozovatelů přenosových soustav elektřiny (ENTSO-E). Sít' je rozdělena do několika částí. První část je tvořena okružní sítí a pracuje s hodnotami velmi vysokého napětí 400, 220 a vybraná vedení se 110kV. Největší částí je distribuční soustava kde se pracuje s hodnotami vysokého napětí 35, 22, 10, 6 a 3 kV a je provozována paprskově kvůli možnosti zálohování dodávky v případě poruchy. Rozvádí energii až k lokálním transformátorům snižujícím napětí na 400 (230) V. Provozovatel přenosové soustavy ČR udržuje a obnovuje 39 rozveden s 68 transformátory, které převádějí elektrickou energii z přenosové do distribuční soustavy. Dále zodpovídá za stav vedení o délce 3 479 km s napětíovou hladinou 400 kV a 1 910 km s napětíovou hladinou 220 kV. [2, 3]

2.3 Distribuční soustava

Na výstupu přenosové soustavy za snižujícími transformátory začíná distribuční soustava. Jedná se o komplex vzájemně propojených vedení, sloužících k rozvodu elektrické energie na území České republiky k jednotlivým koncovým uživatelům. Zároveň také připojuje elektrárny o malých výkonech v řádech desítek MW. Pro plnění požadavků, nutných pro provoz, obsahuje řadu systémů. Mezi takové patří například měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací a informační systémy.



Obrázek 2.3-1: Příklad distribuční soustavy [18]

V České republice o provoz distribuční sítě se stará několik společností. ČEZ Distribuce, a. s. zprostředkovává rozvod pro celou Českou republiku kromě Jihočeského a Jihomoravského kraje, o které se stará společnost E. ON Distribuce, a. s. Hlavní město Praha má vlastní společnost, provozující distribuci, PREDistribuce, a. s. Hodnoty napětí distribuční soustavy zahrnují široké spektrum od velmi vysokého až po nízké napětí. Vedení VVN vyvedené ze snižujících transformátorů 220/110 kV je základním prvkem distribuční soustavy. Síť je provozována jako paprsková, případně ve formě průběžných rozvodů. To zajišťuje velkou spolehlivost a nízkou četnost poruch, které díky ochranným systémům nepřerušují dodávku energie. Jedná se o venkovní vedení, takže systém ochrany je řešen jako distanční. Vedení na hladině VN je ve velké míře propojena paprskovým nebo dvou-paprskovým způsobem. Nejčastější hodnoty jsou 35 a 22 kV. 10, 6 a 3 kV jsou využívány spíše průmyslově. Venkovní vedení disponuje ochranou polohou a kabelové vedení ochranou izolací. Síť NN se propojuje paprskovým a průběžným, husté sítě potom mřížovým rozvodem. Nadzemní i kabelové vedení je provozováno na sdruženém napětí 400 V (fázové 230 V), které je využíváno spotřebitelem. [13, 14, 15, 16]

Distribuční společnost	Délka vedení vvn (km)	Délka vedení vn (km)	Délka vedení nn (km)	Celkem
ČEZ Distribuce, a. s.	9 799	49 697	97 985	147 682
E.ON Distribuce, a. s.	3 875,3	21 745	38 837	64 457,3
PREdistribuce, a. s.	202,2	3829	7750	11 781,2

Tabulka 2.3-1: Instalovaná délka vedení k 1.1. 2011

O základních vlastnostech a možnostech provozování sítě rozhoduje způsob, jakým se uzemňuje transformátor vvn/vn v distribuční síti. Uzemnění v tomto případě znamená spojení nulového bodu sekundární strany napájecího transformátoru se zemnicí soustavou. Systém uzemnění má mimo jiné rozhodující vliv na poruchový proud, na dimenzování ochran a vodičů v síti a na určení míry rizika úrazu či mechanického poškození způsobeného poruchovým proudem.

Distribuční soustava vn hustě protíná většinu území České republiky, je tedy vystavena mnoha nepříznivým vlivům. U venkovního vedení způsobují atmosférické vlivy často krátkodobá zemní spojení, která odezní bez toho, aby došlo k přerušení dodávky. Častější poruchy v rozlehlé distribuční síti jsou jedním z hlavních důvodů, proč se uzemnění provozuje nepřímo. [2]

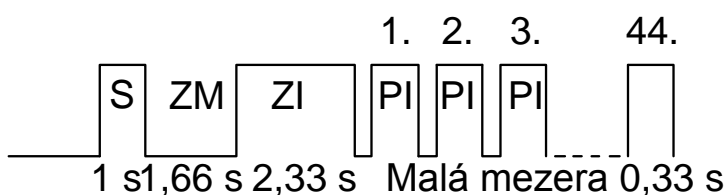
2.3.1 Regulování odběru a princip HDO

Během dne se odběr elektrické energie mění v závislosti na potřebách uživatelů. Odběrová křivka se tak v závislosti na čase neustále mění a dosahuje svých minim a maxim. Stanice distribučních soustav mohou spotřebu zčásti ovládat, regulovat odběr energie a tak se vyhnout nepříjemným špičkám. Toho lze dosáhnout pomocí tzv. hromadného dálkového ovládnání, pro které se používá zkratka HDO.

Aby mohly stanice dálkově ovládat odběr domácností, využívají silové vedení, po kterém vysílají signál ve tvaru impulzního kódu. Silový signál o frekvenci 50 Hz funguje také jako nosič pro HDO signál o frekvenci několika set Hz, který je na něj superponován. Po vyslání signálu se zapínají nebo vypínají spotřebiče, připojené přes stykač k přijímači HDO, umístěný v elektroměrovém rozvaděči. Pro ovládnání se používá celá škála frekvencí, které se nastavují tak, aby mohli ovlivňovat pouze spotřebiče, které jsou předem nastavené. Nastavování frekvencí, druhů ovládaných spotřebičů a časů vypínání a zapínání souvisí s tarifní politikou, na kterou podle smlouvy mohou spotřebitelé přistoupit. Výhody přitom

plynou jak pro energetickou soustavu, která pomocí HDO zjemňuje výkyvy spotřeby, tak pro spotřebitele, kteří získají výhodnější tarif. Kromě toho se zvyšuje propustnost distribuční soustavy.

Domácnosti využívají HDO hlavně k ovládní vysoko-odběrových spotřebičů, jako jsou bojlerů nebo akumulací kamna. Kromě ovládní odběru domácností se HDO využívá k provozu veřejného osvětlení, světelných billboardů a reklam, dopravních značek a ostatních veřejných spotřebitelských míst.



S - startovací impuls
 ZM - zabezpečovací mezera
 ZI - zabezpečovací impuls
 PI - povelový impuls

Obrázek 2.3.1-1: Složení signálu HDO [4]

Pro ovládní frekvenci $216 \frac{2}{3}$ Hz se používá tzv. sériový impulsní povelový kód, který je odolnější proti rušení. Má následující skladbu.

- Startovací impuls S (2,33 s)
- 44 kroků tvořených impulsem 1s a mezerou 0,33 s.
- Celý impuls trvá necelých 64 s.
- Adresování pro různé skupiny přijímačů – jednotlivé impulsy mají v časové řadě speciální funkci.

[4]

2.4 Propojení uzlů elektrizačních soustav se zemí

Propojení fázových vodičů na provozním transformátoru trojfázové soustavy se nazývá provozní (nulový) uzel. Propojení může být uskutečňováno na alternátoru, transformátoru nebo spotřebiči. Základní dělení uzlů soustavy je založeno na způsobu jejich spojení se zemním bodem. Každý způsob uzemnění s sebou nese jisté výhody i rizika. Volí se tak, aby bylo co nejvýhodnější.

V současnosti se používají následující typy uzemnění nulového bodu:

- Soustavy s účinně uzemněným pracovním uzlem.
- Soustavy s pracovním uzlem izolovaným od země.
- Soustavy s nepřímo uzemněným pracovním uzlem.
 - Soustavy uzemněné přes kompenzační cívku (Petersenova zhášecí tlumivka).
 - Klasická zhášecí tlumivka s případným připínáním odporníku pro zvýšení činné složky proudu na sekundární straně transformátoru.
 - Zhášecí tlumivka se speciální automatikou pro přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně
 - Modifikace s názvem Swedish Neutral
 - Soustavy uzemněné přes rezistanci
 - Soustavy uzemněné přes Bauchův transformátor

Každý typ uzemnění uzlu má specifické vlastnosti a používá se pro různé oblasti distribuční soustavy. Vinutí transformátorů velmi vysokého a nízkého napětí se uzemňují přímo. Oproti tomu v distribuční soustavě, kde je převážná část venkovního vedení, se uzel uzemňuje přes tlumivku s dodatečným připínáním odporníku na sekundárním vinutí zhášecí tlumivky. V elektrárenských a průmyslových rozvodech se používají dva typy uzemnění. Kabelová vedení, která se nacházejí například v rozvodnách odsíření elektrárenských provozů, se uzemní přes rezistanci. Blokované průmyslové objekty s vlastní výrobou elektrické energie využívají uzly izolované. Donedávna izolované sítě využívaly také důlní rozvody, s měnící se legislativou se začalo přecházet k sítím kompenzovaným. [3, 5, 9]

Důležité faktory, které ovlivňují výběr typu uzemnění sítě:

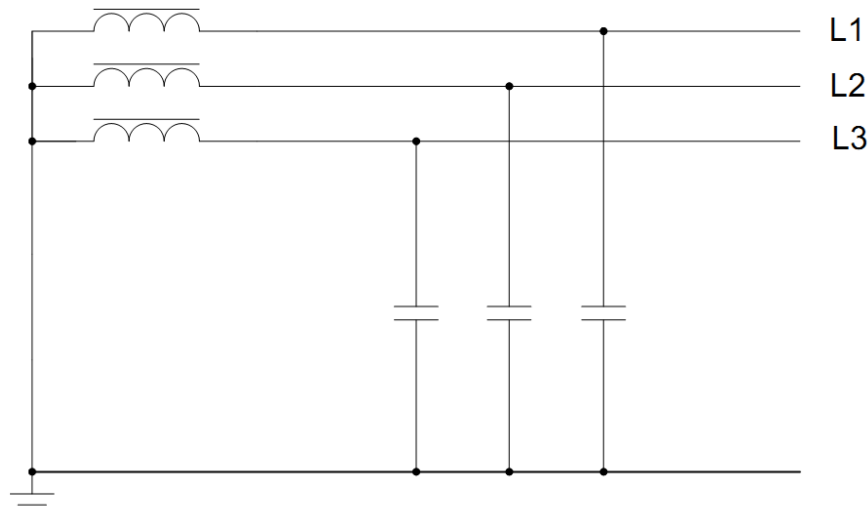
- Celkový kapacitní proud v síti (velikost celkové kapacity proti zemi).
- Poruchová napětí v ustáleném stavu (stacionární rezonanční přepětí).
- Velikost poruchového proudu při zemním spojení
- Přepětí při vzniku zemního spojení.
- Velikost dotykových a krokových napětí
- Ferorezonanční přepětí, přenesená napětí.
- Použití přepět'ových ochran.
- Způsob odstranění poruchy.
- Vliv na pomocné obvody v síti.
- Investiční a provozní náklady.
- Riziko přerušení dodávky při poruše.

V bezporuchovém stavu mají všechny symetrické sítě podobné proudové a napět'ové poměry. Lišit se mezi sebou začnou až v případě poruchy, zejména při jednofázových zemních poruchách, kvůli kterým mohou sítě přejít ze symetrického stavu na nesymetrický. V takovém případě má vliv na změnu parametrů typ uzemnění sítě. V následujících podkapitolách typy uzemnění přímo specifikuji a popíšu pomocí napět'ových a proudových poměrů. [2]

2.4.1 Účinně uzemněná soustava

Uzly transformátorů jsou propojeny se zemí přímo. V přímo uzemněné soustavě mají jednofázové poruchy jiný charakter než v izolovaných a nepřímo uzemněných soustavách a projevují se jako zemní zkraty. Kapacity zdravých fází proti zemi nemají na poruchový proud vliv. Při spojení fáze se zemí musí v sítích nn dojít k odpojení ochranou před nebezpečným dotykovým napětím. Velikost jednopólového zkratového proudu bývá totiž na hladině zvn a vvn až desítky kA. Velikost napětí zdravých fází vůči zemi má fázovou hodnotu. Přímé spojení uzlu se zemí se v České republice používá v sítích zvláště a velmi vysokého napětí (400, 220, 110 kV) a v sítích nízkého napětí (400 V).

V síti uzemněné tímto způsobem můžeme snadno zjistit vznik poruchy. V postižené fázi se snižuje napětí a vzrůstá proud. Proto kladou tyto typy sítí menší nároky na dimenzování izolace, a sice jen na hodnotu fázového napětí. To jsou nesporné výhody účinně uzemněných sítí. Na druhou stranu je velikost proudu při poruše velká, způsobuje nebezpečná dotyková a kroková napětí a síť se za těchto podmínek nesmí dále provozovat. Zvyšují se tak nároky na ochrany. [1,5]

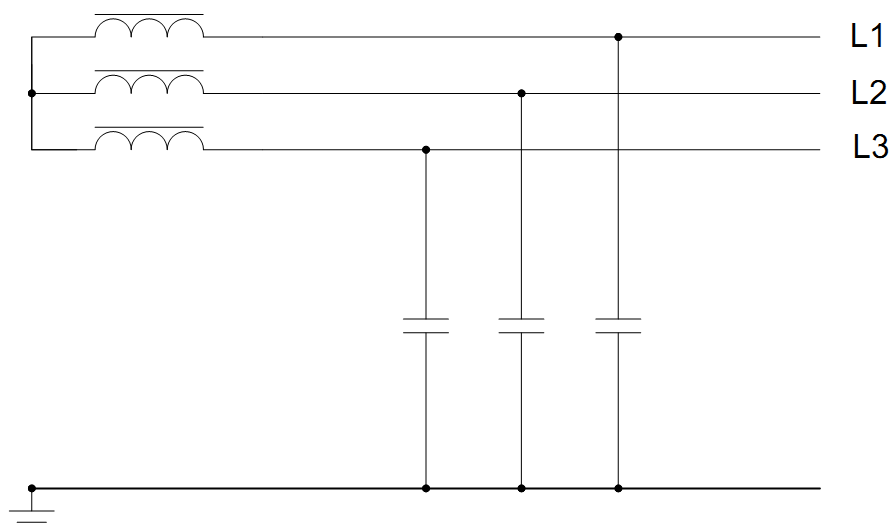


Obrázek 2.4.1-1: Účinně uzemněná síť

2.4.2 Izolovaná soustava

Uzel je se zemí spojen jen teoreticky, přes nekonečně velkou impedanci. Toto uzemnění se používá v sítích vysokého napětí. Izolované sítě bývají malých rozsahů na hladinách 6 a 3 kV, kde se přenos energie realizuje pomocí izolovaného kabelového vedení. V malé míře se používá také venkovní vedení větších délek 35 kV. Díky větší spolehlivosti dodávky se používaly v dolech, hutích a průmyslových závodech s vlastní výrobou elektrické energie. Při spojení fáze se zemí je mezi uzlem a místem spojení kapacitní impedance, zemní proud má při zanedbání některých prvků jen kapacitní charakter. Napětí v uzlu v tomto stavu vzroste vůči zemi na fázovou hodnotu a napětí zdravých fází na hodnotu sdruženou. Krátkodobě lze takto síť provozovat, v případě spojení druhé fáze se zemí se již jedná o dvoufázový zkrat a provoz sítě musí být přerušen.

