

Zemní spojení v trojfázových soustavách

1. Úvod

Sítě vysokého napětí obvykle nemají přímo uzemněný uzel. Tyto sítě hustě protínají území venkova, městská centra i okraje měst s průmyslovými závody a jsou ve značné míře vystaveny buď atmosférickým vlivům, nebo cizím zásahům i četným přepětím. Tyto jevy značně ovlivňují jejich bezporuchový chod.

Jejich následkem vznikají časté izolační vady jednotlivých fází především proti zemi – tzv. **zemní spojení**. Zásadní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je v tom, že zkratový proud je většinou několikanásobně větší než proud provozní (nebo je blízký provoznímu proudu) a má indukční charakter, kdežto v místě zemního spojení prochází pouze malý poruchový proud kapacitního charakteru.

V sítích s větší rozlohou, kde poruchový proud přesáhne hodnotu asi 5 A, vzniká při zemních spojeních zpravidla oblouk, který se rozroste do značných délek, bývá velice pohyblivý a téměř vždy zasáhne sousední fáze. Důsledkem toho jsou pak dvoj- nebo troj-fázové zkraty. Hořící obloukové zemní spojení přepaluje vodiče a dřevěné stožáry a ničí izolátory.

Nebezpečným jevem jsou přepětí, která nastanou při nestabilním hoření oblouku (dochází k jeho hasnutí a opětovnému zapalování), zvláště při přerušovaném zemním spojení. Na zdravých fázích se mohou objevit napětí až $(4 - 4,5) U_f$, kde U_f je efektivní hodnota fázového napětí.

Aby bylo možné udržet provoz těchto sítí i při zemním spojení, provádí se kompenzace zemních proudů, která spočívá v různém způsobu spojení uzlu sítě se zemí.

U symetrických sítí bez poruch se spojení jejich uzlu se zemí prakticky neprojeví, rozdíly nastávají až při zemních poruchách nebo jiných nesymetrických stavech a přechodných jevech v těchto sítích. Především se týkají velikosti a charakteru proudů zemních poruch, napětí proti zemi, přepětí při zemních poruchách a provozních vlastností.

V soustavách vn v České republice jsou používány čtyři **způsoby spojení uzlu sítě se zemí**.

Malé sítě vn průmyslových závodů a vlastních spotřeb elektráren a tepláren jsou provozovány s izolovaným uzlem. U těchto sítí dochází k samočinnému odstranění důsledků přechodných poruch izolace jedné fáze proti zemi.

Převažujícím způsobem uzemnění uzlu v našich distribučních sítích vn je uzemnění uzlu přes zhášecí tlumivku. Výhodou tohoto zapojení je, že i rozsáhlejší sítě lze provozovat se zemním spojením po dobu potřebnou k nalezení poruchy, takže doba přerušení dodávky elektrické energie je velmi krátká. Navíc většina přechodných zemních spojení se zháší sama.

Rozšiřováním kabelových sítí se snižuje počet přechodných poruch. Ve většině případů dochází k přechodu trvalých zemních spojení ve zkraty. U těchto sítí pak zaniká výhoda provozu kompenzace zemních kapacitních proudů. S požadavkem rychlého vypínání všech zemních poruch se začalo prosazovat spojení uzlu přes rezistor. Uzlový rezistor omezuje proudy jednopólových poruch.

Spojení výhod provozu kompenzace zemních kapacitních proudů a provozu přes rezistor je provoz s krátkodobým přechodným uzemněním uzlu přes rezistor. Tento způsob provozu se používá v menším rozsahu u smíšených sítí. Jedná se vlastně o provoz s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde se při trvalé poruše krátkodobě připojí paralelně ke zhášecí tlumivce rezistor. Tím dojde ke zvětšení poruchového proudu a vytvoří se podmínky pro spolehlivý náběh ochrany postiženého vývodu. Nevýhodou jsou vysoké investiční náklady, neboť je nutno použít jak zhášecí tlumivku, tak i omezující rezistor a spínací přístroje.

Podle velikosti přechodového odporu v místě zemního spojení s rozlišují:

- odporová zemní spojení – hodnota přechodového odporu je řádově několik set Ω
- kovová a oblouková zemní spojení – hodnota přechodového odporu je jen několik Ω , zpravidla zanedbatelná

Podle doby trvání těchto stavů se rozlišují:

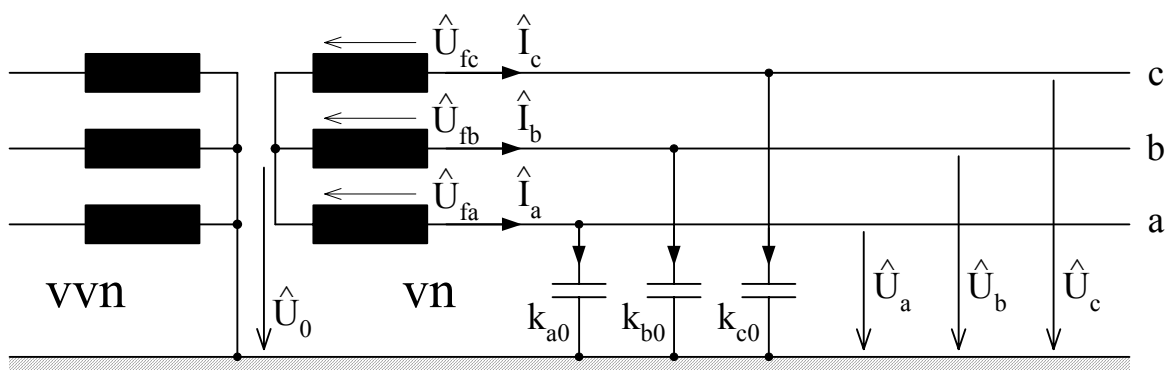
- mžiková zemní spojení – do 0,5 s
- krátkodobá zemní spojení – do 5 min
- přerušovaná zemní spojení – mžiková nebo krátkodobá zemní spojení několikrát po sobě se opakující
- trvalá zemní spojení – až do okamžiku odstranění, zpravidla několik hodin

2. Síť s izolovaným uzlem

2.1. Bezporuchový stav

Sítě s izolovaným uzlem bývají malého rozsahu a jsou používány tam, kde zemní proud nepřevyšuje hodnotu 10 A.

Výchozí schéma sítě před vznikem poruchy je na obr.1. Pro studium zemních spojení uvažujeme jen kapacity sítě k zemi, pro zjednodušení ostatní parametry zanedbáváme (i svodové odpory jsou u zdravých fází 20krát až 50krát větší než kapacitní reaktance). Dále předpokládáme, že napětí zdroje je symetrické a síť je v chodu naprázdno.



Obr. 1: Trojfázová soustava s izolovaným uzlem

Z obr.1 plyne pro napětí a proudy:

$$\begin{aligned}
 \hat{U}_a - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fa} &= 0 \\
 \hat{U}_b - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fb} &= 0 \\
 \hat{U}_c - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fc} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
\hat{I}_a &= j\omega k_{a0} \hat{U}_a \\
\hat{I}_b &= j\omega k_{b0} \hat{U}_b \\
\hat{I}_c &= j\omega k_{c0} \hat{U}_c
\end{aligned}
\tag{2}$$

Protože síť má izolovaný uzel, musí platit pro proudy:

$$\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c = 0
\tag{3}$$

Sečteme rovnice (2) a rovnice (1) postupně vynásobíme $j\omega k_{a0}$, $j\omega k_{b0}$, $j\omega k_{c0}$ a sečteme. Dostaneme $j\omega(k_{a0}\hat{U}_a + k_{b0}\hat{U}_b + k_{c0}\hat{U}_c) - j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\hat{U}_0 - j\omega(k_{a0}\hat{U}_{fa} + k_{b0}\hat{U}_{fb} + k_{c0}\hat{U}_{fc}) = 0$.