V současné době je izolovaná soustava používaná méně a nové instalace se místo toho uzemňují nepřímou. Důvodem jsou velká přepětí v sítích, vznikající při přerušovaném zemním spojení, kde se oblouk opakovaně zapaluje a zhasíná. Dále mohou vznikat nebezpečná dotyková a kroková napětí. Kvůli vysokým kapacitám proti zemi nastávají problémy s vypnutím poruchy. Podle normy ČSN 33 3070 lze provozovat síť s izolovaným uzlem, pokud kapacitní proud nepřekračuje hodnotu 10A. [1, 5, 7, 10]



Obrázek 2.4.2-1: Izolovaná síť

2.4.3 Neúčinně uzemněná soustava

Uzemnění je realizováno přes impedanci (tlumivku nebo odpor), toho se ve velké míře využívá v distribučních sítích vysokého napětí (22, 35 kV). Používá-li se spojení se zemí přes tlumivku, jedná se o kompenzaci sítě při jednofázovém spojení. Při použití odporu jde o omezení velikosti jednofázového zkratového proudu. Na rozdíl od izolovaných sítí, může být neúčinně uzemněná soustava větších rozměrů a její použití není tolik omezené velikostí kapacitního proudu. V praxi se venkovní sítě s kompenzací používají při hodnotách kapacitního proudu kolem 100A a u kabelového vedení s kompenzací dokonce až 450A. [10]

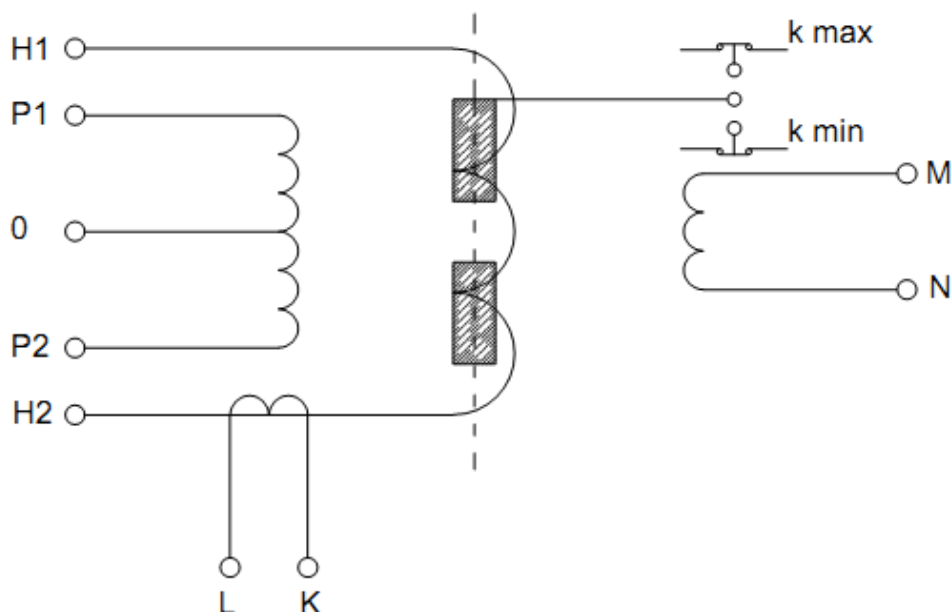
2.4.3.1 Prvky používané pro nepřímé spojení uzlu se zemí

Při zemním spojení lze poruchový proud různými způsoby kompenzovat nebo omezit. K tomuto účelu se mezi nulový bod a uzel připojují určitá zařízení. V sítích vysokého napětí je nutné kapacitní proudy kompenzovat aby místem náhodné poruchy protékal jen zbytkový proud potřebný k dosažení samočinného zhášení oblouku. [5, 6]

Petersenova (zhášecí) tlumivka

Při jednofázovém spojení teče mezi fází a zemí proud kapacitního charakteru. V Petersenově tlumivce se indukuje induktivní proud, který je opačně orientovaný než proud, uzavírající se přes parazitní kapacity. V ideálním případě jsou oba proudy stejně velké a navzájem se vyruší. Ve skutečnosti se kapacitní proud pouze zmenší na hodnotu dostatečně malou, aby se oblouk zemního spojení samovolně uhasil (venkovní vedení). Děje se tak vlivem deionizace dráhy zbytkového proudu, menšího než 5 A. Proto se Petersenově tlumivce přezdívá zhášecí. Jedná se tedy o vykompenzovaný obvod, díky čemuž lze nepřímo uzemněné sítě provozovat i při poruše. Omezení nastává jen dovoleným oteplením kompenzační tlumivky.

Tlumivka se připojuje mezi vyvedený uzel sekundárního vinutí transformátoru vvn/vn a zem. Zhášecí tlumivka se při návrhu dimenzuje s určitou rezervou výkonu. Většinou se volí tlumivky s o 30% větším výkonem, než jaký je předpokládáný potřebný kompenzační výkon v síti, přičemž výkon nesmí překročit třetinový jmenovitý výkon transformátoru s alespoň jedním vinutím zapojeným do trojúhelníka. Počítá se splněním provozních a bezpečnostních nároků i v případě rozšíření sítě v budoucnu. Zatížení kompenzačních tlumivek by při zemním spojení nemělo přesahovat dobu 2 hodiny. [4, 11]



Obrázek 2.4.3.1-1: Konstrukce zhášecí tlumivky

Z obrázku 2.4.3.1-1 je patrná konstrukce zhášecí tlumivky. H1 a H2 jsou vývody hlavního vinutí cívky, které se připojují mezi pracovní uzel a zem. Kromě toho kompenzační zařízení obsahuje pomocné měřicí transformátory. Měřicí transformátor napětí s vývody M a N a měřicí transformátor proudu s vyvedenými L a K. Pomocné výkonové vinutí P1 a P2 slouží k připojení odporníku s polovičním maximálním zatížením tlumivky. Součástí každé zhášecí tlumivky je nežádoucí parazitní odpor, znemožňující tlumivce zcela vykompenzovat kapacitní poruchový proud.

Kompenzací kapacitních proudů docílíme, že:

- Místem zemního spojení teče jen činný zbytkový proud v řádech mA.
- Eliminace krokového napětí.
- Dotykové napětí v místě poruchy není životu nebezpečné.
- Při zemním spojení se síť s kompenzací může provozovat hodiny.
- Po odstranění poruchy se síť samovolně vrátí k původní velikosti napětí v postižené fázi.
- Při zhášení zemního spojení nedochází k tak velkým přepětím jako v sítích izolovaných.

Rezistance

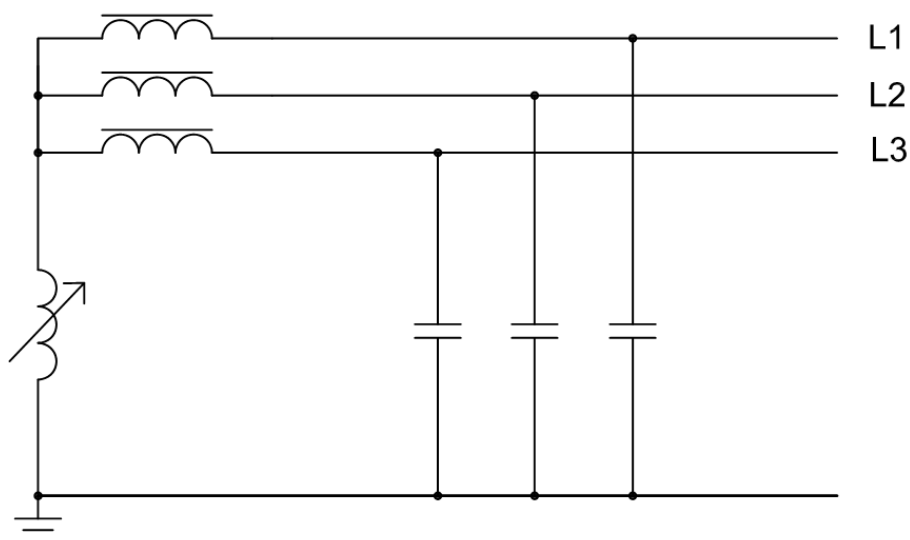
Uzemněním přes malý činný odpor se sníží velikost proudu při spojení fáze se zemí. Používá se převážně u kabelového vedení, kde jsou velmi vysoké hodnoty kapacitních proudů a pro kompenzaci by bylo potřeba zhašecí tlumivky s velmi vysokým kompenzačním výkonem, což je neekonomické. Kabelová vedení mají totiž kapacity proti zemi několikanásobně vyšší než venkovní vedení. Na rozdíl od tlumivky dokáže rezistence omezit také přepětí, které namáhá izolaci zdravých fází a umožňuje vypnutí obvodu za použití jednoduchých ochran.

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

$$\bar{I}_{por} = \sqrt{\bar{I}_R^2 + \bar{I}_C^2} \text{ (A) přitom } \bar{I}_R > \bar{I}_C \quad (2.4.3.1-1)$$

Bauchův transformátor

Primární vinutí, zapojené do hvězdy, je připojeno paralelně ke generátoru. Sekundární vinutí má regulovatelnou indukčnost a je zapojeno do trojúhelníka. Bauchův transformátor plní stejnou funkci jako zhašecí tlumivka, na rozdíl od ní ale může být připojen i na transformátor s vyvedeným nulovým bodem, takže zkratové proudy neprocházejí vinutím generátoru. Navíc u něj nehrozí nebezpečí rezonance jako u tlumivky. V praxi se však jeho použití příliš nerozšířilo, protože je jeho pořízení poměrně nákladné a způsobuje ztráty. [5, 9]



Obrázek 2.4.3.1-2: Neúčinně uzemněná soustava s Petersenovou tlumivkou

3 Charakteristiky napětí

Česká norma ČSN 50160 ed. 2 popisuje podmínky, kdy je vhodné připojení uživatelů do veřejné distribuční sítě. Tyto podmínky se týkají vlastností napětí, které by měli být za normálních provozních podmínek dodrženy. Norma ale také definuje situace, za kterých tyto vlastnosti být dodrženy nemusí a pojmenovává je jako mimořádný provoz. Za mimořádný provoz se považuje porucha, výstavba nebo údržba sítě, pokud výstavba sítě uživatelem nevyhovuje podmínkám pro normální provoz. Brány v potaz jsou i výjimečné situace zaviněné cizími okolnostmi nebo nepříznivým počasím.

3.1 Kvalita napětí

K popisu kvality napětí v distribuční síti slouží několik veličin. Efektivní a střední hodnota, kmitočet, tvar průběhu napětí a symetrie ve všech fázích. V závislosti na vnějších vlivech, rušení, změnou zatížení a poruchách se tyto vlastnosti v čase mění. Norma například uvádí dovolenou odchylku střední hodnoty napětí v rozsahu ± 10 minutových měřicích intervalů. Střední hodnota frekvence základní harmonické v síti vysokého a nízkého napětí je definována v těchto mezích:

$50 \text{ Hz} \pm 1\% \rightarrow 49,5 - 50,5 \text{ Hz}$ 99,5% roku

$50 \text{ Hz} + 4\% \text{ nebo } 50 \text{ Hz} - 6\% \rightarrow 47 - 52 \text{ Hz}$ měření v 10 s intervalech

3.2 Přepětí v síti

Zvýšenou hodnotu napětí může způsobit mnoho faktorů. Mimo jiné také zemní spojení. Podle doby trvání je přepětí děleno na:

- Přepětí v sítích nn – dočasné s efektivní hodnotou do 1,5kV po dobu 5s, přechodné špičkové do 6kV
- Přepětí v sítích vn – dočasné přepětí do 170% dohodnutého napájecího napětí u sítí účinně nebo impedančně uzemněných, do 200% dohodnutého napájecího napětí u izolovaných nebo kompenzovaných sítí [6, 2]

3.3 Nesymetrie napětí

Při provozu musí být za normálních podmínek 95 % efektivních a středních hodnot zpětné složky napájecího napětí menší, než 1,5 % sousledné složky v průběhu každého týdne. Měření se provádí v desetiminutových intervalech. Rovněž se měří zpětná složka v třísekundových intervalech kvůli možným vlivům na ochrany proti nesymetrii. Nesymetrie napětí se vyhodnocuje pomocí metody souměrných složek, kde se počítá podíl zpětné a souměrné složky.

3.4 Krátkodobá přerušení a poklesy napětí

Poklesy nebo přerušení napětí v síti vznikají náhodně a tudíž nelze dobře předvídat jejich výskyt. Nejlepší způsob popisu těchto jevů se nachází ve statistice. Za pokles napětí se považuje snížení napětí, po kterém následuje jeho obnovení na původní hodnotu do několika sekund. Zatímco přerušení znamená úplné vymizení napájecího napětí po dobu překračující 60 sekund. Rozdíl mezi poklesem a přerušením není tedy jen v hloubce poklesu ale i v době trvání. Hloubka poklesu je definována jako procentuální část jmenovitého napětí sítě. V praxi se hloubka poklesu a doba trvání koriguje náhradními zdroji, které se používají k překlenutí krátkodobého poklesu nebo přerušení napětí.

O pokles napětí se jedná pouze v případě, kdy tento pokles zmenší celkové napětí sítě pod 90 % jmenovitého napětí. Jednou z charakteristických vlastností sítě je četnost výskytů poklesů a přerušení napětí s jejich hloubkou poklesu a dobou trvání.

Příčin krátkodobých poklesů a přerušení napětí v síti může být několik. Mezi ty nejčastější patří:

- Činnost ochran při zkratových poruchách, jako je například opětovné zapínání.
- Zapínání velkých odběrů při spínacích operacích.
- Změny v konfiguraci sítě či složení generátorů způsobující změny zkratového výkonu.
- Změny komplexního proudu, který je odebíráný zátěžemi v síti, způsobujícími změny úbytků napětí na impedanci sítě. [6, 2]

4 Zemní poruchy v sítích VN

V České republice jsou nejrozsáhlejší sítě vysokého napětí, zejména venkovní vedení s hodnotou napětí 22 kV. Jak jsem zmínil v předchozí kapitole, tyto sítě se uzemňují přes zhášecí tlumivku. Jde tedy o kompenzování proudů, vznikajících při poruše. V sítích VN se může vyskytovat několik typů poruch, například snížená či zvýšená hodnota napětí, zkrat, přetížení či nesymetrický průběh napětí. V sítích se nejčastěji vyskytují jednopólové poruchy, způsobené v první řadě atmosférickými vlivy u venkovního vedení nebo jinými vnějšími vlivy u vedení kabelového. V této kapitole se budu zabývat způsoby řešení a výpočtů těchto poruch v sítích kompenzovaných, v sítích uzemněných přes rezistanci a v sítích izolovaných.

4.1 Zemní spojení

Jednofázová porucha vznikající v sítích, kde uzel není uzemněn přímo. Pouchový proud se totiž v sítích izolovaných a nepřímo uzemněných nemůže přes nulový bod přímo uzavírat. Poruchový proud je tedy závislý na zemních kapacitních proudech sítě. Zemní spojení způsobuje řadu nežádoucích jevů, jako výrazný pokles napětí postižené fáze a zvýšení napětí ve zdravých fázích, vznik nulové složky napětí a proudu atd. Příčiny vzniku zemních spojení jsou v praxi přeskoky na izolátorech, vodivý dotyk vodiče se zemí, průraz izolace a mnoho dalších. V některých případech se může síť vn provozovat i pokud v ní k zemní poruše dojde. U rozměrnějších sítí přesahuje poruchový proud často hodnotu 5 A a vzniká pohyblivý oblouk velké délky, který s velkou pravděpodobností zasahuje sousední fáze. Porucha poté přechází ze zemního spojení na závažnější poruchu jakou je například dvoufázový zkrat. Vlivem oblouku se také přepalují vodiče a ničí se izolátory. Za těchto podmínek se již síť musí odstavit z provozu. [5] Zemní spojení se dělí na několik typů podle doby trvání a podle velikosti přechodového odporu v místě spojení na:

- Kovové a obloukové zemní spojení – přechodový odpor v řádech jednotek ohmů
- Odporové zemní spojení – přechodový odpor o hodnotě stovek ohmů
- Mžikové zemní spojení – doba trvání do 500 ms
- Krátkodobá zemní spojení – do 5 minut
- Trvalá zemní spojení – porucha trvá, dokud se neodstraní obsluhou
- Přerušované zemní spojení – sekvenčně se opakující zemní spojení [4]

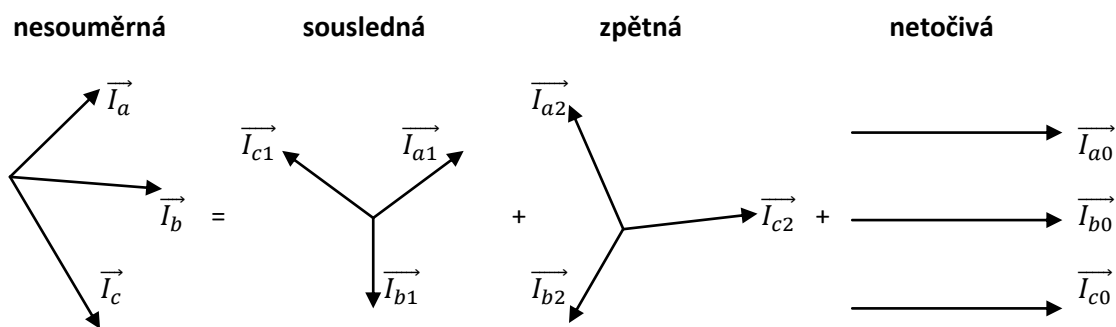
4.2 Metody řešení zemního spojení

Zemní spojení vzniká v třífázových soustavách jen v jedné fázi. Za předpokladu, že byla síť před poruchou v symetrii a všechny tři fáze měly stejnou hodnotu proudu a napětí, při zemním spojení se stav změní na nesymetrický. Popis takového nevyváženého stavu je velice náročný a ve většině případů i dosti nepřehledný. Pro zjednodušování se používá složkových metod, kterých existuje více druhů. V elektroenergetice se používá zejména metoda souměrných složek.

4.2.1 Metoda Souměrných složek (metoda Fortescue)

Tento způsob analyzování zemních poruch zavedl v roce 1918 C.L. Fortescue. Jak vyplývá z jejího názvu, hvězdice nesouměrných fázorů proudu nebo napětí ve fázích rozkládá na tři souměrné složky. První složka se nazývá sousledná, vyjadřuje fázor s fázovým posuvem 120° v kladném směru. Počítám-li s ní, používám pro zjednodušení veličiny s indexem 1. Druhá složka, s názvem zpětná, jde o fázor s posuvem 120° v záporném směru. Zde používám veličiny s indexem 2. Třetí netočivé složce s nulovým posuvem přiřazuji index 0.

Pozn.: Dříve se používalo označení pomocí indexů d, i, h.



Fázové veličiny nesouměrné soustavy se převádí na jednotlivé složky pomocí matice \bar{F} , jinak zvané jako Fortescue matice. Platí tedy: $\bar{I} = \bar{F} * \bar{I}_s (A)$

$$\text{kde: } \bar{I} = \begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix} (A) \quad \bar{I}_s = \begin{pmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{pmatrix} (A) \quad \bar{F} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2.1-1)$$

Pozn.: Stejně tak lze tímto způsobem rozkládat fázová napětí.