První člen je nulový, dále uvážíme, že $\hat{U}_{fb} = \hat{a}^2 \hat{U}_{fa}$, $\hat{U}_{fc} = \hat{a} \hat{U}_{fa}$, kde

$$\hat{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}
\tag{4}$$

$$\hat{a}^2 = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}
\tag{5}$$

Potom po úpravě dostaneme:

$$\hat{U}_0 = -\frac{k_{a0} + \hat{a}^2 k_{b0} + \hat{a} k_{c0}}{k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}} \hat{U}_{fa}
\tag{6}$$

Z rovnice (6) plyne, že v kapacitně nesouměrné síti je napětí izolovaného uzlu proti zemi:

$$\hat{U}_0 \neq 0$$

V kapacitně souměrné síti bude:

$$k_{a0} = k_{b0} = k_{c0} = k_0$$

Potom čítec zlomku v rovnici (6) bude:

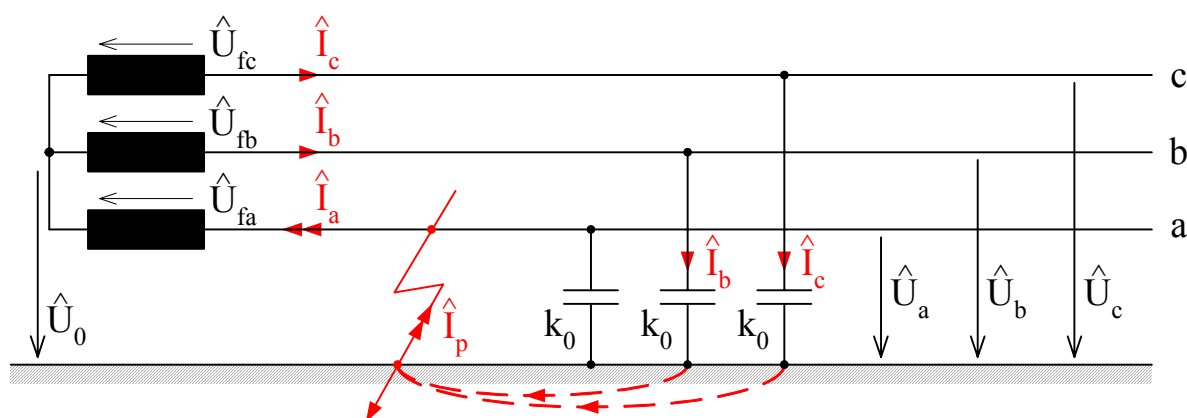
$$k_0(1 + \hat{a}^2 + \hat{a}) = 0$$

a napětí uzlu proti zemi při bezporuchovém chodu:

$$\hat{U}_0 = 0$$

2.2. Dokonalé trvalé zemní spojení

Při dokonalém (kovovém) trvalém zemním spojení bude schéma symetrické sítě podle obr.2:



Obr. 2: Zemní spojení v souměrné síti

Podle obr.2 je poruchový proud složen ze dvou proudů, tekoucích kapacitami nepostížených fází. Třetí kapacita postižené fáze je překlenuta poruchou.

Z obr. 2 vyplývají vztahy:

$$\hat{I}_p = \hat{I}_a = \hat{I}_b + \hat{I}_c \quad (7)$$

$$\hat{U}_a = 0 \quad (8)$$

$$\hat{I}_b = j\omega k_0 \hat{U}_b \quad (9)$$

$$\hat{I}_c = j\omega k_0 \hat{U}_c \quad (10)$$

$$\hat{U}_a - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fa} = 0 \quad (11)$$

$$\hat{U}_b - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fb} = 0 \quad (12)$$

$$\hat{U}_c - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fc} = 0 \quad (13)$$

Z uvedených rovnic plynou tyto závěry:

rovnice (8): při dokonalém zemním spojení klesne napětí postižené fáze na nulu

rovnice (11): napětí uzlu transformátoru stoupne na hodnotu záporného napětí postižené fáze:

$$\hat{U}_0 = -\hat{U}_{fa}$$

$$\text{rovnice (12): } \hat{U}_b = \hat{U}_0 + \hat{U}_{fb} = (-1 + \hat{a}^2) \hat{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{j30^\circ} \hat{U}_{fa} \quad (14)$$

$$\text{rovnice (13): } \hat{U}_c = \hat{U}_0 + \hat{U}_{fc} = (-1 + \hat{a}) \hat{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{-j30^\circ} \hat{U}_{fa} \quad (15)$$

Při dokonalém zemním spojení stoupnou napětí nepostižených fází proti zemi na sdrúženou hodnotu.

Rovnice (7), (9), (10) dávají zemní poruchový proud:

$$\hat{I}_p = \hat{I}_b + \hat{I}_c = j\omega k_0 (\hat{U}_b + \hat{U}_c) \quad (16)$$

Dosazením za \hat{U}_b, \hat{U}_c z rovnic (14), (15) bude:

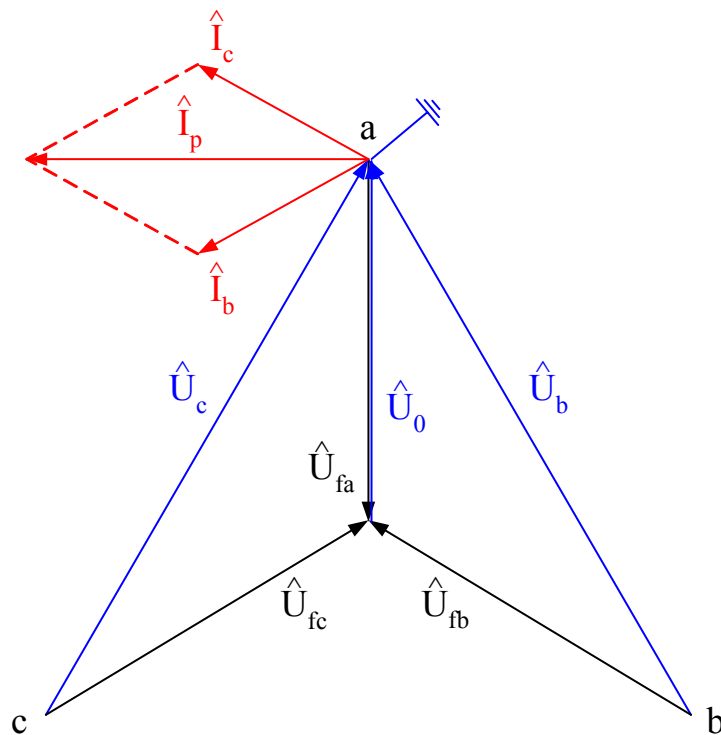
$$\hat{I}_p = j\omega k_0 [(-1 + \hat{a}^2) + (-1 + \hat{a})] \hat{U}_{fa} \quad (17)$$

Po další úpravě obdržíme hledaný poruchový proud:

$$\begin{aligned} \hat{I}_p &= j\omega k_0 (-2 + \hat{a}^2 + \hat{a} + 1 - 1) \hat{U}_{fa} \\ \hat{I}_p &= -3j\omega k_0 \hat{U}_{fa} = 3j\omega k_0 \hat{U}_0 \quad (\text{A}; \text{s}^{-1}, \text{F}, \text{V}) \end{aligned} \quad (18)$$

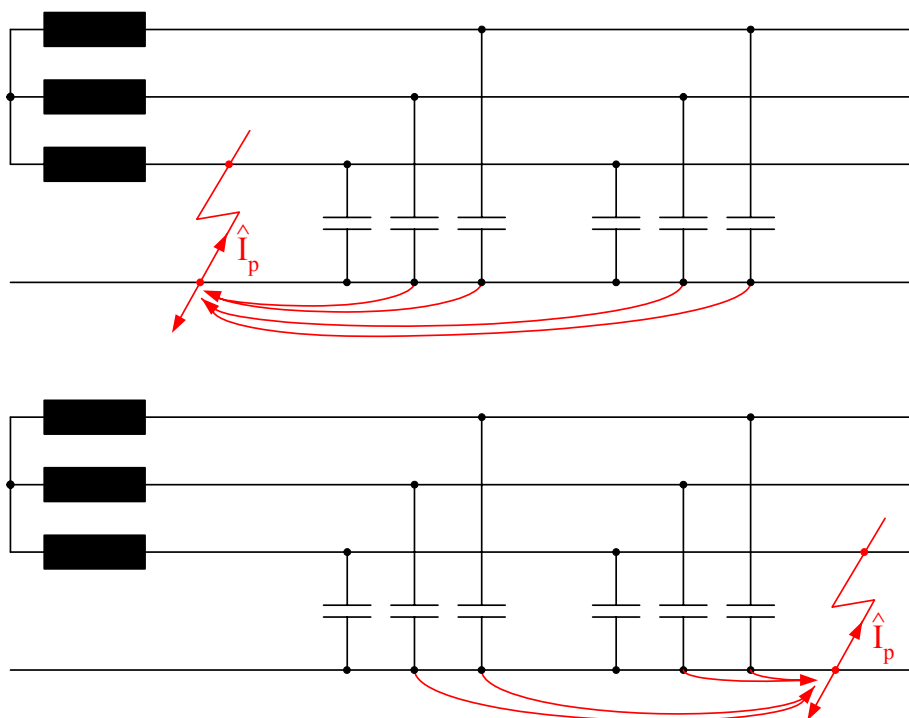
Poruchový proud tedy předbíhá napětí uzlu soustavy o $\pi/2$ a je součtem kapacitních proudů nepostižených fází. Bývá označován jako kapacitní proud sítě a je měřítkem pro její rozsah i volbu způsobu provozu uzlu.

Napěťové a proudové poměry při trvalém dokonalém zemním spojení jsou zřejmé z fázorového diagramu na obr.3.



Obr. 3: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení

Poruchová zemní proud \hat{I}_p závisí na celkové rozloze sítě připojené k transformátoru. Za kapacitu k_0 (F) lze dosadit $k_0 = k_{01} \cdot l$ (F; F/km, km). Velikost poruchového zemního proudu prakticky nezávisí v dané síti na vzdálenosti místa poruchy od transformátoru – viz obr.4.



Obr. 4: Vliv vzdálenosti zemního spojení od zdroje na velikost poruchového proudu

$$I_p = 3\omega k_{01} l U_f \quad (\text{A}; \text{s}^{-1}, \text{F/km, km, V}) \quad (19)$$

U venkovních vedení sítě 22 kV se počítá s kapacitním proudem 0,063 A/km. U kabelových vedení jsou měrné kapacity mnohonásobně vyšší než u venkovních vedení a navíc závislé na průřezu jader, konstrukci kabelu a druhu izolace. Orientačně lze pro kabely 22 kV s průřezem 120 až 240 mm² a papírovou izolací počítat s měrnými kapacitními proudy 3,5 až 4,5 A/km.

2.3. Odporové zemní spojení

O odporovém zemním spojení mluvíme v případě, že hodnota přechodového odporu v místě poruchy je nezanedbatelná, řádově několik set Ω (viz. obr.5).

Napětí postižené fáze proti zemi je v tomto případě nenulové a pro poruchový proud platí:

$$\hat{I}_p = -\hat{U}_a / R_p = \hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c \quad (20)$$

Dále platí rovnice (1) a (2). Při odvozování napětí uzlu proti zemi postupujeme obdobně jako u bezporuchového stavu: Sečteme rovnice (2) a rovnice (1) postupně vynásobíme $j\omega k_{a0}$, $j\omega k_{b0}$, $j\omega k_{c0}$ a sečteme. Dostaneme:

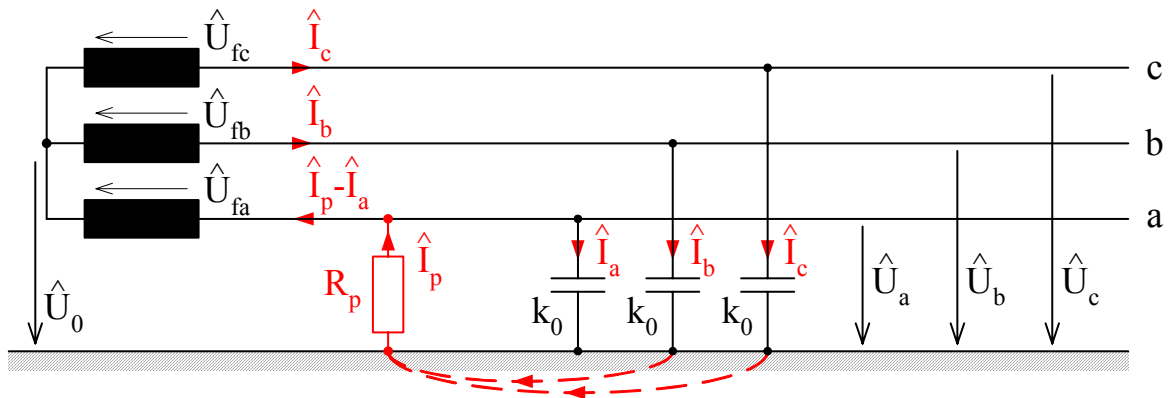
$$j\omega(k_{a0}\hat{U}_a + k_{b0}\hat{U}_b + k_{c0}\hat{U}_c) - j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\hat{U}_0 - j\omega(k_{a0}\hat{U}_{fa} + k_{b0}\hat{U}_{fb} + k_{c0}\hat{U}_{fc}) = 0$$

První člen je roven poruchovému proudu \hat{I}_p . Po vyjádření napětí postižené fáze $\hat{U}_a = \hat{U}_0 + \hat{U}_{fa}$ lze již snadno získat vztah pro napětí uzlu při odporovém zemním spojení:

$$\hat{U}_0 = -\frac{j\omega(k_{a0} + \hat{a}^2 k_{b0} + \hat{a} k_{c0}) + R_p^{-1}}{j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) + R_p^{-1}} \hat{U}_{fa} \quad (21)$$

Stav $R_p = 0$ odpovídá dokonalému zemnímu spojení, kdy $\hat{U}_0 = -\hat{U}_{fa}$.

Stav $R_p = \infty$ odpovídá bezporuchovému provoznímu stavu, kdy $\hat{U}_0 = 0$ při kapacitně symetrické síti.



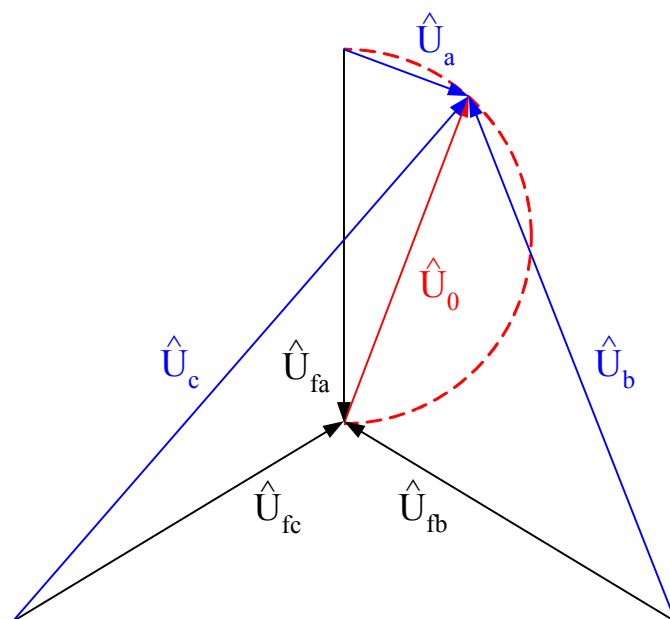
Obr. 5: Odporové zemní spojení

Vztah pro napětí uzlu lze obecně vyjádřit jako funkci odporu poruchy R_p :

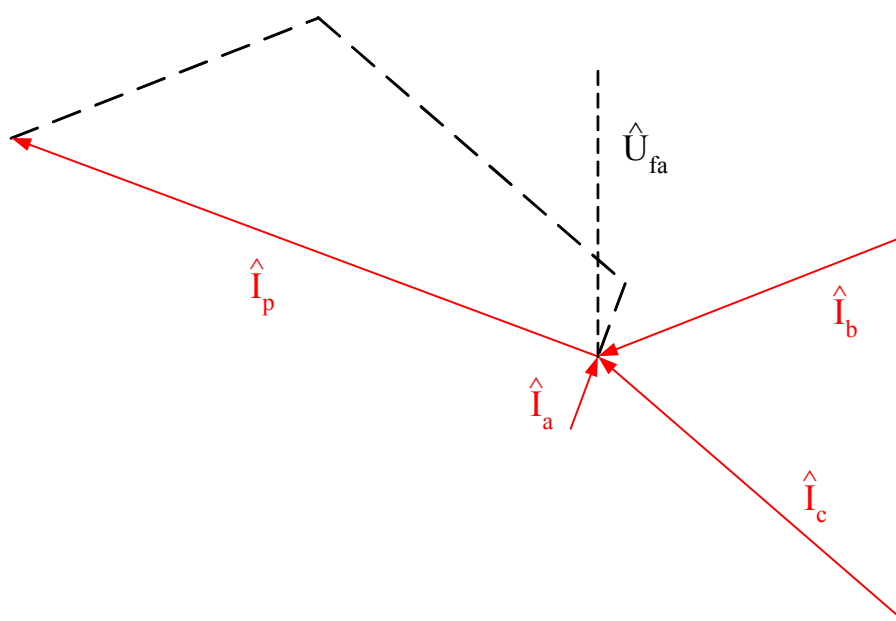
$$\hat{U}_0 = -\frac{\hat{A} + R_p^{-1}}{\hat{B} + R_p^{-1}} \hat{U}_{fa}$$

$$\hat{U}_0 = f(R_p) \quad (22)$$

Pro široký rozsah hodnot odporu R_p opisuje konec vektoru \hat{U}_0 kružnici v Gaussově rovině. Za těchto okolností může napětí jedné zdravé fáze dosáhnout i větší hodnoty než sdruženého napětí sítě. Situaci ilustrují fázorové diagramy na obr.6 a 7.