V matici \bar{F} se objevují \bar{a}, \bar{a}^2 . Jde o takzvané fázory natočení, pomocí kterých můžu počítat pouze s jednou složkou zpětné, sousledné a netočivé složky. Fázory natočení jsou vyjádřeny v této podobě:

$$\bar{a} = 1 \angle \frac{2\pi}{3} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.2.1-2)$$

$$\bar{a}^2 = 1 \angle \frac{4\pi}{3} = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.2.1-3)$$

Pokud použiji tyto operátory, platí:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{a1} + \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{a0} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0(A) \quad (4.2.1-4)$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_{b1} + \bar{I}_{b2} + \bar{I}_{b0} = \bar{a}^2 \bar{I}_{a1} + \bar{a} \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{a0} = \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{I}_0(A) \quad (4.2.1-5)$$

$$\bar{I}_c = \bar{I}_{c1} + \bar{I}_{c2} + \bar{I}_{c0} = \bar{a} \bar{I}_{a1} + \bar{a}^2 \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{a0} = \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{I}_0(A) \quad (4.2.1-6)$$

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

Determinant Fortescue matice je nenulový, můžu tedy provést její inverzi. Pomocí inverzní Fortescue matice a souměrných složek lze řešit nesouměrný stav soustavy při poruše:

$$\bar{I} = \bar{I}_s * \bar{F}^{-1}(A) \quad (4.2.1-7)$$

$$\begin{matrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{matrix} = \begin{matrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{matrix} * \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1-8)$$

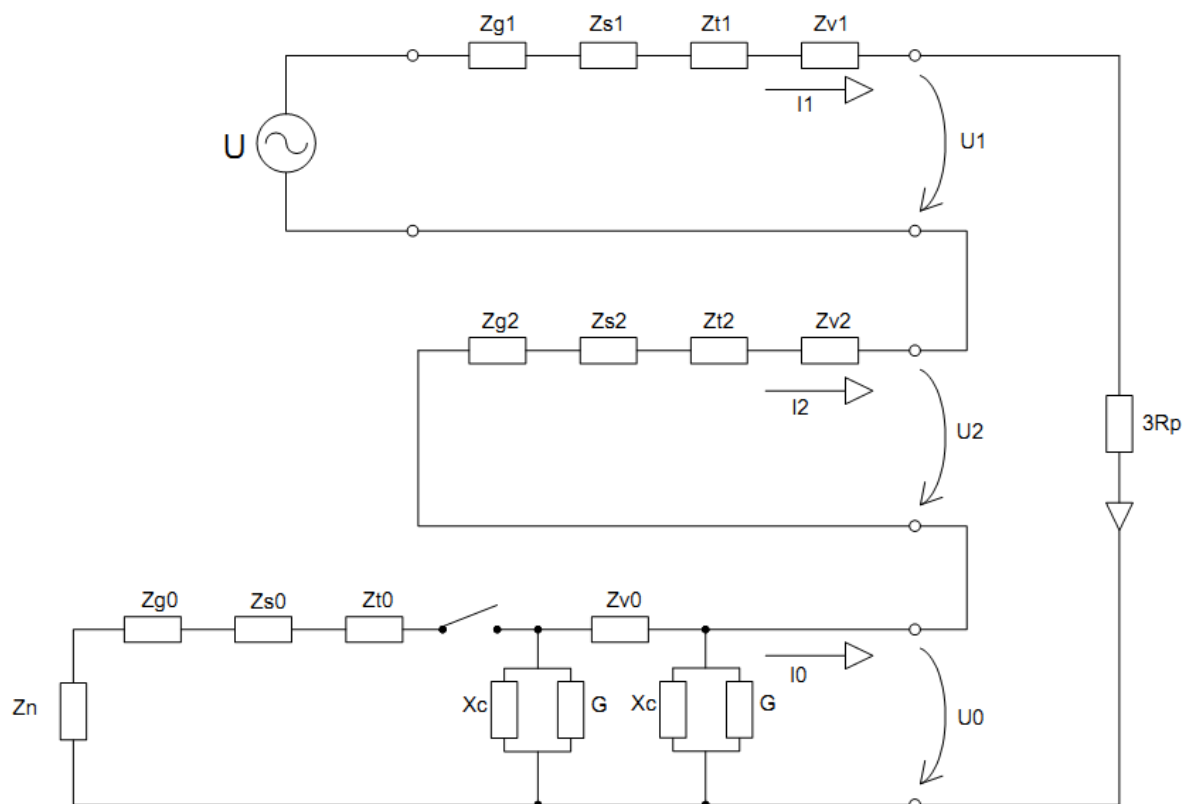
Po rozepsání dostanu:

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{3} (\bar{I}_a + \bar{a} \bar{I}_b + \bar{a}^2 \bar{I}_c) \quad (4.2.1-9)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3} (\bar{I}_a + \bar{a}^2 \bar{I}_b + \bar{a} \bar{I}_c) \quad (4.2.1-10)$$

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3} (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \quad (4.2.1-11)$$

Vzájemně propojená náhradní schémata jednotlivých složek při zemním spojení vypadají takto:



Obrázek 4.2.1-1: Propojení náhradních schémat složkových soustav

Legenda:

U ...zdroj střídavého napětí

Z_g ...impedance generátoru

Z_s ...impedance sítě

Z_t ...impedance transformátoru

Z_v ...impedance vedení

X_c ...kapacitní reaktance vedení

G ...převrácená hodnota svodového činného odporu

R_p ...odpor poruchy

Z_n ...impedance uzemnění

$I_{1,2,0}$...složkový proud

$U_{1,2,0}$...složkové napětí

Počítání se všemi reaktancemi a odpory by bylo pracné a nepřehledné. Při výpočtech budu zahrnovat impedanci transformátoru a vedení, kapacitní reaktanci a svodový odpor vedení. Impedance vedení a kapacity fází proti zemi jsou závislé na délce vedení. Pokud se tedy mění délka vedení, mění se i parametry sítě.

4.3 Výpočty zemních poruch v soustavách VN

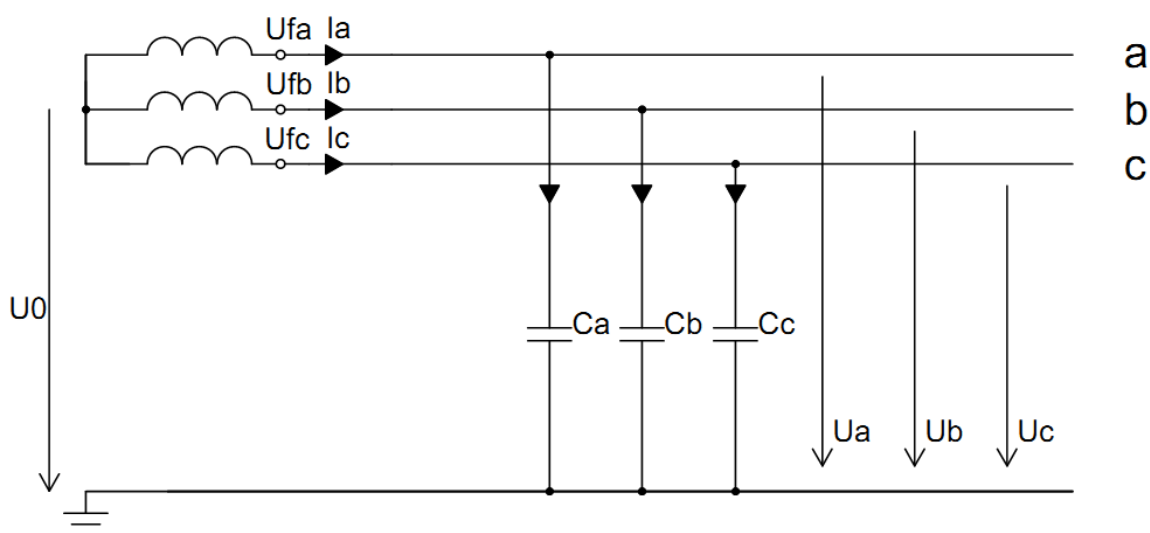
V této kapitole vysvětlím stavy před poruchou a změny veličin při vzniku jednofázové poruchy. Nejčastější poruchy, vznikající jak v soustavách VN tak VVN a NN, jsou poruchy jednofázové. Zde se zaměřím na jednofázové poruchy v sítích VN, jinak známé jako zemní poruchy.

4.3.1 Soustavy izolované od země

Soustavy s izolovaným pracovním vodičem jsou výhodné v místě, kladoucím důraz na nepřetržitou dodávku elektrické energie i v případě poruchy. Protože sekundární uzel transformátoru je uzemněn přes teoreticky nekonečnou impedanci, důsledkem vzniklé poruchy je malý proud, který není přímo nebezpečný a rozvod energie může dále pokračovat. Izolované soustavy jsou však výhodné pouze tehdy, pokud jsou poruchy detekovány krátce po svém vzniku, aby se nemohly rozšířit z jedné fáze do druhé.

4.3.1.1 Izolovaná síť před poruchou

Předpokládám nezatíženou síť a symetrické napájení. Pro zjednodušení také uvažuji pouze kapacity proti zemi, které mají při zemním spojení největší vliv.



Obrázek 4.3.1.1-1: Izolovaná soustava - bezporuchový stav

Fázové proudy a napětí vypočtu na základě schématu

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

$$\bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} = 0 \quad (4.3.1.1-1)$$

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

$$\bar{I}_a = j\omega C_a \bar{U}_a \quad (\text{A})$$

$$\bar{I}_b = j\omega C_b \bar{U}_b \quad (\text{A}) \quad (4.3.1.1-2)$$

$$\bar{I}_c = j\omega C_c \bar{U}_c \quad (\text{A})$$

V izolované síti je součet těchto proudů roven nule.

Po sečtení rovnic (4.3.1.1-1) a (4.3.1.1-2), dostaneme:

$$j\omega((C_a \bar{U}_a + C_b \bar{U}_b + \bar{U}_c \bar{U}_c) - (C_a + C_b + C_c)\bar{U}_0 - (C_a \bar{U}_{fa} + C_b \bar{U}_{fb} + C_c \bar{U}_{fc})) = 0 \quad (4.3.1.1-3)$$

První člen můžeme zanedbat, fázové veličiny přepočtu na úroveň postižené fáze pomocí fázorů natočení.

$$\bar{U}_{fb} = a^2 \bar{U}_{fa} \text{ a } \bar{U}_{fc} = a \bar{U}_{fa} (\text{V}) \quad (4.3.1.1-4)$$

Pomocí těchto úprav dostanu:

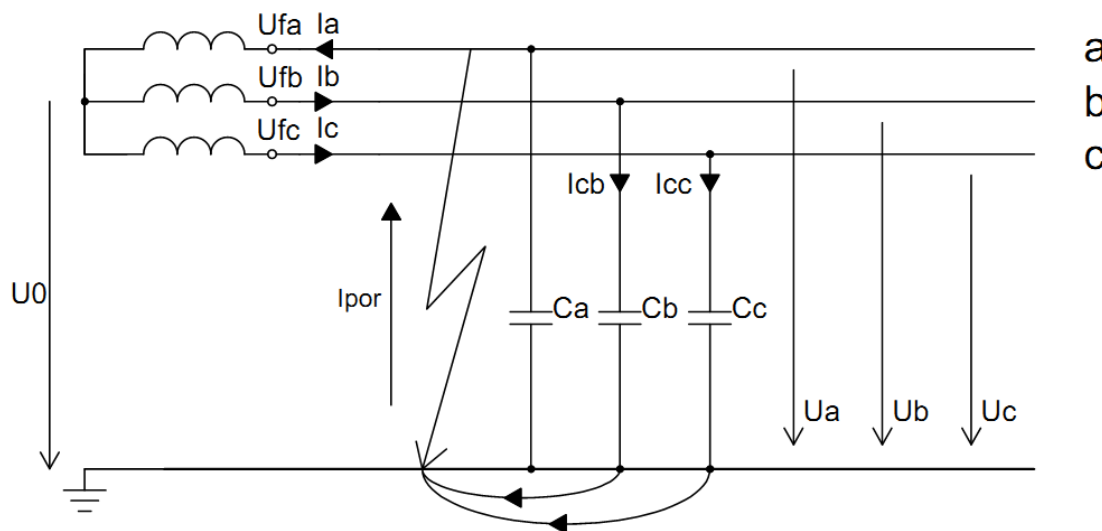
$$\bar{U}_0 = -\frac{C_a + a^2 \bar{C}_b + a \bar{C}_c}{C_a + C_b + C_c} \bar{U}_{fa} \quad (\text{V}) \quad (4.3.1.1-5)$$

Z této rovnice plyne, že napětí izolovaného uzlu v bezporuchovém stavu se rovná nule jen při symetrii kapacit proti zemi.

4.3.1.2 Izolovaná síť při kovovém zemním spojení

U kovového zemního spojení je velikost přechodového odporu v řádech jednotek ohmů.

Uvažuji kovové zemní spojení ve fázi a, viz obr. 4.3.1.2-1



Obrázek 4.3.1.2-1: Izolovaná soustava - kovové zemní spojení

$$\bar{I}_{por} = \bar{I}_a = \bar{I}_b + \bar{I}_c \text{ (A)} \quad (4.3.1.2-1)$$

$$\bar{I}_b = j\omega C_b \bar{U}_b \text{ (A)} \quad (4.3.1.2-2)$$

$$\bar{I}_c = j\omega C_c \bar{U}_c \text{ (A)}$$

$$\bar{U}_a = 0 \quad (4.3.1.2-3)$$

Při zemním spojení tečou proudy kapacitami proti zemi zdravých fází. Součtem těchto proudů dostanu poruchový proud. Kapacita proti zemi postižené fáze je zkratována. Takže napětí postižené fáze \bar{U}_a klesne na nulu. Pokud vycházím ze vztahů (4.3.1.1-1) a (4.3.1.2-3), dojdou k závěru, že napětí sekundárního vinutí transformátoru proti zemi vzroste z nuly na opačně orientovanou hodnotu fázového napětí postižené fáze.

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \text{ (V)} \quad (4.3.1.2-4)$$

Pomocí rovnic (4.3.1.1-1) vypočtu:

$$\bar{U}_b = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fb} = -\bar{U}_{fa} + a^2 \bar{U}_{fa} = \bar{U}_{fa}(a^2 - 1) = -\sqrt{3}e^{j30^\circ} \bar{U}_{fa} \text{ (V)} \quad (4.3.1.2-5)$$

$$\bar{U}_c = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fc} = -\bar{U}_{fa} + a \bar{U}_{fa} = \bar{U}_{fa}(a - 1) = \sqrt{3}e^{-j30^\circ} \bar{U}_{fa} \text{ (V)} \quad (4.3.1.2-6)$$

Pokud předpokládám souměrnost kapacit proti zemi, tak poruchový proud vypočtu pomocí rovnic (4.3.1.2-1) a (4.3.1.2-2):

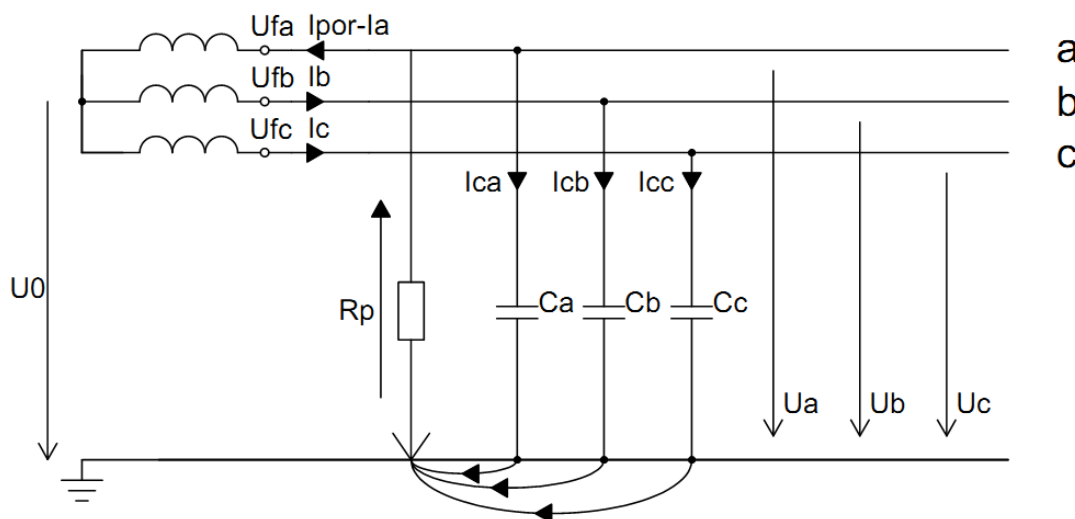
$$\bar{I}_{por} = \bar{I}_a = \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega C_b \bar{U}_b + j\omega C_c \bar{U}_c = j\omega C (\bar{U}_b + \bar{U}_c) = j\omega C [(a^2 - 1) + (a - 1)] \bar{U}_{fa}$$

$$\bar{I}_{por} = j\omega C \left[\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right) \right] \bar{U}_{fa} = -3j\omega C \bar{U}_{fa} = 3j\omega C \bar{U}_0 \quad (4.3.1.2-7)$$

Z těchto výpočtů je patrné, že při zemním spojení vzrůstá napětí v nepostižených fázích z fázové hodnoty na sdruženou. Tento stav je nežádoucí a způsobuje přepětí a velké dotykové a krokové napětí. Z výpočtu (4.3.1.2-7) jsem zjistil, že poruchový proud je jasně kapacitního charakteru, uzlové napětí tedy předbíhá o $\pi/2$. Dále je patrné, že velikost poruchového proudu závisí na rozloze fázových kapacit vůči zemi, tedy na rozloze sítě. [1, 10]

4.3.1.3 Odporové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem

V sítích vysokého napětí se při zemním spojení mnohem častěji v místě poruchy vyskytuje přechodový odpor v řádech několika desítek i stovek ohmů. Na rozdíl od kovového zemního spojení, u odporového není napětí postižené fáze nulové. Napětí uzlu a poruchový proud při zemním spojení se tak zde bude lišit.



Obrázek 4.3.1.3-1: Izolovaná soustava - odporové zemní spojení

Popis stavu pomocí vztahů je obdobné jako u kovového zemního spojení, proto zde uvedu zkrácené odvození.