Obr. 6: Fázorový diagram napětí při odporovém zemním spojení



Obr. 7: Fázorový diagram proudů při odporovém zemním spojení

Poruchový proud získáme z rovnic (1), (2) a (20) následovně – pro kapacitně symetrickou síť:

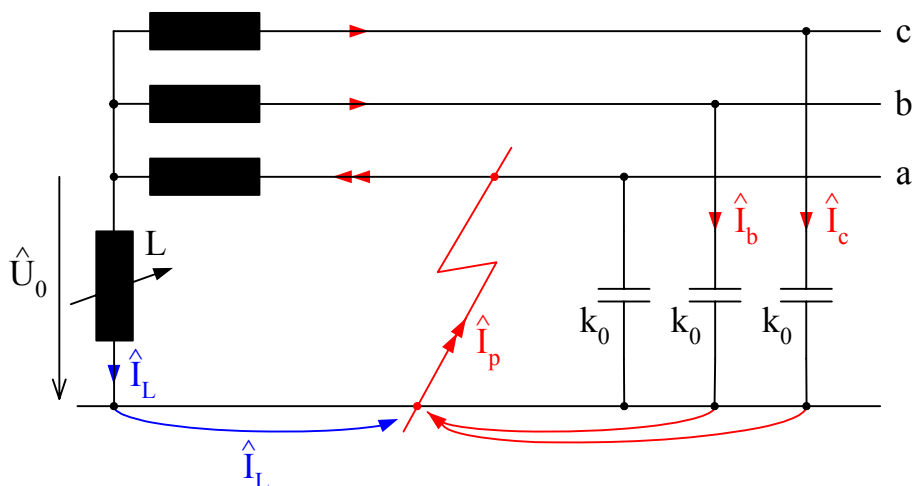
$$\begin{aligned} \hat{I}_p &= \hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c = j\omega (k_{a0}\hat{U}_a + k_{b0}\hat{U}_b + k_{c0}\hat{U}_c) \\ \hat{I}_p &= j\omega k_0 (\hat{U}_a + \hat{U}_b + \hat{U}_c) = j\omega k_0 [3\hat{U}_0 + (\hat{U}_{fa} + \hat{U}_{fb} + \hat{U}_{fc})] \\ \hat{I}_p &= 3j\omega k_0 \hat{U}_0 = -3j\omega k_0 \hat{U}_0 \frac{R_p^{-1}}{3j\omega k_0 + R_p^{-1}} \end{aligned} \quad (23)$$

3. Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku

3.1. Kompenzace zemních proudů

V sítích, kde zemní proud převyšuje hodnotu 5 A, se doporučuje jeho kompenzace, při proudech nad 10 A je kompenzace nutná.

V rozvodnách vn se používá několik způsobů, z nichž nejčastější je plynule regulovatelná zhášecí tlumivka. Tato tlumivka se zapojuje mezi uzel transformátoru a zem. Princip její činnosti v síti je patrný z obr. 8.



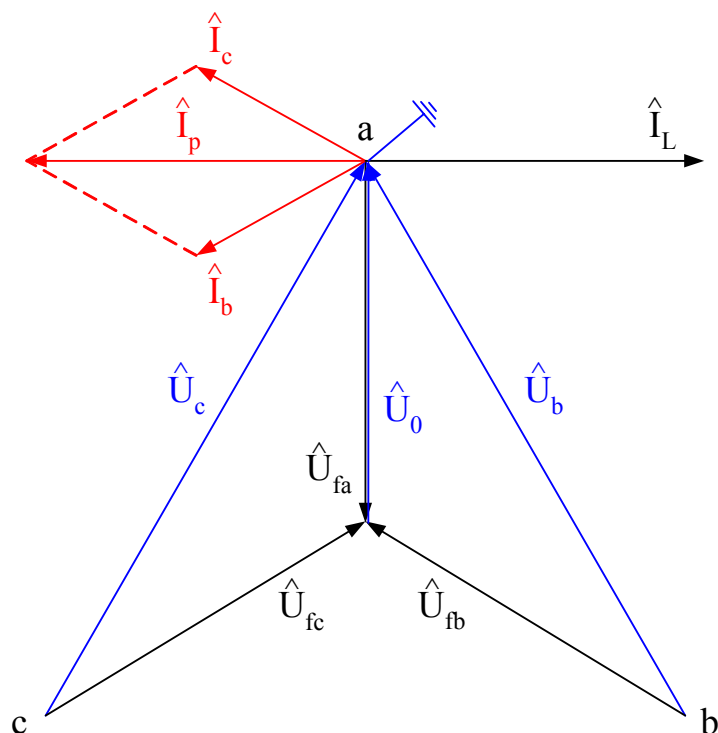
Obr. 8: Činnost zhášecí tlumivky

V bezporuchovém chodu je při kapacitně souměrné síti napětí uzlu $U_0 = 0$, při obvyklých nesympetriích bývá $U_0 < 0,01 U_f$.

Při dokonalém zemním spojení je napětí uzlu $\hat{U}_0 = -\hat{U}_{fa}$. Proud tekoucí nyní ideální zhášecí tlumivkou cívkou bude zpožděn o $\pi/2$ za napětím \hat{U}_0 :

$$\hat{I}_L = -j \frac{\hat{U}_0}{\omega L} \quad (24)$$

Při vhodné velikosti předem nastavené indukčnosti L dojde ke kompenzaci zemních proudů. Indukční proud jdoucí od tlumivky k místu zemního spojení je v protifázi s kapacitními proudy zdravých fází a dojde tak k uhašení oblouku – viz obr.9.



Obr. 9: Princip kompenzace zemního proudu

Při úplné kompenzaci platí:

$$\hat{I}_L = -\hat{I}_p \quad (25)$$

a s použitím rovnice (18):

$$-j \frac{\hat{U}_0}{\omega L} = -3j\omega k_0 \hat{U}_0$$

Potřebná indukčnost ideální zhášecí cívky pro úplnou kompenzaci zemního proudu bude z předchozí rovnice:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 k_0} \quad (\text{H}; \text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (26)$$

Zdánlivý výkon zhášecí cívky se stanoví ze vztahu:

$$\hat{S} = \hat{U}_0 \hat{I}_L^* = j \frac{\hat{U}_0 \hat{U}_0^*}{\omega L} = j3\omega k_0 U_0^2 = j3\omega k_0 U_f^2 = j\omega k_0 U^2 \quad (\text{VA}; \text{s}^{-1}, \text{F}, \text{V}) \quad (27)$$

kde U (V) je sdružené napětí sítě.

Tento výkon je jalový indukční:

$$Q = \omega k_0 U^2 \quad (\text{VAR}; \text{s}^{-1}, \text{F}, \text{V}) \quad (28)$$

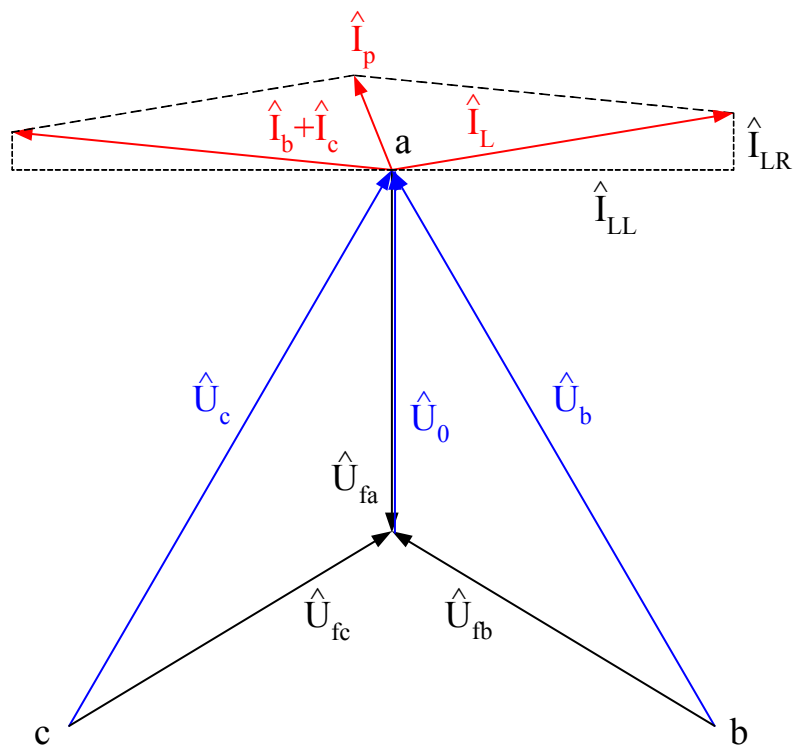
Při ideální kompenzaci neteče místem poruchy žádný proud, neudrží se tedy oblouk. Při skutečných poměrech zůstává v místě poruchy zbytkový proud, který obsahuje jednak nevykompenzovaný proud nepřesného nastavení indukčnosti, jednak nevykompenzovatelnou činnou složku způsobenou svody vedení a činným odporem zhašecí tlumivky a konečně proudy vyšších harmonických. Pokud je tento zbytkový proud menší než 5 A, dojde rovněž k uhašení oblouku vlivem deionizace jeho dráhy.

Poruchový proud pak můžeme vyjádřit jako:

$$\hat{I}_p = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j \left(3\omega k_0 - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \hat{U}_0 \quad (29)$$

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

Zbytkový proud je pak zřejmý z fázorového diagramu – obr. 10.