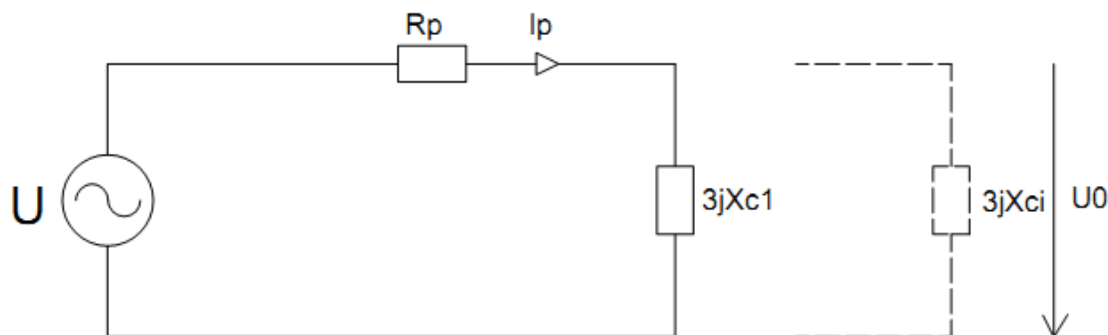
Podle schématu můžu napsat, že pro poruchový proud platí:

$$\bar{I}_{por} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = -\frac{\bar{U}_a}{R_p} \text{ (A)} \quad (4.3.1.3-1)$$

Proudy vyjádřím pomocí kapacit a napětí fází proti zemi (4.3.1.1-2), sečtu s rovnicemi (4.3.1.1-1) a tím opět dostanu rovnici (4.3.1.1-3).

$$j\omega((C_a\bar{U}_a + C_b\bar{U}_b + C_c\bar{U}_c) - (C_a + C_b + C_c)\bar{U}_0 - (C_a\bar{U}_{fa} + C_b\bar{U}_{fb} + C_c\bar{U}_{fc})) = 0$$

Pro výpočet napětí v uzlu transformátoru a poruchového proudu mohu využít zjednodušené náhradní schéma složkových soustav, přičemž kvůli zjednodušení zanedbám impedance transformátoru a vedení a svodové odpory sítě.



Obrázek 4.3.1.3-2: Zjednodušené náhradní schéma jednofázového odporového zemního spojení

$$jX_c = jX_{c1} + jX_{c2} + \dots + jX_{ci} \quad (4.3.1.3-2)$$

$$\bar{I}_{por} = \frac{\bar{U}}{R_p + 3jX_c} = \frac{\bar{U}}{R_p + \frac{1}{3j\omega C}} = \frac{3\bar{U}j\omega C}{3j\omega CR_p + 1} \text{ (A)} \quad (4.3.1.3-3)$$

$$\bar{U}_0 = \bar{I}_{por} \frac{1}{3j\omega C} = \frac{3\bar{U}j\omega C}{3j\omega CR_p + 1} \frac{1}{3j\omega C} = \frac{\bar{U}}{3j\omega CR_p + 1} \text{ (V)} \quad (4.3.1.3-4)$$

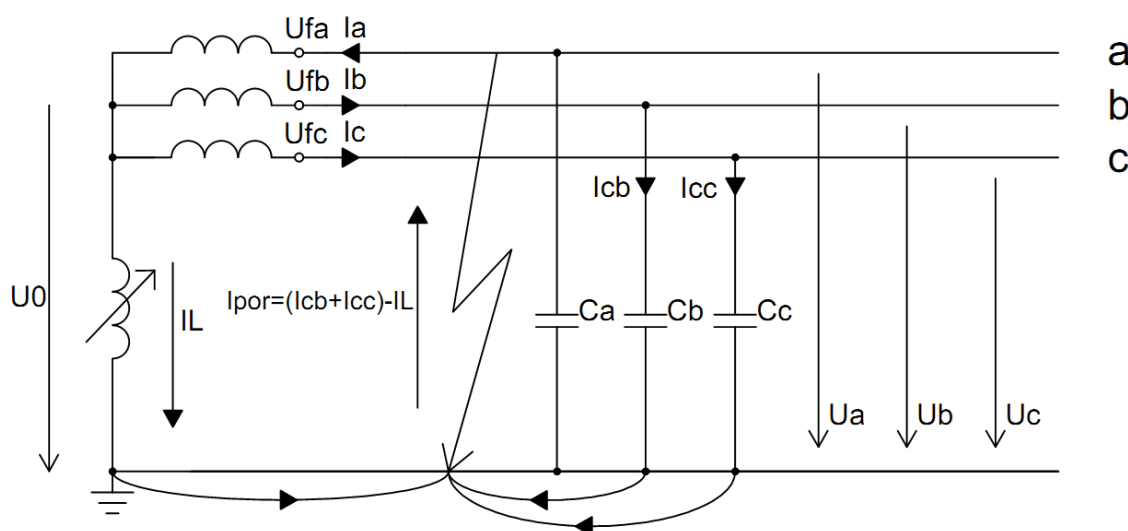
Z těchto vztahů vyplývá, že poruchový proud i napětí v uzlu závisí na poruchovém odporu a kapacitních reaktancích. Ve skutečnosti se na něm v malé míře podílí také impedance prvků sítě, jako impedance vedení a impedance transformátoru. [1, 10]

4.3.2 Soustava s nepřímým uzemněním

Použití nepřímého uzemnění se v sítích vysokého napětí vyskytuje nejčastěji. Venkovní sítě využívají kompenzaci pomocí zhášecí tlumivky a kabelová vedení používají rezistanci. Důvody, proč tomu tak je, jsem již zmínil v předchozích kapitolách. V této části popíši napěťové a proudové poměry v sítích nepřímým uzemněním při zemním spojení.

4.3.2.1 Kompenzace Petersenovou tlumivkou

Použití tlumivky je podle normy při poruchovém proudu nad 10A doporučené a od 20A je nutné. Zhášecí tlumivky jsou laditelné a obsahují automatiku, která se změnou indukčnosti přizpůsobuje kompenzačním potřebám sítě. Na obrázku 4.3.2.1-1 je vyobrazena síť při zemním spojení. Pokud je zemní spojení ideální a cívka vhodně nastavena, napětí uzlu je totožné s opačně orientovanou hodnotou fázového napětí postižené fáze. Stejně tak, jako toto napětí způsobuje poruchový proud kapacitního charakteru, vyvolává v tlumivce stejně velký proud indukčního charakteru, posunutého vůči poruchovému proudu o π . Dva proudy působící proti sobě se navzájem vruší, oblouk sám od sebe zhasne a napětí ve fázích se samovolně obnoví na svou původní hodnotu. Ve skutečnosti se tlumivka rozladí, aby poruchový proud úplně nezanikl a bylo stále možné poruchu lokalizovat. Rozladění bývá mezi 1-5% kapacitního proudu. [2, 4]



Obrázek 4.3.2.1-1: Princip kompenzace poruchového proudu

Kompenzaci rozepíšu následovně:

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \text{ (V)} \Rightarrow \bar{I}_L = -j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} = j \frac{\bar{U}_{fa}}{\omega L} = -\bar{I}_C \text{ (V)} \quad (4.3.2.1-1)$$

Vztah pro poruchový proud jsem počítal při zemním spojení u izolované soustavy, mohu ho použít i zde:

$$-j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} = 3j\omega C \bar{U}_0 \quad (4.3.2.1-2)$$

Poruchový proud je potom dán:

$$\bar{I}_{por} = \frac{\bar{U}_0}{R_L} + 3G\bar{U}_0 + 3j\omega C \bar{U}_0 - j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} \text{ (A)} \quad (4.3.2.1-3)$$

Činná složka poruchového proudu se skládá z úbytků napětí, které vznikají na činném odporu tlumivky a svodových odporech fází. Jalová část vzniká na kapacitních a indukčních reaktancích fází. Následkem správného naladění tlumivky se v poruchovém proudu uplatní pouze činná složka, která je nižší, než kapacitní proud sítě. Zlepšují se tím podmínky pro samo-zhášení a zmenšují se nároky na dimenzování a použití ochran v sítí.

Vztah (4.3.2.1-2) již mohu upravit tak, abych dostal ideální indukčnost kompenzační tlumivky:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \text{ (mH)} \quad (4.3.2.1-4)$$

Jak je vidět, v podstatě se jedná o opravený Thompsonův vzorec pro rezonanční frekvenci. Nicméně se cívka ladí s určitou odchylkou, aby stávající poruchový proud byl schopný i nadále indikovat poruchu.

Pomocí celkové kapacity zdravých fází a napětí pracovního uzlu mohu spočítat potřebný výkon tlumivky:

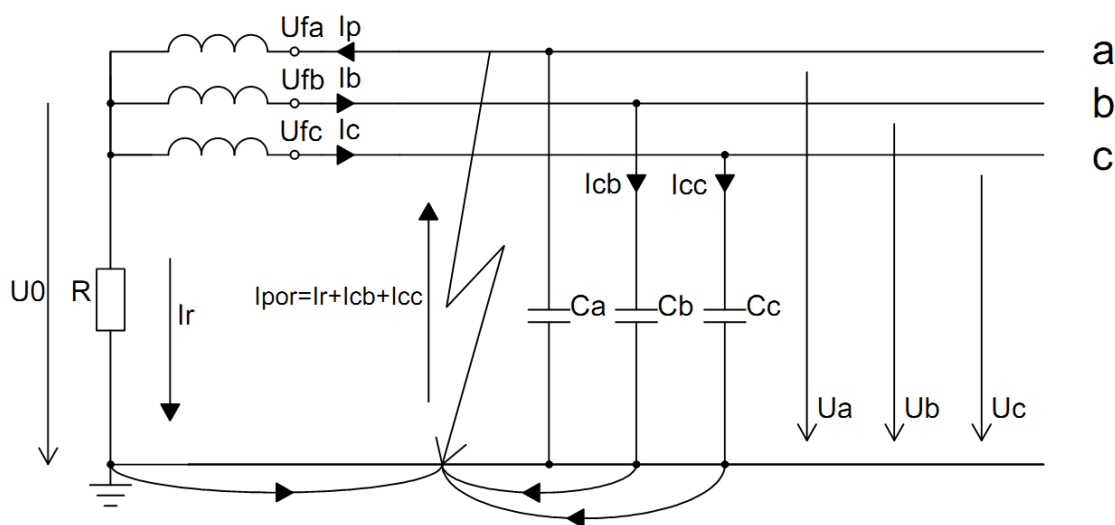
$$\bar{S} = \bar{U}_0 \bar{I}_L = \frac{\bar{U}_0^2}{\omega L} = 3\omega C \bar{U}_0^2 = -3\omega C \bar{U}_{fa}^2 \text{ (VA)} \quad (4.3.2.1-5)$$

Záporná hodnota zde není relevantní. Minimálně tímto výkonem by měla tlumivka disponovat. S uvažovanou třetinovou rezervou by pak její zdánlivý výkon měl být:

$$\bar{S} = 3\omega C \bar{U}_{fa}^2 + \frac{1}{3} * (3\omega C \bar{U}_{fa}^2) = 4\omega C \bar{U}_{fa}^2 \text{ (VA)} \quad (4.3.2.1-6)$$

4.3.2.2 Soustava nepřímo uzemněná pomocí odporu

Hlavní funkce odporníku je snížit napětí vznikající při zemním spojení a zajistit odpovídající reakci zemních ochran na proud, který odporníkem při poruše prochází. Použití odporu nachází své uplatnění u kabelového vedení, kde jsou hodnoty kapacit fází proti zemi až 70krát vyšší než jak je tomu u venkovních sítí. Tím pádem při poruše vzniká také vyšší poruchový proud. Použití rezistence je tedy ekonomicky a prakticky výhodnější než pokoušet se tak vysoký poruchový proud vykompenzovat.



Obrázek 4.3.2.2-1: Nepřímo uzemněná soustava pomocí odporu

Z obrázku 4.3.2.2-1 je patrné, že poruchový proud je vektorovým součtem kapacitních proudů nepostížených fází a proudu procházejícího odporníkem. Kvůli správné funkci a schopnosti omezovat přepětí při poruše, by měl poruchový proud z větší části tvořit proud odporníku I_r . To platí, pokud je splněna podmínka: $I_R > I_{cb} + I_{cc}$. Určující parametr odporníku proto není elektrický odpor v ohmech, ale velikost jmenovitého proudu uzlového odporníku v ampérech. Uzlové odporníky se vyrábí se jmenovitým proudem od desítek až stovek ampér. S rostoucí vzdáleností odporníku od místa poruchy proud odporníkem klesá. To je způsobeno elektrickými parametry měnicemi se v závislosti na délce vedení. Při návrhu uzemnění by se tedy mělo počítat s jistou rezervou, aby i při vzdálenější poruše procházel odporníkem proud, který je schopen zajistit správnou funkci zemních ochran.

Při výpočtu poruchového proudu budu uvažovat nejen příčné parametry jako kapacitní reaktance a rezistanci odporníku, ale také podélné odpory vedení a transformátorů. Odpory všech souměrných složek pro zjednodušení sečtu.

$$\bar{Z} = \frac{1}{3}(Z_{T1} + Z_{V1} + Z_{T2} + Z_{V2} + Z_{T0} + Z_{V0}) \quad (\Omega) \quad (4.3.2.2-1)$$

Při výpočtu poruchového proudu uvažuji také poruchový odpor.

$$I_{por} = \frac{\bar{U}_{fa}}{\bar{Z}_C} \quad (\text{A}) \quad (4.3.2.2-2)$$

$$\bar{Z}_C = R_p + Z + \frac{\frac{R}{3j\omega C}}{R + \frac{1}{3j\omega C}} = R_p + Z + \frac{\frac{R}{3j\omega C}}{\frac{3j\omega CR + 1}{3j\omega C}} = R_p + Z + \frac{R}{3j\omega CR + 1} \quad (4.3.2.2-3)$$

$$\bar{I}_{por} = \frac{\bar{U}_{fa}}{R_p + Z + \frac{R}{3j\omega CR + 1}} \quad (\text{A}) \quad (4.3.2.2-4)$$

$$\bar{I}_{por} = \frac{\bar{U}_{fa}}{R_p + Z + \frac{R}{3j\omega CR + 1}} \quad (\text{A}) \quad (4.3.2.2-5)$$

Napětí uzlu spočítám pomocí poruchového proudu a paralelní kombinace rezistence odporníku a kapacitních reaktancí.

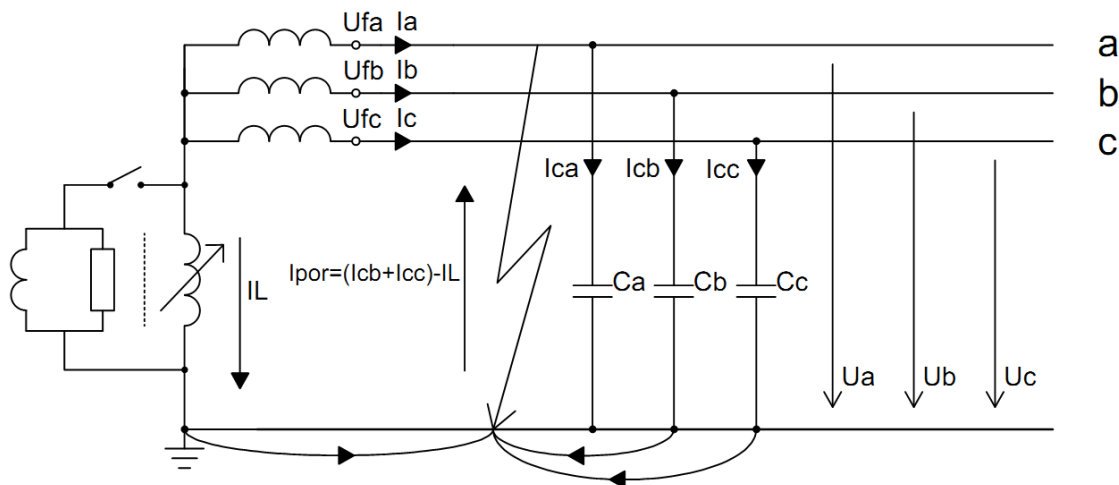
$$\bar{U}_0 = \bar{I}_{por} \frac{R}{3j\omega CR + 1} \quad (\text{V}) \quad (4.3.2.2-6)$$

[1, 4, 10]

4.3.2.3 Kompenzace s tlumivkou s dodatečným připínáním odporníku

Používání odporníku při kompenzaci má své opodstatnění v případě, kdy například kompenzování zemních spojení nezapříčiní jejich samo-zhášení. Zabudovaná automatika přepíná mezi tlumivkou a rezistorem a tím ovlivňuje činnou složku poruchového proudu. Pokud tedy k samo-uhašení při kompenzaci nedojde, automatika přepne na rezistor, který zvýšením činné složky donutí zemní ochrany odpovídajícím způsobem zareagovat. Doba, po které se odporník do obvodu při přetrvávající poruše připojí, je samozřejmě nastavitelná a liší se podle typu obvodu a typu použitých zemních ochran. U rychle reagujících ochran se jedná například o 0,5 vteřiny, u pomalejších ochran až 10 vteřin.

V kapitole 2.4.3.1 jsem popsal konstrukci tlumivky se všemi jejími vývody. Odporník je připojen pomocným vinutím. Transformátory připojené k měřicím vinutím zjišťují stav obvodu a poskytují údaje o velikosti proudu a napětí, které automatika vyhodnocuje a na základě toho spíná odporník v obvodu. V kombinaci s rychlými zemními ochranami má síť s tímto typem uzemnění dobré parametry a může připravit kvalitní podmínky pro provoz i při zemním spojení. Obrázek 4.3.2.3-1 znázorňuje takové zapojení.