Obr. 10: Fázorový diagram se zbytkovým proudem

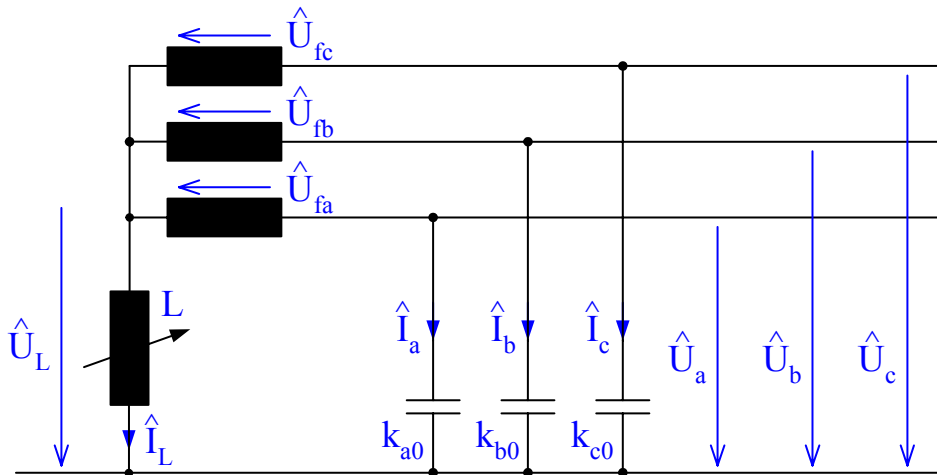
Poruchový proud (zbytkový) je u dobře vyladěné kompenzované sítě mnohem nižší než kapacitní proud sítě a má činný charakter. U obloukových zemních poruch jsou tím výrazně zlepšeny podmínky pro jejich samozhášení, oblouk se přerušuje bez opětovných zápalů, s pomalým nárůstem napětí v postižené fázi. Nižší velikost poruchového proudu rovněž příznivě ovlivňuje nároky na uzemnění v síti.

3.2. Ladění zhašecí tlumivky

Vhodná velikost indukčnosti zhašecí tlumivky se stanovuje při návrhu a volbě tlumivky výpočtem. Správné nastavení zhašecí tlumivky se potom provádí v bezporuchovém provozu v dané síti. Při odepnutí nebo připnutí některého vedení do rozvodny je nutné přeladění. Přestavování in-

dukčnosti, dříve odbočkami, dnes plynule změnou magnetického obvodu se provádí motorem, ovládaným dálkově buď ručně, nebo samočinně.

Základní schéma ideálního obvodu je na obr.11.



Obr. 11: Připojení zhášecí tlumivky do uzlu trojfázové sítě

Z obr.11 vyplývají následující vztahy:

$$\hat{U}_L = j\omega L \hat{I}_L \quad (30)$$

$$\hat{U}_a - \hat{U}_L - \hat{U}_{fa} = 0 \Rightarrow \hat{U}_a = \hat{U}_{fa} + \hat{U}_L \quad (31)$$

$$\hat{U}_b - \hat{U}_L - \hat{U}_{fb} = 0 \Rightarrow \hat{U}_b = \hat{U}_{fb} + \hat{U}_L \quad (32)$$

$$\hat{U}_c - \hat{U}_L - \hat{U}_{fc} = 0 \Rightarrow \hat{U}_c = \hat{U}_{fc} + \hat{U}_L \quad (33)$$

$$-\hat{I}_L = \hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c = j\omega (k_{a0} \hat{U}_a + k_{b0} \hat{U}_b + k_{c0} \hat{U}_c) \quad (34)$$

Dosazením do rovnice (34) z (31) až (33) dostaneme:

$$-\hat{I}_L = j\omega [(k_{a0} + k_{b0} \hat{a}^2 + k_{c0} \hat{a}) \hat{U}_{fa} + (k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) \hat{U}_L] \quad (35)$$

Podle rovnice (30):

$$\hat{I}_L = \frac{\hat{U}_L}{j\omega L} \quad (36)$$

Srovnáním posledních rovnic a úpravou dostaneme:

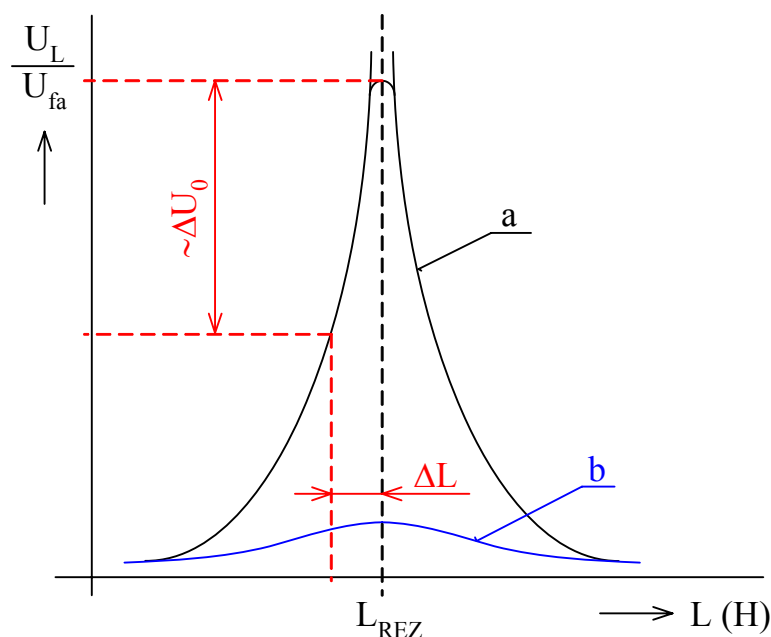
$$-\hat{U}_L = -\omega^2 L (k_{a0} + k_{b0} \hat{a}^2 + k_{c0} \hat{a}) \hat{U}_{fa} - \omega^2 L (k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) \hat{U}_L \quad (37)$$

$$\hat{U}_L = \frac{-\omega^2 L(k_{a0} + \hat{a}^2 k_{b0} + \hat{a} k_{c0})}{\omega^2 L(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) - 1} \hat{U}_{fa} \quad (38)$$

Graf funkce $\left| \frac{U_L}{U_{fa}} \right| = f(L)$ je na obr.12. Jedná se vlastně o rezonanční křivku obvodu z obr.11.

Rezonanční křivka „a“ je křivka odpovídající jisté kapacitní nesymetrii vedení (venkovní vedení). Ve skutečnosti je vlivem činných odporů maximum omezeno. Přímka procházející vrcholem určuje rezonanční indukčnost L_{rez} , která zajišťuje, že při vzniku zemního spojení dojde k úplné kompenzaci zemního proudu. Rezonanční křivka „a“ umožňuje nastavení zhášecí tlumivky např. měřením napětí U_L na tlumivce při její regulaci.

Protože nastavení se provádí do rezonance, nazývá se často zhášecí tlumivka rezonanční cívkou (tlumivkou).



Obr. 12: Rezonanční křivky

V sítích jen málo kapacitně nesymetrických (kabelová vedení) dává rovnice (38) rezonanční křivku „b“, která je tím plošší, čím je větší symetrie vedení. Vyhledávání maxima pomocí voltmetru je v těchto případech obtížné a při zcela symetrické síti nemožné.

V sítích značně nesymetrických a s nepatrnými činnými odpory dosáhne maximum křivky „a“ značné hodnoty a uzel transformátoru je při rezonanci namáhán velkým napětím U_L . V těchto případech se zhášecí tlumivka úmyslně rozladí o hodnotu $-\Delta L$ nebo $+\Delta L$. Vlivem velké strmosti rezonanční křivky napětí uzlu značně poklesne. Pokud rozladění nezpůsobí zbytkový proud větší než 5 A, je činnost zhášecí tlumivky zajištěna a nazývá se dizonanční tlumivka.