Obrázek 4.3.2.3-1: Kompenzace zemního spojení v kombinaci s rezistancí

5 Modelové výpočty sítí

V této kapitole provedu výpočty parametrů v sítích izolovaných, kompenzovaných a odporově uzemněných při jednofázových zemních poruchách. Vytvořím konkrétní příklady a použiji konkrétní parametry, které jsem projednal se svým konzultantem panem Ing. Žákem. Příklad tedy bude teoretickým ověřením chování sítí při zemních spojeních v praxi. Výpočty provedu ručně a poté je zanesu do programu MS Excel, kde vytvořím tabulky s vypočtenými hodnotami. Pro porovnání vytvořím grafy závislostí poruchového proudu nebo napětí ve fázích na změně některých parametrů v síti, jako je například odpor poruchy, u kompenzovaných sítí indukčnost tlumivky nebo u odporových sítí resistance odporníku. Výsledné hodnoty a grafická znázornění pak mezi sebou porovnám.

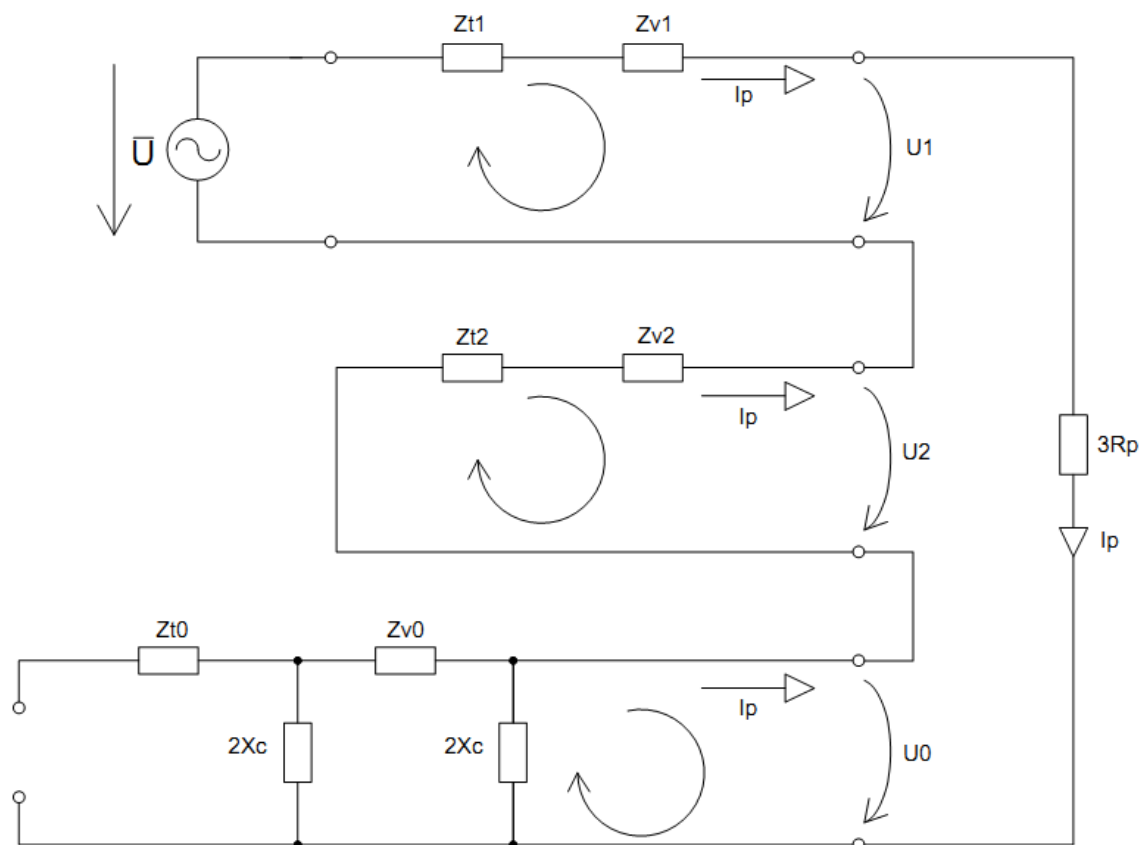
5.1 Izolovaná síť

Obrázek 5.1.1-1 popisuje síť s pracovním uzlem odděleným od země, ve které se objevilo zemní spojení. Napětí v jednotlivých fázích nemají stejnou hodnotu a nejsou vůči sobě posunuty o $\frac{2\pi}{3}$. Obvodem prochází poruchový proud složený z parazitních proudů kapacit proti zemi.

Abych mohl danou situaci vhodně řešit, převedu ji na soustavu složek: sousledné, zpětné a nulové. Rozložení reprezentuje obrázek 5.1.1-1. Aktivní část obvodu, kde se nachází sousledná složka, obsahuje zdroj fázového napětí. V pasívní části se nachází zpětná složka a složka nulová, kde je patrný i typ uzemnění sítě. V tomto případě jsou tedy svorky rozpojené a část obvodu vypadne. Co se týče podélných parametrů, při řešení neuvažuji impedance zdroje a sítě, počítám tedy pouze s impedancemi transformátoru a vedení. Příčné parametry v nulové složce tvoří s nulovou složkou impedance vedení π článek.

5.1.1 Parametry sítě

Izolovaná síť se nachází na hladině 6 kV, hodnota fázového napájecího napětí v sousledné složce je 3464,1 V. Transformátor s převodem p=110/6 kV má výkon S=40 MVA, napětí nakrátko $u_k=11\%$ a ztráty na krátko $P_k=140$ kW. Síť je propojena kabelovým vedením 2XSEYFGbY pro 6 kV, jehož činný odpor je $R=0,047$ Ω /km a indukčnost $L=0,257$ mH/km. Délka vedení je 5 km. Kapacitní proud kabelu je 1,8 A/km a kapacita 0,55 μ F/km.



Obrázek 5.1.1-1: Náhradní složkové schéma pro izolovanou síť

5.1.2 Výpočty

Nejprve zjednoduším obvod sečtením impedancí. Impedance vedení je v sousledné a zpětné složce stejná, v nulové složce je její velikost trojnásobná. Celková délka vedení je 5 km, z transformátoru vede 5 odboček, každá o délce 1 km. Odpor poruchy R_p zvolím 100Ω .

Impedance transformátoru:

$$Z_{t1} = Z_{t2} = Z_{t0} = \frac{u_k}{100} * \frac{U_t^2}{S_t} \quad (5.1.2-1)$$

$$Z_t = \frac{11}{100} * \frac{6^2}{40} = 0,099 \Omega \quad (5.1.2-2)$$

$$R_t = \frac{P_k}{S_t} * \frac{U_t}{S_t} = \frac{0,140 * 6^2}{40^2} = 0,00315 \Omega \quad (5.1.2-3)$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} = \sqrt{0,099^2 - 0,00315^2} = j0,0989 \Omega \quad (5.1.2-4)$$

$$Z_t = R + jX = 0,00315 + j0,0989 \Omega \quad (5.1.2-4)$$

Impedance vedení:

$$Z_{v1} = Z_{v2} = \frac{Z_{v0}}{3} \quad (5.1.2-5)$$

$$R_v = R * l = 0,047 * 1 = 0,047 \Omega \quad (5.1.2-6)$$

$$X_l = \omega * L = 2\pi f * 0,000257 = 0,0807 \Omega/\text{km} \quad (5.1.2-7)$$

$$X_v = X_l * l = 0,0807 * 1 = j0,0807 \Omega \quad (5.1.2-8)$$

$$Z_v = R_v + jX_v = 0,047 + j0,0807 \Omega \quad (5.1.2-9)$$

Kapacity proti zemi:

$$C = \frac{I_c}{3 * \omega * U_f} = \frac{1,8}{3 * 2\pi f * 3464,1} = 5,51^{-7} \text{F/km} \quad (5.1.2-10)$$

$$X_c = -j \frac{1}{\omega * l * C'} = -j \frac{1}{2\pi f * 5 * 5,51^{-7}} = -j1154,7 \Omega \quad (5.1.2-11)$$

$$2X_c = -j2309,4 \Omega \quad (5.1.2-12)$$

Celková impedance:

$$Z_1 = Z_2 = Z_v + Z_t = 0,047 + j0,0807 + 0,00315 + j0,098 = 0,05 + j0,18 \Omega \quad (5.1.2-13)$$

$$Z_{c0} = Z_{v0} + 2X_c = 3 * (0,047 + j0,0807) - j1154,7 = 0,141 - j2309,16 \Omega \quad (5.1.2-14)$$

$$Z_0 = \frac{Z_{c0} * 2X_c}{Z_{c0} * 2X_c} = \frac{(0,141 - j2309,16) * (-j2309,16)}{(0,141 - j2309,16) + (-j2309,16)} = 0,035 - j1154,6 \Omega \quad (5.1.2-15)$$

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 + R_p = 2 * (0,047 + j0,08) + (0,035 - j1154,64) + 100 \quad (5.1.2-16)$$

$$Z = 100,135 - j1154,28 \Omega$$

Složkový poruchový proud spočítám z ohmova zákona:

$$I_p = \frac{U_f}{Z} = \frac{3464,1}{100,135 - j1154,28} = 0,26 + j2,98 \text{ A} \quad (5.1.2-17)$$

Napětí v jednotlivých složkách spočítám pomocí vyznačených smyček

$$U_1 = U_f - I_p * Z_1 = 3464,1 - (0,26 + j2,98) * (0,05 + j0,18) \quad (5.1.2-18)$$

$$U_1 = 3464,6 - j0,2 \text{ V}$$

$$U_2 = -I_p * Z_2 = -(0,26 + j2,98) * (0,05 + j0,18) \quad (5.1.2-19)$$

$$U_2 = 0,52 - j0,2 \text{ V}$$

$$U_0 = -I_p * Z_0 = -(0,26 + j2,98) * (0,141 + 0,242) \quad (5.1.2-20)$$

$$U_0 = -3439,3 + j298,26 \text{ V}$$

Nyní jsem spočítal složkový proud v náhradním schématu a napětí jednotlivých složek. Pomocí Fortescue matice mohou tyto hodnoty převést na skutečné hodnoty napětí a proudů v jednotlivých fázích. Platí tedy: $\bar{I} = \bar{F} * \bar{I}_s$

$$\text{kde: } \bar{I} = \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad \bar{I}_s = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1.2-21)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,26 + j2,98 \\ 0,26 + j2,98 \\ 0,26 + j2,98 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,775 + j8,93 \\ -9,04 * 10^{-15} \\ -9,04 * 10^{-15} \end{bmatrix} \text{ A}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |8,97| \\ |-9,04 * 10^{-15}| \\ |-9,04 * 10^{-15}| \end{bmatrix} \text{ A}$$

Napětí ve fázích získám stejným způsobem

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1.2-22)$$

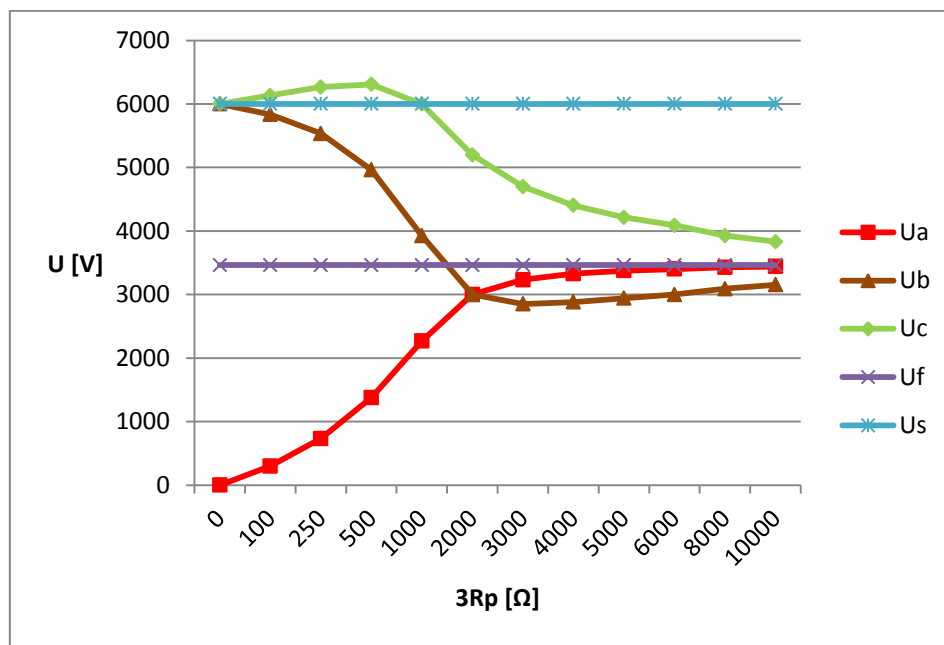
$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3464,6 - j0,2 \\ 0,52 - j0,2 \\ -3439,3 + j298,26 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25,84 + j297,87 \\ -5171,9 - j2701,54 \\ -5171,9 + j3298,45 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |299| \\ |5834,95| \\ |6134,18| \end{bmatrix} \text{ V}$$

Nenulový odpor poruchy zkresluje hodnoty napětí ve fázích. V porušené fázi je 299 V, napětí ve zdravé fázi U_b kleslo ze sdružené hodnoty na 5834,95 V a hodnota napětí U_c vzrostla na 6134,18 V. Poruchový proud v postižené fázi mírně klesl z kapacitního proudu 9A na 8,97 A.

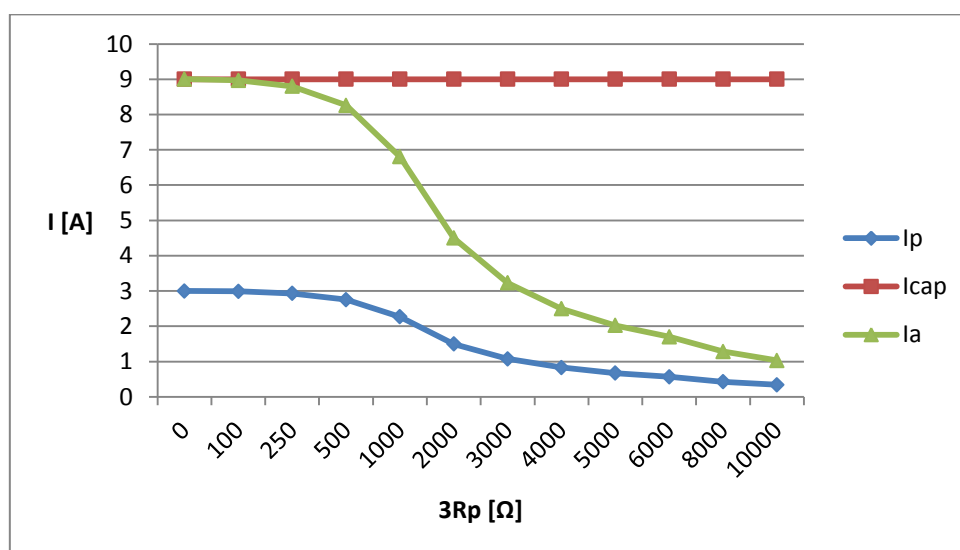
5.1.3 Grafické výstupy

V následujících grafech jsou znázorněny výsledné hodnoty napětí a proudů v izolované soustavě při zemním spojení, které jsem spočítal. První graf demonstruje závislost napětí v jednotlivých fázích na zvyšujícím se odporu zemního spojení.



Graf 5.1.3-1: Závislost napětí na odporu poruchy

Druhý graf zobrazuje závislost proudu na odporu poruchy. Jak je vidět, poruchový proud tvoří při kovovém spojení pouze proud kapacitní. Se zvyšujícím se odporem poruchy klesá stejně tak jako složkový proud v náhradním schématu.



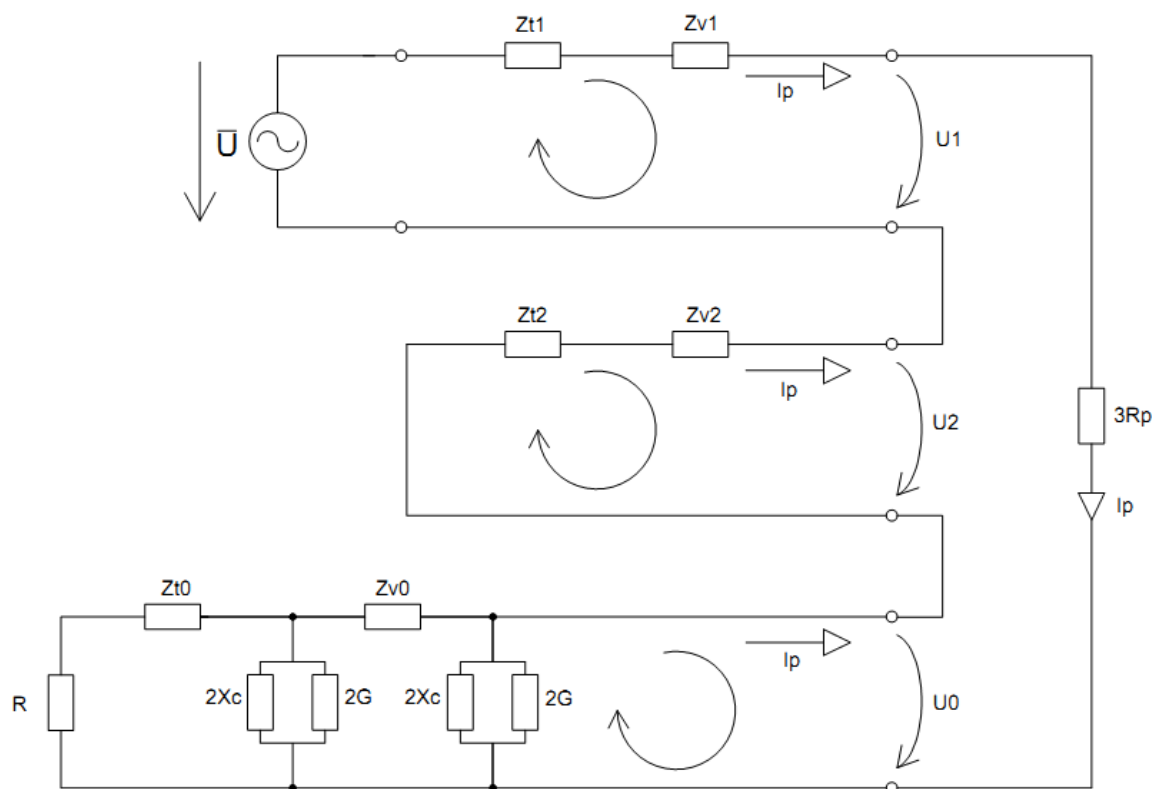
Graf 5.1.3-2: Závislost proudu na odporu poruchy

5.2 Sít' uzemněná pomocí odporníku

V této síti se k uzemnění používá rezistence, která zvýší činnou složku poruchového proudu. K rozvodu použijí kabelové vedení, kde očekávám vysoké kapacity proti zemi, tím pádem i vysokou jalovou složku proudu kapacitního charakteru. Pro dané kabelové vedení zvolím vhodný odporník, jehož činná složka poruchového proudu převyšuje kapacitní složku proudu kapacit proti zemi.

5.2.1 Parametry sítě

Odporová síť se nachází na hladině 22 kV, fázové napájecí napětí obvodu bude tedy 12701,71 V. Kabelové vedení AEXEKCEY pro 22 kV je 100 km dlouhé, rozdělené ve 20 odbočkách po 5 km délkách. Odpor vedení $R=0,164 \Omega/\text{km}$, indukčnost $L=0,39 \text{ mH}/\text{km}$. Hodnota kapacit proti zemi $C=0,27 \mu\text{F}/\text{km}$ a svodem G teče 1% kapacitního proudu. Transformátor použijí stejný jako v izolované síti. Uvažuji odpor poruchy o velikosti 100Ω .



Obrázek 5.2.1-1: Náhradní složkové schéma pro odporovou síť

5.2.2 Výpočty

Jako v předchozím příkladu nejprve zjednoduším obvod sečtením impedancí. Impedance vedení je v sousledné a zpětné složce stejná, v nulové složce je její velikost trojnásobná. V bodě uzemnění je činný odpor, přibude tedy větev s nulovou složkou impedance transformátoru a s odporem.

Impedance transformátoru:

$$Z_{t1} = Z_{t2} = Z_{t0} = \frac{u_k}{100} * \frac{U_t^2}{S_t} \quad (5.2.2-1)$$

$$Z_t = \frac{11}{100} * \frac{23^2}{40} = 1,45475 \Omega$$

$$R_t = \frac{P_k}{S_t} * \frac{U_t}{S_t} = \frac{0,140 * 23^2}{40^2} = 0,046 \Omega \quad (5.2.2-2)$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} = \sqrt{1,45475^2 - 0,046^2} = 1,454 \Omega \quad (5.2.2-3)$$

$$Z_t = R + jX = 0,046 + j1,454 \Omega \quad (5.2.2-4)$$

Impedance vedení:

$$Z_{v1} = Z_{v2} = \frac{Z_{v0}}{3} \quad (5.2.2-5)$$

$$R_v = R * l = 0,164 * 3 = 0,492 \Omega \quad (5.2.2-6)$$

$$X_l = \omega * L = 2\pi f * 0,00039 = 0,1225 \Omega/\text{km} \quad (5.2.2-7)$$

$$X_v = X_l * l = 0,1225 * 3 = 0,367 \Omega \quad (5.2.2-8)$$

$$Z_v = R_v + jX_v = 0,492 + j0,367 \Omega \quad (5.2.2-9)$$

Kapacity a kapacitní impedance proti zemi a svod:

$$X_c = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{2\pi f 2,7^{-7} * 100} = -j117,88 \Omega \quad (5.2.2-10)$$

$$R_G = |X_c| * 100 = 117,88 * 100 = 11788 \Omega \quad (5.2.2-11)$$

$$Z_{cg} = \frac{X_c * R_G}{X_c + R_G} = 1,18 - j117,9 \Omega \quad (5.2.2-12)$$

$$2Z_{cg} = 2 * (1,18 - j117,9) = 2,36 - j235,8 \Omega \quad (5.2.2-13)$$

Celkovou impedanci a odpor odporníku R spočítám dle následujících vztahů:

$$Z_1 = Z_2 = Z_v + Z_t = 0,492 + j0,367 + j0,046 + j1,454 = 0,54 + j1,82 \Omega \quad (5.2.2-14)$$

$$R = \frac{1}{\omega * C * 100} = \frac{1}{2\pi f * 2,7E^{-5}} = 117,9 \Omega \quad (5.2.2-15)$$

$$Z_{t0R} = Z_{t0} + R = 0,046 + 117,9 + j1,454 = 117,94 + j1,454 \Omega \quad (5.2.2-16)$$

$$Z_{CRt0} = \frac{Z_{t0R} * 2Z_{cg}}{Z_{t0R} + 2Z_{cg}} = \frac{(117,94 + j1,45) * (2,36 - j235,8)}{(117,94 + j1,45) + (2,36 - j235,8)} = 95 - j46,1 \Omega \quad (5.2.2-17)$$

$$Z_{CRtV0} = Z_{v0} + 2Z_{cg} = 3 * (0,5 + j0,36) + (2,36 - j235,8) = 96,4 - j45 \Omega \quad (5.2.2-18)$$

$$Z_0 = \frac{Z_{CRtV0} * 2Z_{cg}}{Z_{CRtV0} + 2Z_{cg}} = \frac{(96,4 - j45) * (2,36 - j235,8)}{(96,4 - j45) + (2,36 - j235,8)} = 60,8 - j58,4 \Omega \quad (5.2.2-19)$$

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 + R_p = 2 * (0,54 + j1,82) + (60,8 - j58,4) + 100 \quad (5.2.2-20)$$

$$Z = 161,9 - j54,75 \Omega$$

Poruchový proud spočítám z Ohmova zákona:

$$I_p = \frac{U_f}{Z} = \frac{12701,71}{161,9 - j54,75} = 70,4 + j23,8 \text{ A} \quad (5.2.2-21)$$

Napětí v jednotlivých složkách spočítám pomocí vyznačených smyček

$$U_1 = U_f - I_p * Z_1 = 12701,71 - (70,4 + j23,8) * (0,54 + j1,82) \quad (5.2.2-22)$$

$$U_1 = 12707,18 - j141,1 \text{ V}$$

$$U_2 = -I_p * Z_2 = -(70,4 + j23,8) * (0,54 + j1,82) \quad (5.2.2-23)$$

$$U_2 = 5,47 - j141,1 \text{ V}$$

$$U_0 = -I_p * Z_0 = -(70,4 + j23,8) * (1,476 - j1,1) \quad (5.2.2-24)$$

$$U_0 = -5672,24 + j2662,9 \text{ V}$$

Spočítaný poruchový proud a napětí ve fázích mohu opět převést pomocí Fortescue matice, při které platí: $\bar{I} = \bar{F} * \bar{I}_s$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2.2-25)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 70,4 + j23,8 \\ 70,4 + j23,8 \\ 70,4 + j23,8 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 221,2 + j71,4 \\ -3,55 * 10^{-15} \\ -3,55 * 10^{-15} \end{bmatrix} \text{ A}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |223| \\ |-3,55 * 10^{-15}| \\ |-3,55 * 10^{-15}| \end{bmatrix} \text{ A}$$

Napětí ve fázích získám stejným způsobem

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2.2-26)$$

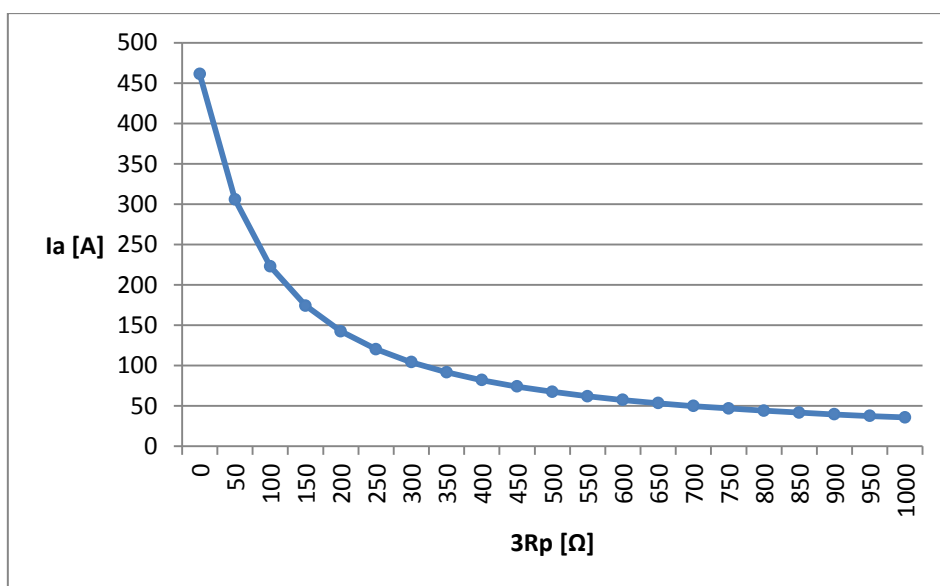
$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12707,18 - j141,1 \\ 5,47 - j141,1 \\ -5672,24 + j2662,9 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7040,4 + j2380,8 \\ -12028,56 - j8196 \\ -12028,56 - j13804 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |7432,1| \\ |14555,4| \\ |18309,5| \end{bmatrix} \text{ V}$$

Pro kabel AEXEKCEY s kapacitami proti zemi $0,27 \mu\text{F}$ a o délce 100 km by se měl využít odporník o odporu minimálně $117,9 \Omega$. Za těchto podmínek a při odporu poruchy 100Ω postiženou fází teče při jednofázovém zemním spojení proud 223 A . Napětí v postižené fázi stoupl z téměř nulové hodnoty na $7432,1 \text{ V}$, napětí ve zdravých fázích klesla ze sdružených hodnot 22 kV na hodnoty $U_b=14555,4 \text{ V}$ a $U_c=18309,5 \text{ V}$.

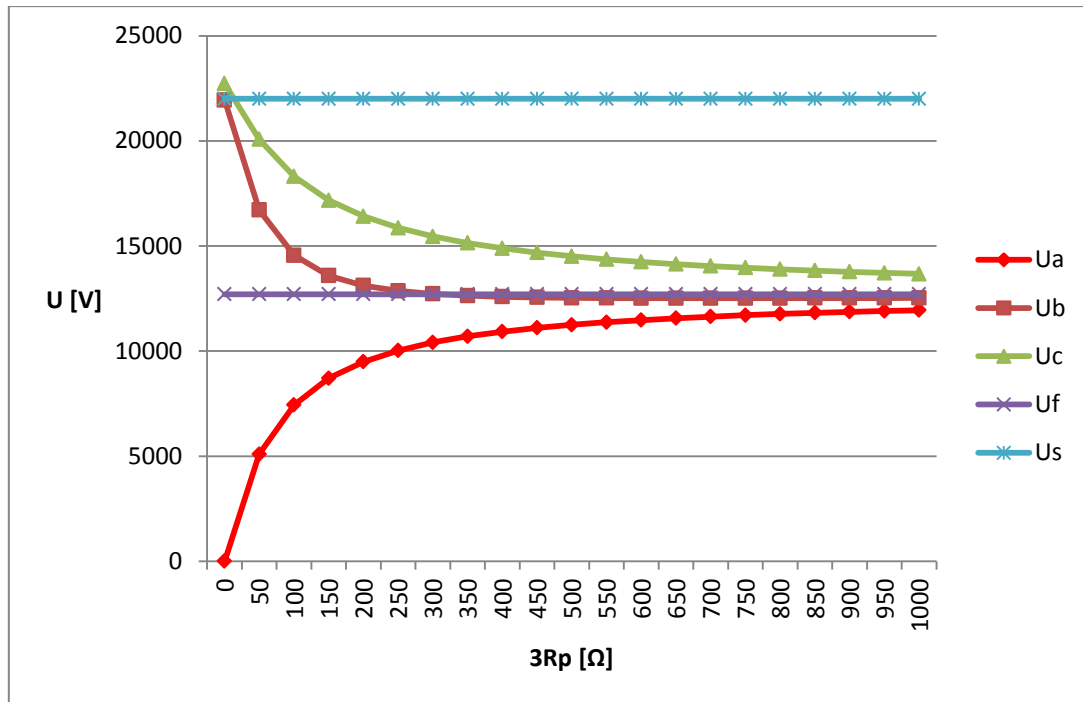
5.2.3 Grafické výstupy

Následující graf zobrazuje pokles proudu v porušené fázi při vzrůstajícím odporu poruchy. Největší pokles proudu je mezi $0-100 \Omega$.



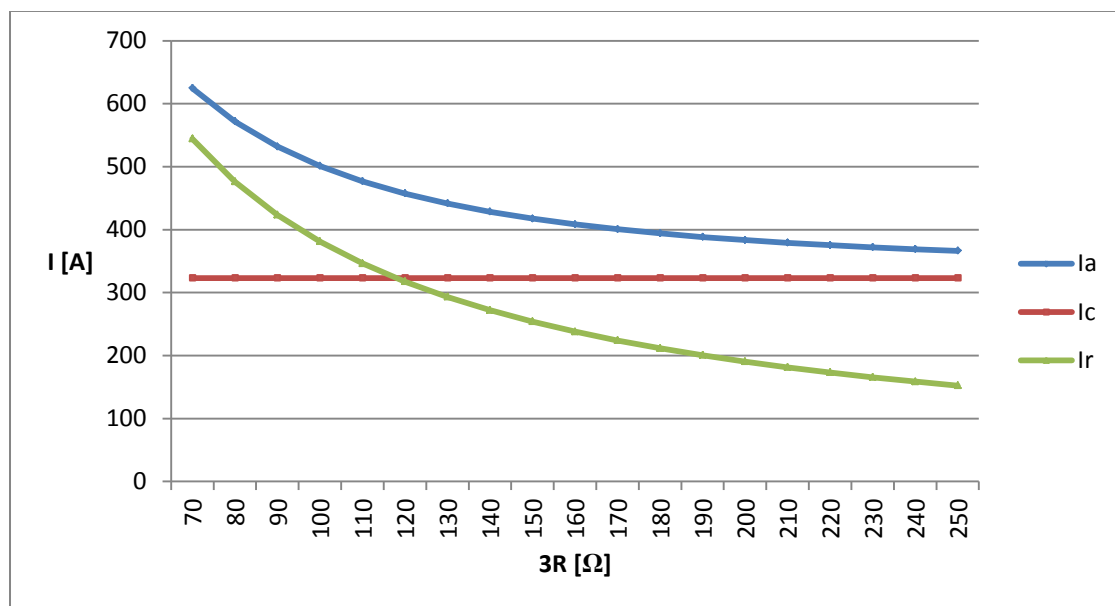
Graf 5.2.3-1: Závislost poruchového proudu na odporu poruchy

Změny napětí ve fázích na poruchovém proudu jsou podobné jako v izolované síti. Zde se pohybují na hladině 22 kV, takže hodnoty jsou pochopitelně vyšší.



Graf 5.2.3-2: Závislost napětí na odporu poruchy

Graf 5.2.3-3 popisuje chování poruchového proudu při změně hodnoty uzemňujícího odporu. Vzrůst uzemňujícího odporu má největší vliv na poruchový proud mezi 0-30 Ω . V optimálním stavu se obvod při zemním spojení nachází při odporu uzemnění $3R=95 \Omega$, kdy teče odporníkem proud $I_r=400 \text{ A}$ a proud kapacitami $I_c=323 \text{ A}$.