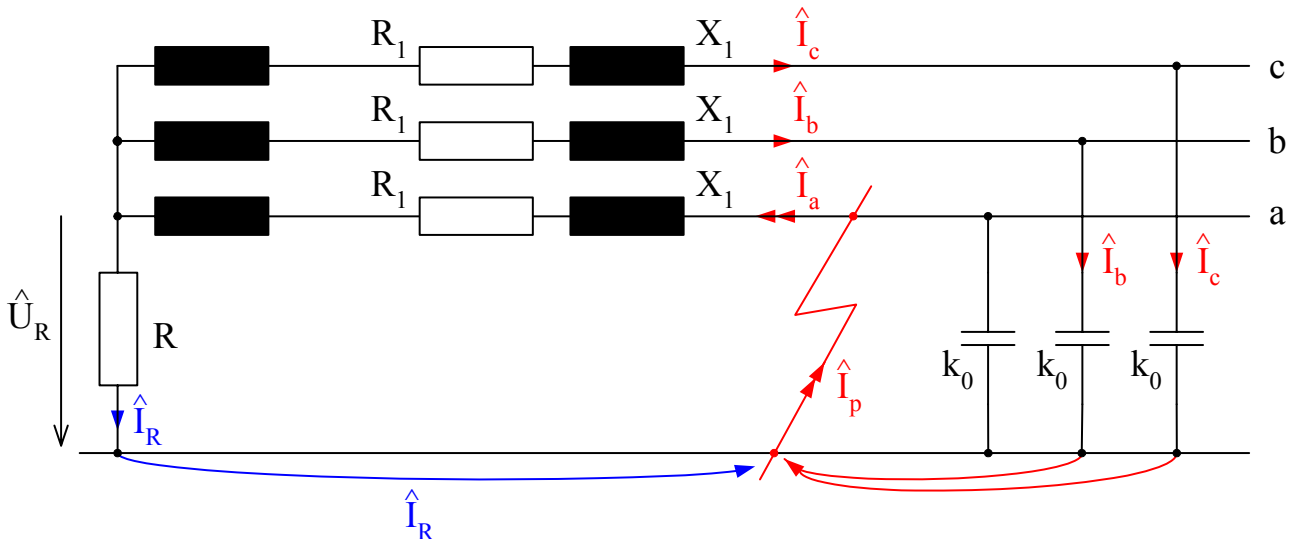
Pro docílení příznivých účinků kompenzace na samozhášení poruch i s ohledem na omezení hladiny přepětí a dimenzování uzemnění v sítích je zapotřebí udržovat rozdíl mezi proudem po nastavení zhášecí tlumivky I_{Lnast} a kapacitním proudem sítě I_{kap} do 10% z kapacitního proudu sítě:

$$\left| I_{Lnast} - I_{kap} \right| \leq 0,1 I_{kap} \quad (39)$$

Zhášecí tlumivky se přednostně připojují k uzlům napájecích transformátorů. Pokud není uzel vn vyveden, připojí se tlumivka na uzel uměle vytvořený trojfázovou nulovou tlumivkou nebo pomocným transformátorem $Y_N/d1$.

4. Síť s uzlem uzemněným přes rezistor

Problémy s naladěním zhášecí tlumivky u kapacitně souměrných sítí (městské kabelové sítě) spolu s ostatními technickými a ekonomickými problémy vedou k provozování odporově uzemněných sítí – viz. obr.13.



Obr. 13: Činný odpor v uzlu trojfázové sítě

Tento způsob uzemnění je vhodný především u kabelových sítí, kde je většina poruch trvalá, takže se zmenšení poruchového proudu nemůže projevit samozhášením poruch jako při obloukových poruchách u venkovních vedení. Zhášecí tlumivka neomezuje přepětí při vzniku zemních spojení, provoz při zemním spojení namáhá izolaci zdravých fází zvýšeným napětím a přináší riziko vzniku vícenásobných poruch.

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

Místem poruchy při jednofázovém zkratu protéká součet proudů činným odporem a kapacitního proudu celé sítě. Velikost poruchového proudu je závislá na celkové rozloze sítě, avšak klesá se vzdáleností místa poruchy od transformátoru. Vhodnou volbou velikosti odporu R v uzlu se omezuje velikost zkratového proudu. Odstranění poruchy se provádí obdobně jako při jednofázovém zkratu.

Podmínka tlumení přepětí vyjadřuje požadavek, aby jmenovitý proud uzlového rezistoru byl větší, než je kapacitní proud sítě:

$$I_R \geq I_{kap}$$

$$U_f / R \geq 3\omega k_0 U_f$$

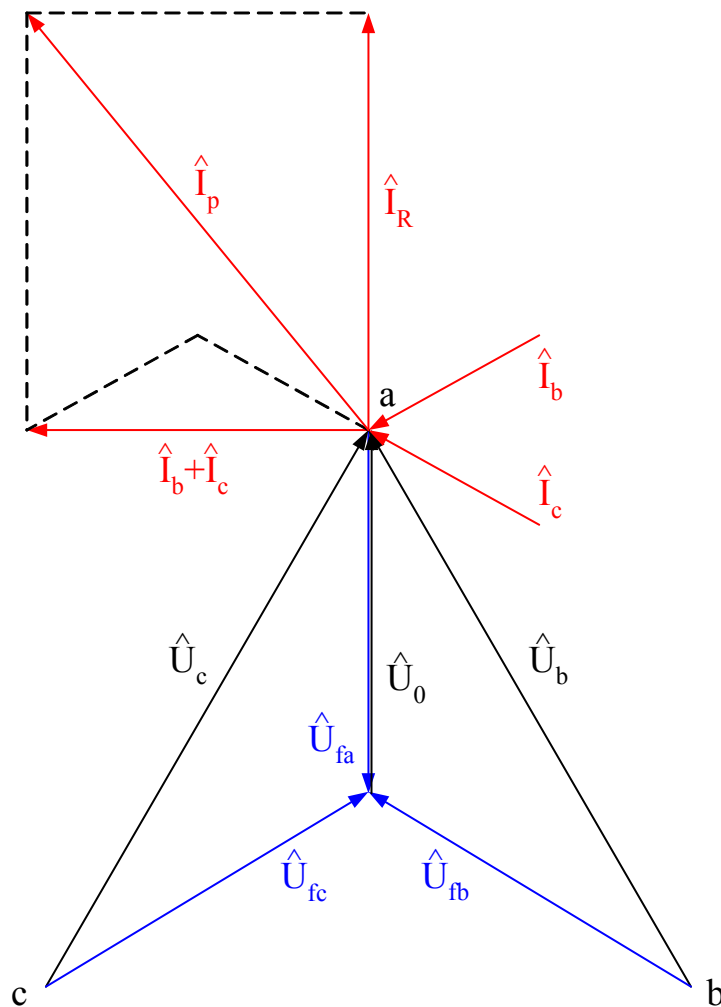
Pro odpor uzlového rezistoru tedy platí:

$$R \leq \frac{1}{3\omega k_0} \quad (40)$$

Maximální proud zemní poruchy je dán vektorovým součtem jmenovitého proudu uzlového rezistoru a kapacitního proudu sítě (porucha v blízkosti napájecího transformátoru – zanedbány podélné impedance vedení a odpor v místě poruchy):

$$\hat{I}_p = -(1/R + j3\omega k_0)U_f = \hat{I}_R + \hat{I}_{kap} \quad (41)$$

Fázorový diagram v tomto případě odpovídá obr.14.



Obr. 14: Fázorový diagram při zemní poruše v blízkosti transformátoru

Charakteristickým rysem provozu s uzlovým rezistorem je, že i přechodná porucha se projeví vypnutím příslušného vývodu. To je potřebné u kabelových vedení, kde porucha většinou souvisí s poškozením kabelu a další provoz kabelu je tedy nežádoucí.

U venkovních vedení je však mnoho přechodných poruch bez poškození vedení. Aby nedocházelo ke zbytečným trvalým vypnutím, lze použít systém OZ (opětného zapnutí). Jeho působením se

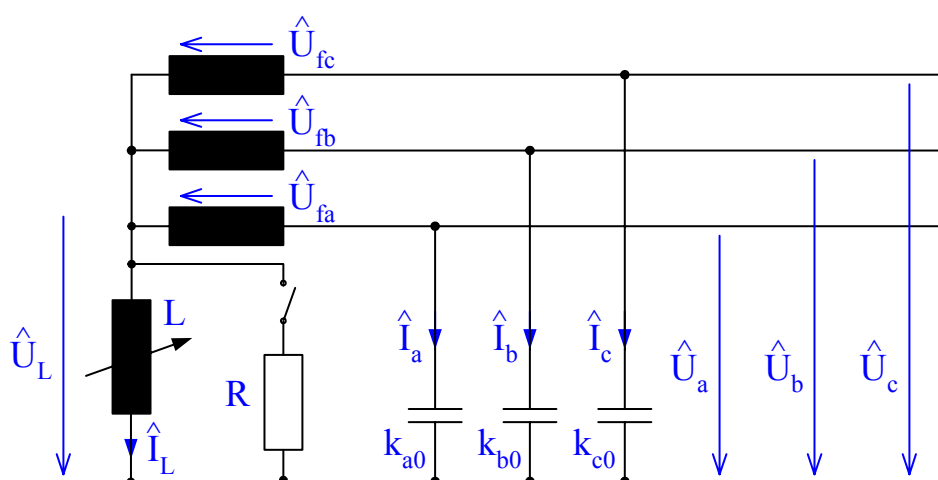
podstatně snižuje dlouhodobé přerušování dodávek způsobených krátkodobou poruchou na venkovním vedení.

Provoz uzlu přes rezistor je výhodný z hlediska odběratelů tam, kde je malý počet přechodných poruch a kde je naopak relativně velký počet následných poruch.