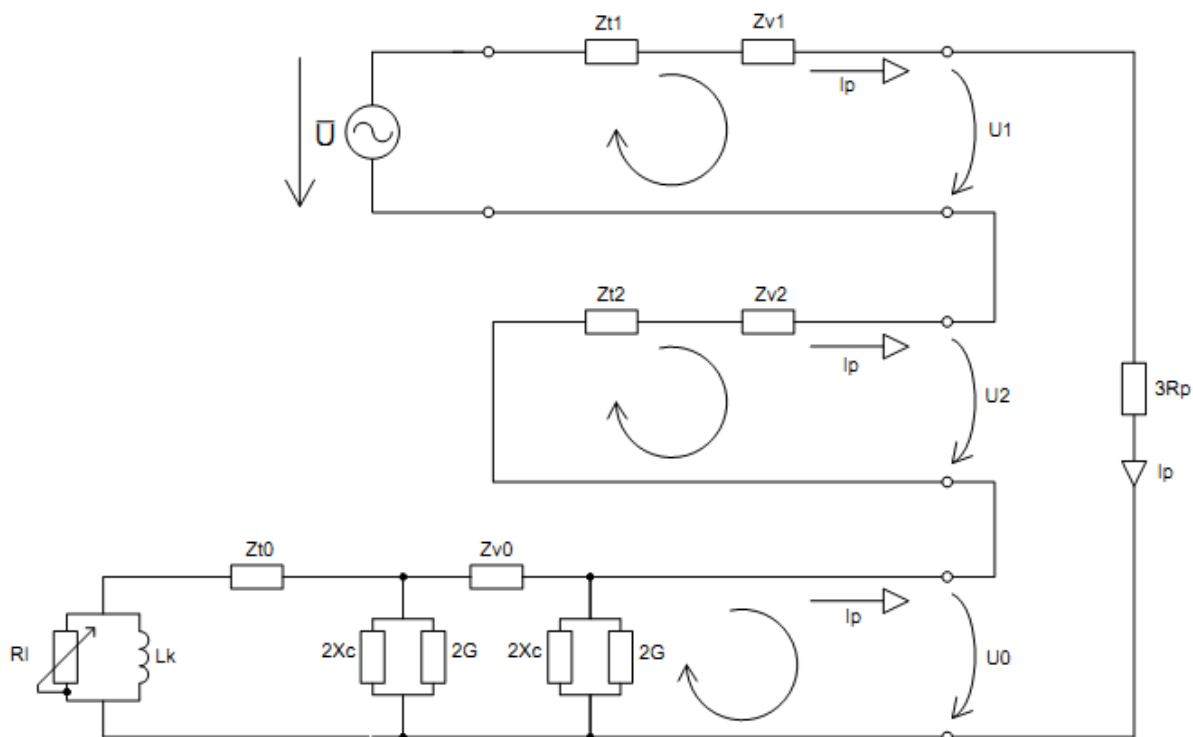
Graf 5.2.3-3: Závislost proudu na odporu uzemnění

5.3 Kompenzovaná síť

Jak je vidět na obrázku 5.3.1-1, jedná se v podstatě o stejný obvod jako u odporově uzemněné sítě. Zde však v místě uzemnění použijí místo činného odporu reaktanci induktivního charakteru, která by měla vyvážit složku reaktance kapacit proti zemi venkovního vedení. V takto vykompenzovaném obvodu předpokládám téměř nulovou hodnotu poruchového proudu.

5.3.1 Parametry sítě

Síť, nacházející se na hladině 22 kV, je uzemněná Petersenovou tlumivkou a používá stejné kabelové vedení jak síť odporová. Délka vedení je 100 km, jeho odpor $R=0,164 \Omega/\text{km}$ a reaktance $X=0,123 \Omega/\text{km}$. Kapacity proti zemi $C=0,27\mu\text{F}$. Transformátor použijí stejný, jako v předchozích příkladech. Do místa uzemnění vložím kompenzační tlumivku adekvátně ke kapacitám vedení proti zemi, její velikost určím ve výpočtové části. Změnou šířky vzduchové mezery v kompenzační tlumivce mohu libovolně tlumivku rozlaďovat.



Obrázek 5.3.1-1: Náhradní složkové schéma pro izolovanou síť

5.3.2 Výpočty

Obvod zjednoduším postupným skládáním odporů, určím si impedanci tlumivky a ladícího odporu v bodě uzemnění. Ostatní impedance určuji podobně jako v předchozích příkladech. Také si určím indukčnost tlumivky.

Impedance transformátoru:

$$Z_{t1} = Z_{t2} = Z_{t0} = \frac{u_k}{100} * \frac{U_t^2}{S_t} \quad (5.3.2-1)$$

$$Z_t = \frac{11}{100} * \frac{23^2}{40} = 1,45475 \Omega$$

$$R_t = \frac{P_k}{S_t} * \frac{U_t}{S_t} = \frac{0,140 * 23^2}{40^2} = 0,046 \Omega \quad (5.3.2-2)$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} = \sqrt{1,45475^2 - 0,046^2} = 1,454 \Omega \quad (5.3.2-3)$$

$$Z_t = R + jX = 0,046 + j1,454 \Omega \quad (5.3.2-4)$$

Impedance vedení:

$$Z_{v1} = Z_{v2} = \frac{Z_{v0}}{3} \quad (5.3.2-5)$$

$$R_v = R * l = 0,164 * 3 = 0,492 \Omega \quad (5.3.2-6)$$

$$X_v = X * l = 0,1225 * 3 = 0,367 \Omega \quad (5.3.2-7)$$

$$Z_v = R_v + jX_v = 0,492 + j0,367 \Omega \quad (5.3.2-8)$$

Kapacity a kapacitní impedance proti zemi a svod:

$$X_c = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{2\pi f 2,7^{-7} * 100} = -j117,88 \Omega \quad (5.3.2-9)$$

$$R_G = |X_c| * 100 = 117,88 * 100 = 11788 \Omega \quad (5.3.2-10)$$

$$Z_{cg} = \frac{X_c * R_G}{X_c + R_G} = 1,18 - j117,9 \Omega \quad (5.3.2-11)$$

$$2Z_{cg} = 2 * (1,18 - j117,9) = 2,36 - j235,8 \Omega \quad (5.3.2-12)$$

Impedance kompenzační tlumivky:

$$L = \frac{1}{\omega^2 * C} = \frac{1}{(2\pi f)^2 * (2,7 * 10^{-7})} = 0,375 \text{ H} \quad (5.3.2-13)$$

$$X_L = \omega * L = 2\pi f * 0,375 = j117,9 \Omega \quad (5.3.2-14)$$

Nyní spočítám celkovou impedanci:

$$Z_1 = Z_2 = Z_v + Z_t = 0,492 + j0,367 + j0,046 + j1,454 = 0,54 + j1,82 \Omega \quad (5.3.2-15)$$

$$Z_{t0L} = Z_{t0} + X_L = 0,046 + j1,454 + j117,9 = 0,046 + j119 \Omega \quad (5.3.2-16)$$

$$Z_{CLt0} = \frac{Z_{t0L} * 2Z_{cg}}{Z_{t0L} + 2Z_{cg}} = \frac{(0,046 + j119) * (2,36 - j235,8)}{(0,046 + j119) + (2,36 - j235,8)} = 2,7 + j241,6 \Omega \quad (5.3.2-17)$$

$$Z_{CLt0V} = Z_{v0} + Z_{CLt0} = 3 * (0,492 + j0,367) + (2,7 + j241,6) = 4,14 + j242,75 \Omega \quad (5.3.2-18)$$

$$Z_0 = \frac{Z_{CLt0V} * 2Z_{cg}}{Z_{CLt0V} + 2Z_{cg}} = \frac{(4,14 + j242,75) * (2,36 - j235,8)}{(4,14 + j242,75) + (2,36 - j235,8)} = 4055,4 - j4420,4 \Omega \quad (5.3.2-19)$$

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 + R_p = 2 * (25,3 + j30) + (4055,4 - j4420,4) + 100 \quad (5.3.2-20)$$

$$Z = 4156,46 - j4416,8 \Omega$$

Poruchový proud spočítám pomocí fázového napětí a celkové impedance:

$$I_p = \frac{U_f}{Z} = \frac{12701,71}{4156,46 - j4416,8} = 1,43 + j1,52 \text{ A} \quad (5.3.2-21)$$

V náhradním schématu si jako vždy vytvořím napěťové smyčky:

$$U_1 = U_f - I_p * Z_1 = 12701,71 - (1,43 + j1,52) * (0,54 + j1,82) \quad (5.3.2-22)$$

$$U_1 = 12703,7 - j3,43 \text{ V}$$

$$U_2 = -I_p * Z_2 = -(1,43 + j1,52) * (0,54 + j1,82) \quad (5.3.2-23)$$

$$U_2 = 2 - j3,43 \text{ V}$$

$$U_0 = -I_p * Z_0 = -(1,43 + j1,52) * (4055,4 - j4420,4) \quad (5.3.2-24)$$

$$U_0 = -12562,19 + j159,4 \text{ V}$$

Jako v předchozích příkladech, i zde převádím složkové veličiny na reálné za pomoci

Fortescue matice, při které platí: $\bar{I} = \bar{F} * \bar{I}_s$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3.2-25)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,43 + j1,52 \\ 1,43 + j1,52 \\ 1,43 + j1,52 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,3 + j4,57 \\ -4,3 * 10^{-15} \\ -4,3 * 10^{-15} \end{bmatrix} \text{ A}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |6,3| \\ |-4,3 * 10^{-15}| \\ |-4,3 * 10^{-15}| \end{bmatrix} \text{ A}$$

Napětí ve fázích získám stejným způsobem

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3.2-26)$$

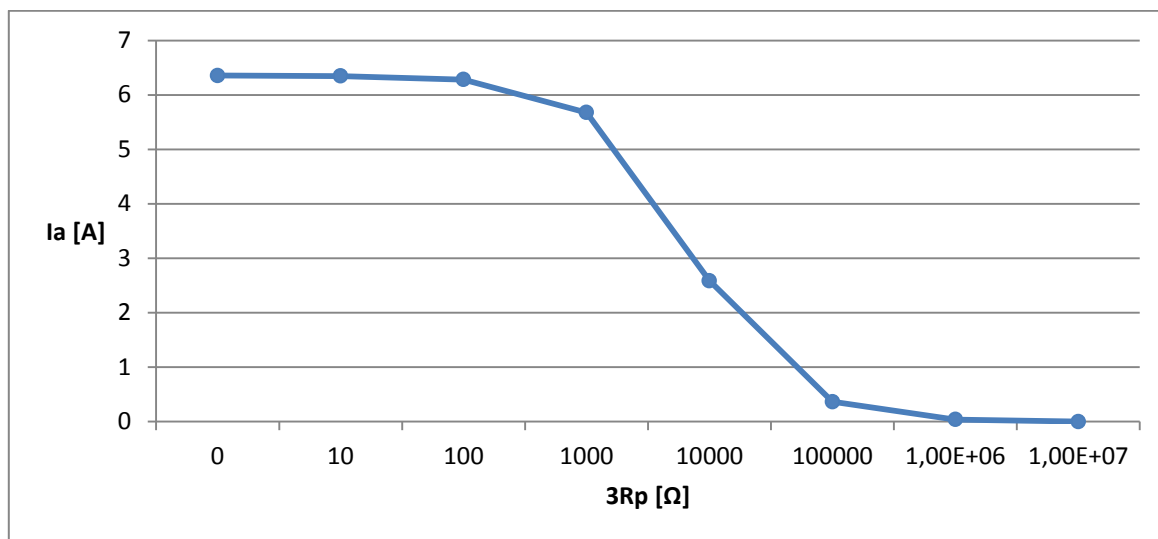
$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12703,7 - j3,43 \\ 2 - j3,43 \\ -12562,19 + j159,4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 143,5 + j152,5 \\ -18915,05 - j10837,18 \\ -18915,05 + j11162,82 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |209,42| \\ |21799,6| \\ |21963,3| \end{bmatrix} \text{ V}$$

V síti jsem použil stejný transformátor i stejné vedení AEXEKCEY jako v předchozím příkladu. Jediný rozdíl byl v podstatě jen v uzemnění sítě. Zde jsem použil tlumivku s velikostí impedance rovnou impedanci kapacit proti zemi. Proti kapacitní impedanci je impedance tlumivky pootočená o π . Velikost proudu v postižené fázi $I_a=6,3\text{A}$. Kvůli nenulovému odporu poruchy vzrostlo napětí postižené fáze na $U_a=209,42\text{ V}$ a napětí zdravých fází lehce klesla na $U_b=21799,6\text{ V}$ a $U_c=21963,3\text{ V}$. Napětí v uzlu U_0 mírně kleslo z fázové hodnoty (12701,1 V) na 12563,2 V.

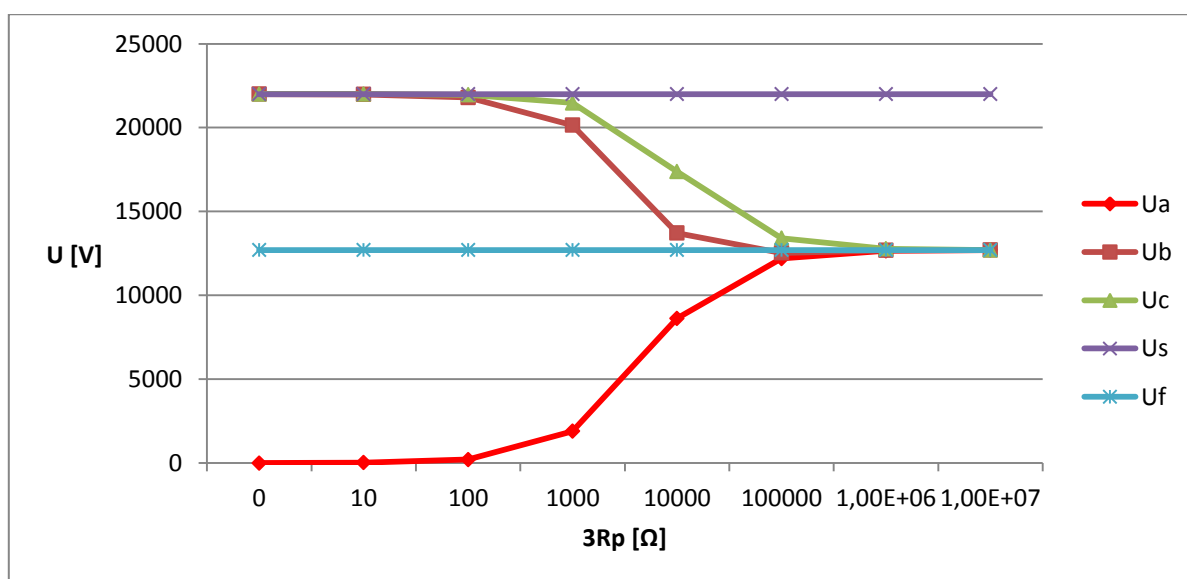
5.3.3 Grafické výstupy

V kompenzované síti jsem zvolil logaritmické rozpětí vodorovné osy, největší změny napětí a proudů v síti jsem zaznamenal v rozpětí stovek ohmů až stovek kilo ohmů. Na grafu 5.3.3-1 je vidět velikost poruchového proudu. Dosahuje pouze několik jednotek ampér.



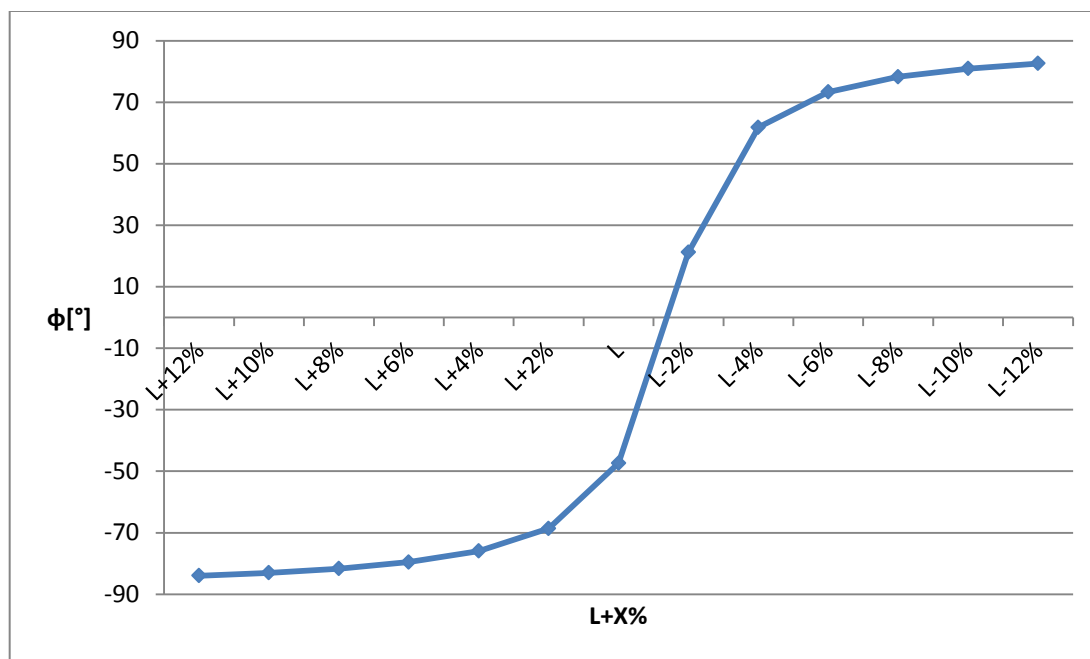
Graf 5.3.3-1: Závislost poruchového proudu na odporu poruchy

V grafu 5.3.3-2 jsou zobrazeny průběhy napětí ve v jednotlivých fázích. Napětí v porušené fázi U_a a napětí ve fázích zdravých U_b a U_c dosáhnou fázové hodnoty až v páté dekádě poruchového proudu.



Graf 5.3.3-2: Závislost napětí na odporu poruchy

Ve výpočtové části jsem vypočítal vhodnou indukčnost tlumivky tak, aby adekvátně kompenzovala kapacitní proudy při zemním spojení. Změnou naladění tlumivky v rozmezí $\pm 12\%$ se mění difference argumentů napětí v nulové složce a poruchového proudu. Graf 5.3.3-3 zobrazuje závislost rozdílů úhlů mezi napětím uzlu a poruchovým proudem na rozladění tlumivky v rozsahu $\pm 12\%$. Přeladění tlumivky o 12% poruchový proud předbíhá napětí uzlu o 84° , podladění o 12% napětí uzlu předbíhá poruchový proud o $82,6^\circ$.



Graf 5.3.3-3: Rozdíl fázového posunu uzlového napětí U_0 a proudu v postižené fázi I_a v závislosti na rozladění indukčnosti tlumivky

6 Závěr

Provedl jsem výpočty jednofázových zemních poruch na všech typech sítí, které se v současné době v České republice provozují na hladině vysokého napětí. U sítí nepřímo uzemněných jsem se snažil parametry všech prvků sítě co nejvíce k sobě přiblížit, abych měl možnost kvalitního porovnání výsledků těchto dvou nejpoužívanějších sítí. Zároveň však vycházím z reálných parametrů prvků sítě, které se v praxi skutečně používají. Výsledky mých výpočtů zahrnují široké spektrum poruchového odporu, pro modelový výpočet v této práci jsem pro všechny typy sítí zvolil odpor poruchy ve složkové soustavě o velikosti 100Ω . Výsledné výpočty a grafické výstupy jsou uvedeny v páté kapitole. Tabulky, obsahující všechny ostatní hodnoty výpočtů, jsou obsaženy v přílohách.