Uzemnění přes rezistor se považuje za nutné, překročí-li kapacitní proudy sítě 350 až 400A, u sítí s kapacitními proudy od 5A do asi 350 až 400A je provoz přes uzlový rezistor možný a přípustný. Zda provoz bude výhodnější, závisí na poměru následných poruch a přechodných poruch či vlastně na poměru součtu délek kabelů k venkovnímu vedení.

5. Sít' s přechodným uzemněním uzlu

Jedná se o sít' s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde se při trvajícím zemním spojení přípne paralelně k tlumivce rezistor – schéma viz. obr.15.



Obr. 15: Schéma sítě s přechodným uzemněním uzlu

Připnutím rezistoru dojde ke zvětšení poruchového proudu, čímž se zlepší podmínky pro činnost zemních ochranných zařízení. I zde platí, že proud uzlovým rezistorem má být větší než kapacitní proud sítě,

$$\text{tedy } R \leq \frac{1}{3\omega k_0}.$$

U některých kompenzovaných sítí se v podstatě k témuž účelu používá zatěžování pomocného vinutí zážehací tlumivky vhodným rezistorem. V tomto případě však činná složka poruchového proudu nebývá větší než kapacitní proud sítě.

V obou případech se připnutí rezistoru děje automaticky. Základní funkce automatiky vychází z potřeby spínat rezistor pouze při trvajících zemních spojeních. Po vzniku zemního spojení je tedy před připojením rezistoru třeba vyčkat, zda zemní spojení zhasne samo. Měřicí obvod automatiky jako zemní spojení vyhodnocuje zvýšení napětí na měřicím vinutí zážehací tlumivky nad zvolenou mez. Časové zpoždění mezi vznikem zemní poruchy a povelom na připojení rezistoru je volitelné od 0,5 s do 10 s. Doba zapnutí odporu je rovněž seřiditelná, v mezích od 1 s do 3 s. Volí se tak, aby byla dostatečná pro působení zemních relé, popřípadě překryla i přestávku rychlého OZ.

Automatika pracuje ve dvojnásobném režimu, pro sítě se signalizací zemních spojení a pro sítě s vypínáním při zemních poruchách.

V prvním případě se předpokládá, že sít' může být po určitou dobu provozována se zemním spojením a sepnutí přídatného rezistoru je potřebné pouze na začátku zemního spojení pro zabez-

pečení spolehlivé činnosti zemních relé vývodů. V dalším čase až do vypnutí (zániku) zemního spojení zůstává výstup automatiky zablokovan. Za ukončení zemního spojení automatika považuje pokles napětí na zhášecí tlumivce pod nastavenou rozběhovou hodnotu na dobu delší než 10 s.

U sítí s vypínáním při zemních poruchách je zapotřebí dávat impuls na sepnutí rezistoru vždy, když se v síti objeví zemní spojení, tedy i opakovaně, pro případ vzniku následné poruchy. Aby nemohlo dojít k tepelnému ohrožení odporů, obsahuje automatika tepelný model, který kontroluje ohřev a chladnutí rezistoru a pokud by hrozilo rezistoru nebezpečí, je výstup na jeho sepnutí zablokovan nebo přerušen.

6. Trvalé zemní spojení – metoda souměrných složek

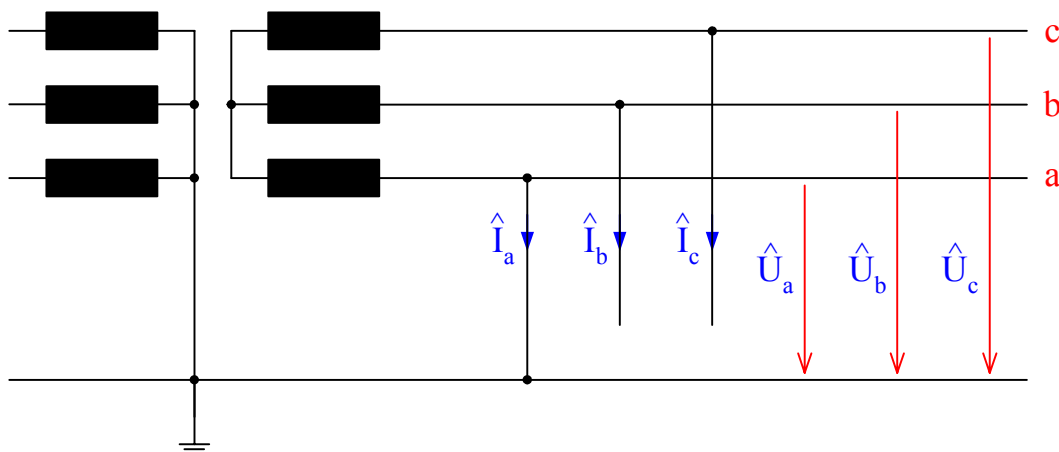
Kromě výpočtů ve fázových hodnotách lze zemní spojení analyzovat také metodou souměrných složek. Výchozí schéma sítě s izolovaným uzlem je na obr.16. Pro případ zemního spojení můžeme napsat charakteristické rovnice:

$$U_a = 0 \quad I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad (42)$$

Tyto rovnice jsou shodné s charakteristickými rovnicemi pro jednofázový zkrat. Proto pro složkové hodnoty proudů platí:

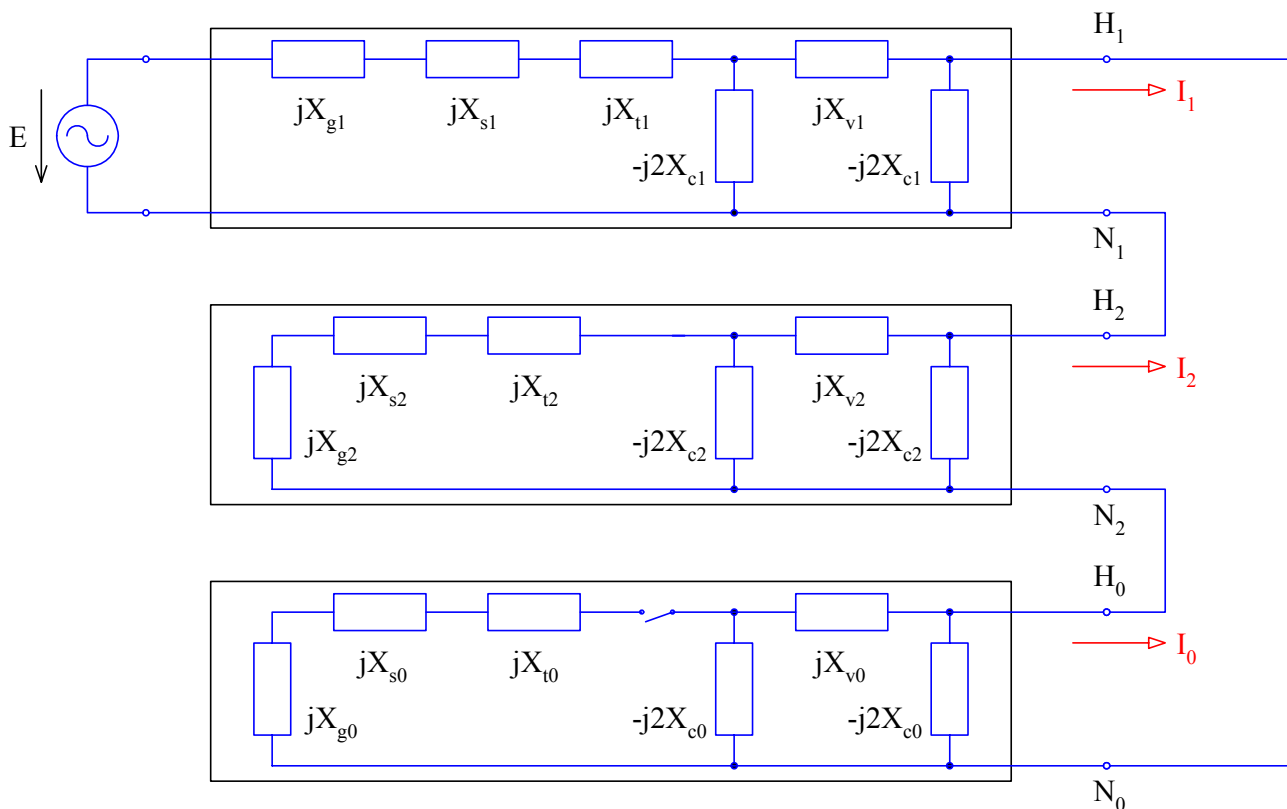
$$I_F = F^{-1}I = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_A \\ I_A \\ I_A \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1}{3} I_A \quad (44)$$