Obecné výpočty v izolované soustavě jsem uvedl v kapitole 4.3.1, kapitola 5.1 znázorňuje modelový příklad výpočtu sítě při zemní poruše pomocí metody souměrných složek. Při výpočtech jsem umístil izolovanou síť na hladinu 6 kV a použil jsem se kabelové vedení 2XSEYFGbY s hodnotou kapacit proti zemi $0,55 \mu\text{F}/\text{km}$. Za těchto podmínek mé výpočty ukazují, že při zemním spojení se hodnota poruchového proudu vyšplhá na téměř 10A, což je podle normy horní povolená hranice. Při kovovém zemním spojení jsou napětí ve zdravých fázích na sdružené hodnotě a napětí postižené fáze je téměř nulové. Při odporu poruchy $3R=10 \text{ k}\Omega$, se všechna napětí dosti přiblížila k fázové hodnotě. Vlivem přepětí v izolované síti dochází k opalování kontaktů vypínačů a transformátorů a k průrazu izolace přístrojů napájených izolovanou sítí. Navíc dochází k ferorezonančním jevům. Je tedy pochopitelné, proč se od instalace nových izolovaných soustav upouští.

Výpočty v odporově uzemněné síti jsem provedl v kapitolách 4.3.2.2 a 5.2. Na hladině 22 kV a při použití kabelů s kapacitou $0,27 \mu\text{F}$ vzniká při zemní poruše kapacitní proud o velikosti 323 A. Je tedy potřeba, aby uzemňovacím odporníkem tekla proud 400 A. Vhodná velikost odporu odporníku v této síti je tedy $31,75 \Omega$. Za těchto podmínek a při nulovém odporu poruchy dosahuje poruchový proud hodnoty 515,6 A. Mluvíme zde o jednofázovém zkratu, při kterém je vhodně zvolený uzlový rezistor schopný zmenšovat zkratový proud a tlumit přepětí. Pokud bych v této síti použil téměř nulový uzemňovací odpor, chovala by se jako účinně uzemněná síť a místem poruchy by tekla zkratový proud o velikosti 5,6 kA. Odporově uzemněná soustava se již v České republice také používá méně, ačkoliv při vysokých kapacitách sítě by se s ohledem na investiční náklady spojené s náročnou kompenzací jeho použití mohlo jevit jako vhodnější řešení.

Pro kompenzovanou síť jsem zvolil kabelové vedení stejných parametrů jako u sítě odporové. Přestože literatury uvádějí, že kompenzovaná síť se používá pro venkovní vedení, kde jsou hodnoty kapacit proti zemi o jeden až dva řády nižší, v praxi se také používají tlumivky, které kompenzují kapacitní proudy kabelového vedení. Spočítal jsem, že kapacitou proti zemi $27 \mu\text{F}$ teče při zemním spojení proud o velikosti 323 A . Vhodná indukčnost tlumivky, kterou teče stejně velký a opačně orientovaný indukční proud, je 125 mH . Při odporu poruchy 100Ω je po vykompenzování zbytkový poruchový proud roven $6,28 \text{ A}$, což je hodnota zhruba 42 krát nižší, než v síti odporové. V místě tlumivky se vyskytují činné svodové odpory, impedance transformátoru, vedení a dalších prvků, které se paralelně a sériově přičítají k reaktancím kapacity a tlumivky a tím jejich velikost od sebe odchyľují. Zbytkový proud také zvyšuje použití kabelu. Pokud by se však kabelové vedení vyměnilo za venkovní, zbytkový proud by dosahoval hodnot několika setin ampéru. Při možnosti ladění indukčnosti tlumivky lze ještě hodnotu zbytkového proudu ještě snížit. Napětí jednotlivých fází se přibližují fázovým hodnotám až při odporu poruchy v řádu desítek megaohmů.

Všechny typy uzemnění by samozřejmě našly své uplatnění v závislosti na požadavcích a nárocích na bezpečnost provozu s ohledem na investiční náklady. Distribuční sítě se v České republice provozují uzemnění uzlu transformátorů nejčastěji s Petersenovou tlumivkou v kombinaci s krátkodobě připínaným odporníkem. Tato kombinace zajistí omezení poruchového proudu, aktivaci zemních ochranných zařízení a zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie. Při minimálním poruchovém proudu je navíc snazší provedení ochranného uzemnění proti dotykovému napětí. Instalace kompenzovaných sítí je však nákladná, takže při nižších nárocích na spolehlivost dodávky u kabelových sítí je vhodnější uchýlit se například k soustavám uzemněných odporem.

Teoretické předpoklady, ze kterých jsem v mojí práci vycházel, byly ověřeny na mých obecných a modelových výpočtech. Výsledné kalkulace a grafické výstupy z nich vycházející, popisují, co se v dané síti děje při zemní poruše. Tato diplomová práce nejen rozšířila mé znalosti v oblasti elektroenergetiky a analýzy rozvodných sítí, ale také zvýšila můj zájem o tuto problematiku.

Použitá literatura

1. MERTLOVÁ, Jiřina; HEJTMÁNKOVÁ, Pavla; TAJTL, Tomáš. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. 189 s.
2. TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
3. SCHEJBAL, Konstantin a Jiřina MERTLOVÁ. *Elektroenergetika II*. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity, 1998, 2 s. ISBN 80-7082-451-42.
4. UHLÍK, Petr. *Elektroenergetika*. [s. l.], 2005. 78 s. Skripta. SPS Pisek.
5. FEJT, Z. a J. ČERMÁK. *Elektroenergetika*. Praha: ČVUT, 1985.
6. ČSN EN 50160 ed. 2. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. Praha, 2008.
7. ČSN 33 3070: Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí, ÚNM, Praha 19821
8. PERNICA, Ing. Drahomír. *Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení*. Brno, 2011. Dizertační práce. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
9. PECHOLT, Milan. *Provoz uzlu distribučních sítí*. Plzeň, 2008. 55 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
10. BAZATA, Petr. *Generování transientního signálu pro účely testování ochran a indikátorů poruch*. Brno, 2011. 87 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
11. PÍSAŘOVIC, Antonín. *Výpočet charakteristických veličin při zemním spojení v síti vn*. Brno, 2010. 42 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické.
12. [Http://cs.wikipedia.org](http://cs.wikipedia.org) [online]. 2006 [cit. 2011-12-03]. Přenosová soustava. WWW:<http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99enosov%C3%A1_soustava>.
13. [Http://www.pre.cz](http://www.pre.cz) [online]. 2009 [cit. 2011-12-03]. Přenosová soustava v ČR a její začlenění v EU. Dostupné z WWW: <<http://www.pre.cz/velkoodberatele/pre-aktualne/prenosova-soustava-v-cr-a-jeji-zacleneni-v-eu.html>>.
14. [Www.cezdistribuce.cz/cs/technicke-informace.html](http://www.cezdistribuce.cz/cs/technicke-informace.html) [online]. 2010 [cit. 2011-12-11]. ČEZ distribuce. Dostupné z WWW: <www.cezdistribuce.cz>.
15. [Www.eon-distribuce.cz/cs/distribuce-elektřiny/distribucni-soustava/technicke-informace.shtml](http://www.eon-distribuce.cz/cs/distribuce-elektřiny/distribucni-soustava/technicke-informace.shtml) [online]. 2010 [cit. 2011-12-11]. E-ON distribuce. Dostupné z WWW: <www.eon-distribuce.cz/>.
16. [Www.predistribuce.cz/distribuce/distribucni-sit/technicke-informace.html](http://www.predistribuce.cz/distribuce/distribucni-sit/technicke-informace.html) [online]. 2010 [cit. 2011-12-11]. PREDistribuce. Dostupné z WWW: <www.predistribuce.cz>.
17. [Www.elektrorevue.cz/clanky/04011/index.html](http://www.elektrorevue.cz/clanky/04011/index.html) [online]. 2010 [cit. 2011-12-11]. Dostupné z WWW: <www.elektrorevue.cz>.
18. [Www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/4-4.htm](http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/4-4.htm) [online]. 2010 [cit. 2011-12-11]. Dostupné z WWW: <www.cez.cz>.

Izolovaná soustava

3Rp [Ω]	I_p [A]	I_a [A]	I_{cap} [A]	U_a [V]	U_b [V]	U_c [V]	U_f [V]	U_s [V]	U_o [V]
0	0,000352435127644273+3,00109137582668i	9,00327419	9	1,81899E-12	6001,175	6001,627	3464,102	6000	3465,18
100	0,258404424547021+2,9786744502925i	8,969585773	9	298,9861924	5834,953	6134,178	3464,102	6000	3452,214
250	0,621173849701148+2,86648145821954i	8,799042909	9	733,2535758	5534,909	6264,492	3464,102	6000	3386,576
500	1,09480010180919+2,52672803192986i	8,261142554	9	1376,857092	4963,322	6309,246	3464,102	6000	3179,548
1000	1,48526084240035+1,71417542014779i	6,804379051	9	2268,12635	3927,663	6000,779	3464,102	6000	2618,869
2000	1,29923026411601+0,749787329083494i	4,500180314	9	3000,12021	2999,654	5196,401	3464,102	6000	1732,029
3000	1,00576757394777+0,386961849701649i	3,232919884	9	3232,919884	2850,924	4697,404	3464,102	6000	1244,286
4000	0,799429859712544+0,230683777915665i	2,496142615	9	3328,190153	2882,16	4402,869	3464,102	6000	960,7154
5000	0,657749005007591+0,151841267289118i	2,025143382	9	3375,238969	2942,38	4215,757	3464,102	6000	779,4372
6000	0,556733396375292+0,107102007204092i	1,700825162	9	3401,650324	2999,918	4088,355	3464,102	6000	654,6136
8000	0,424175109144888+0,0612011006687637i	1,285702486	9	3428,539962	3090,416	3927,955	3464,102	6000	494,8412
10000	0,341850892096507+0,0394586505602351i	1,032361932	9	3441,206439	3153,902	3832,025	3464,102	6000	397,3355

Odporově uzemněná soustava

3Rp [Ω]	I_p [A]	I_a [A]	U_a [V]	U_b [V]	U_c [V]	U_f [V]	U_s [V]	U_0 [V]
0	115,133578395176+101,834035962728i	461,1217	2,17285E-11	21941,47052	22723,28185	12701,71	22000	12959,56
50	91,5873648209261+44,810552743608i	305,8857	5098,095486	16712,58035	20077,33976	12701,71	22000	8596,742
100	70,4040899735041+23,8080196819483i	222,9619	7432,064105	14555,44214	18309,46193	12701,71	22000	6266,216
150	56,1915601649208+14,5181405864771i	174,1103	8705,517009	13591,67028	17178,35783	12701,71	22000	4893,27
200	46,4681065052889+9,71380756038815i	142,4176	9494,509949	13116,05889	16412,67496	12701,71	22000	4002,566
250	39,5066836673739+6,93465154274302i	120,3321	10027,67248	12861,96699	15865,16373	12701,71	22000	3381,863
300	34,3122369202525+5,19074238989085i	104,1079	10410,7928	12718,09868	15455,96917	12701,71	22000	2925,893
350	30,3017007619918+4,02757767819556i	91,70458	10698,86771	12633,31173	15139,26802	12701,71	22000	2577,304
400	27,117974255623+3,2142358979146i	81,92339	10923,11926	12582,11458	14887,20995	12701,71	22000	2302,41
450	24,5323588706716+2,62374996811046i	74,0168	11102,51957	12550,92272	14681,99945	12701,71	22000	2080,199
500	22,3924309053071+2,18177677425954i	67,49541	11249,23455	12532,08931	14511,77461	12701,71	22000	1896,919
550	20,593034154128+1,84250151463497i	62,02589	11371,41284	12521,11128	14368,3418	12701,71	22000	1743,202
600	19,0594333974954+1,5764690745363i	57,37356	11474,71186	12515,23594	14245,86751	12701,71	22000	1612,451
650	17,7371333763161+1,36405596856222i	53,36852	11563,17936	12512,72748	14140,08978	12701,71	22000	1499,891
700	16,585502232988+1,19178610688197i	49,8848	11639,78637	12512,46256	14047,82446	12701,71	22000	1401,983
750	15,5736490729905+1,05015990239694i	46,82705	11706,76202	12513,69829	13966,646	12701,71	22000	1316,047
800	14,6776828494826+0,932326740275058i	44,12179	11765,811	12515,93455	13894,67494	12701,71	22000	1240,017
850	13,8788436665865+0,833246561614491i	41,7115	11818,25894	12518,82966	13830,43277	12701,71	22000	1172,278
900	13,1622001813876+0,749145155578235i	39,55051	11865,15204	12522,14751	13772,74075	12701,71	22000	1111,544
950	12,5157233515992+0,677151304319173i	37,60208	11907,32687	12525,72345	13720,64772	12701,71	22000	1056,785
1000	11,9296158967708+0,615049622903481i	35,83638	11945,46029	12529,44205	13673,37785	12701,71	22000	1007,161

Odporově uzemněná soustava

3R [Ω]	I _r [A]	I _a [A]	I _c [A]
70	544,3588	624,6584	323,219
80	476,314	571,7981	323,219
90	423,3902	531,9312	323,219
100	381,0512	501,1212	323,219
110	346,4102	476,8295	323,219
120	317,5426	457,3529	323,219
130	293,1163	441,5108	323,219
140	272,1794	428,463	323,219
150	254,0341	417,5976	323,219
160	238,157	408,4605	323,219
170	224,1478	400,7092	323,219
180	211,6951	394,081	323,219
190	200,5533	388,3723	323,219
200	190,5256	383,423	323,219
210	181,4529	379,1061	323,219
220	173,2051	375,3199	323,219
230	165,6744	371,9821	323,219
240	158,7713	369,0254	323,219
250	152,4205	366,3949	323,219

Soustava uzemněná pomocí tlumivky

3Rp [Ω]	Ip [A]	Ia [A]	Ua [V]	Ub [V]	Uc [V]	Uf [V]	Us [V]	Uo [V]
0	1,43269655844976+1,55996109176033i	6,354123	3,63E-11	22000,21	22010,55	12701,71	22000	12705,85
10	946,813737838517-3206,28102603679i	6,346959	21,15653	21980,01	22005,92	12701,71	22000	12691,52
100	1,4352386122701+1,52513138536781i	6,282788	209,4263	21799,63	21963,33	12701,71	22000	12563,2
1000	1,42483533449164+1,24458599348049i	5,675593	1891,864	20146,27	21472,43	12701,71	22000	11349,04
10000	0,822420376372488+0,258419255039102i	2,586195	8620,648	13711,25	17375,81	12701,71	22000	5171,413
100000	0,121845990143296+0,0051718895531517i	0,365867	12195,57	12531,63	13409,99	12701,71	22000	731,5962
1000000	0,0126501452939894+0,0000556473435825836i	0,037951	12650,27	12679,43	12775,74	12701,71	22000	75,88728
10000000	0,000127011906783043+5,60962563481701E-09i	0,000381	12701,19	12701,48	12702,45	12701,71	22000	0,761928
1E+08	0,0000127016543981339+5,61003524575744E-11i	3,81E-05	12701,65	12701,68	12701,78	12701,71	22000	0,076196
1E+09	1,27017007697715E-06+5,61007620834388E-13i	3,81E-06	12701,7	12701,7	12701,71	12701,71	22000	0,00762

Soustava uzemněná pomocí tlumivky

3L [H]	L+X%	φ [°]	IL [A]	Ic [A]	Ia [A]	U ₀ [V]
0,420295	L+12%	-83,9962	96,19614	107,7397	3,97835744654997+38,3653821903231i	-12746,8686574046+18,5990006605095i
0,41279	L+10%	-83,0329	97,94517	107,7397	4,01721942066603+33,237510573087i	-12740,6274934282+16,8060146548746i
0,405285	L+8%	-81,6592	99,75897	107,7397	4,06116339960384+27,9288032571387i	-12734,164901302+14,9543057698179i
0,397779	L+6%	-79,5559	101,6412	107,7397	4,11066650967426+22,4295269691433i	-12727,4688898494+13,0409605548316i
0,390274	L+4%	-75,9657	103,5958	107,7397	4,1662559023377+16,729237487447i	-12720,5265865762+11,0628711795589i
0,382769	L+2%	-68,6076	105,6271	107,7397	4,22851484566548+10,8167135535186i	-12713,3241552268+9,01671911471567i
0,375264	L	-47,404	107,7397	107,7397	4,29808967534928+4,67988327528099i	-12705,8467039157+6,89895716257706i
0,367758	L-2%	21,1875	109,9385	107,7397	4,37569774449996-1,69425799154596i	-12698,0781825503+4,70578964211199i
0,360253	L-4%	61,80493	112,2288	107,7397	4,4621365371141-8,31973945734966i	-12690,0012680633+2,43315050806268i
0,352748	L-6%	73,31915	114,6167	107,7397	4,558294141044-15,2117177692377i	-12681,5972357293+0,076679153157329i
0,345243	L-8%	78,23926	117,1084	107,7397	4,66516131381486-22,3865925227354i	-12672,8458145596-2,36830639154459i
0,337737	L-10%	80,92088	119,7108	107,7397	4,78384542023901-29,8621362635408i	-12663,7250244275-4,90683918327363i
0,330232	L-12%	82,59719	122,4315	107,7397	4,91558657644824-37,6576411439553i	-12654,2109921778-7,54433639139961i