Obr. 16: Schématické znázornění zemního spojení

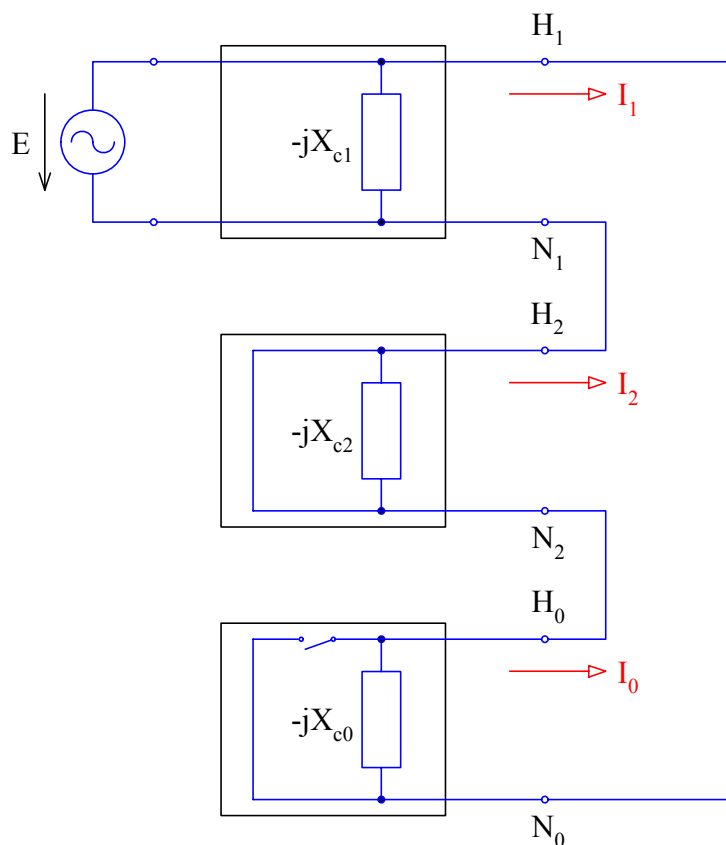
Podle rovnice (44) lze vzájemně sériově propojit náhradní schémata složkových soustav – viz obr.17. Ve schématu jsou X_g , X_s , X_t a X_v reaktance zdroje, soustavy, transformátoru a vedení, X_c je kapacitní reaktance vedení. Parametry jsou přepočteny na jednu napěťovou hladinu.



Obr. 17: Propojení náhradních schémat složkových soustav při zemním spojení

Důležité je si uvědomit, že vypínač v netočivém schématu musí být rozpojen. Netočivá složka je totiž tvořena třemi konfázními fázory (proudu) pro tři fáze, které nemohou téci do trojfázového obvodu zakončeného hvězdou s nevyvedeným uzlem, což je případ vn strany distribučního transformátoru. Neexistuje totiž vodivá cesta pro algebraický součet těchto proudů v uzlu.

Jelikož kapacitní reaktance elektrického vedení jsou značně větší než rezistence a indukční reaktance článků ES, lze považovat všechny podélné impedance za nulové a náhradní schéma se pak zjednoduší do podoby na obr.18.



Obr. 18: Zjednodušené složkové náhradní schéma

Z obr.18 jsou zřejmé velikosti celkových reaktancí jednotlivých složkových soustav:

$$X_1 = 0 \quad X_2 = 0 \quad X_0 = X_{c0} = X_C \quad (45)$$

Potom můžeme napsat rovnice pro složkové proudy:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0} = \frac{\hat{E}}{-jX_{c0}} \quad \hat{I}_2 = \hat{I}_1 \quad \hat{I}_0 = \hat{I}_1 \quad (46)$$

a pro složková napětí v místě poruchy:

$$\hat{U}_1 = \hat{E} \quad \hat{U}_2 = 0 \quad \hat{U}_0 = -\hat{E} \quad (47)$$

Podle (42) a (44) získáme vztahy pro fázové proudy:

$$\hat{I}_A = 3\hat{I}_1 \quad \hat{I}_B = 0 \quad \hat{I}_C = 0 \quad (48)$$

Proud \hat{I}_A je vlastně záporně vzatý poruchový proud \hat{I}_p zemního spojení. Platí tedy:

$$\hat{I}_p = -\hat{I}_A = -3j \frac{\hat{E}}{X_{c0}}$$

$$\hat{I}_p = -3j\omega k_0 \hat{E} \quad (49)$$

Fázová napětí stanovíme pomocí transformační matice \mathbf{F} :

$$\mathbf{U} = \mathbf{F}\mathbf{U}_F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} & 1 \\ \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\hat{U}_A = 0 \quad (51)$$

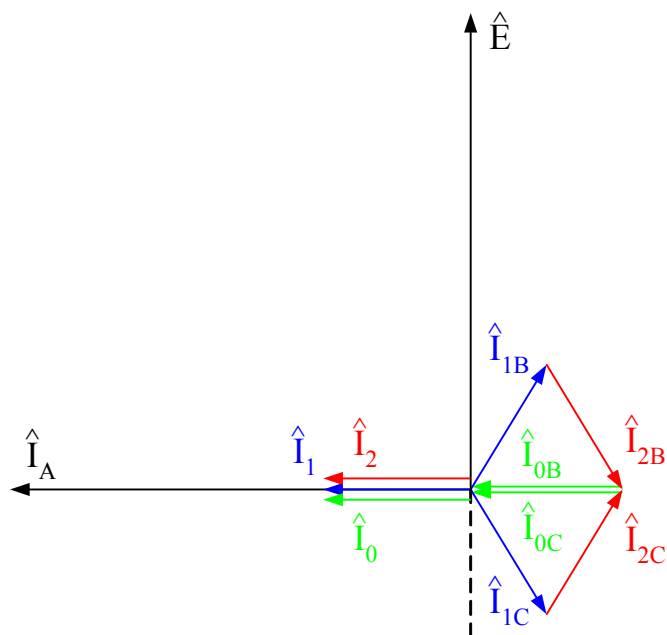
$$\hat{U}_B = \hat{a}^2 \hat{U}_1 + \hat{a} \hat{U}_2 + \hat{U}_0 = \hat{a}^2 \hat{E} - \hat{E} = (\hat{a}^2 - 1) \hat{E} \quad (52)$$

$$\hat{U}_C = \hat{a} \hat{U}_1 + \hat{a}^2 \hat{U}_2 + \hat{U}_0 = \hat{a} \hat{E} - \hat{E} = (\hat{a} - 1) \hat{E} \quad (53)$$

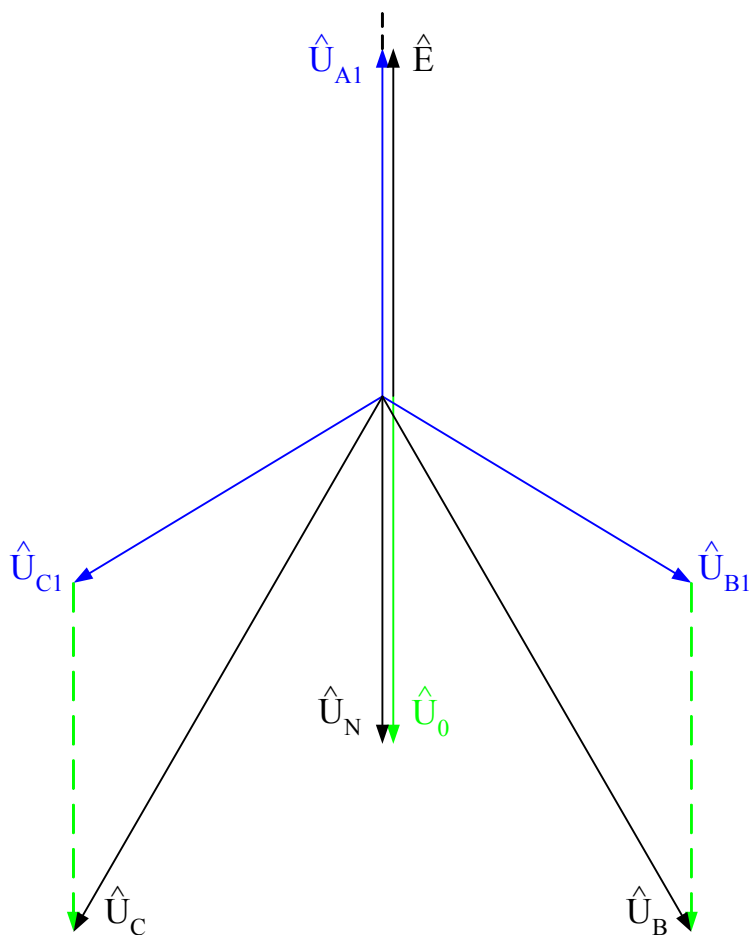
Na obr.19 je sestrojen fázorový diagram proudů a na obr.20 fázorový diagram napětí při zemním spojení. Velikosti a orientace složkových proudů vzhledem k fázoru \hat{E} jsou dány rovnicemi (46). Fázor proudu zemního spojení je určen rovnicí (48). Fázory napětí jednotlivých fází při zemním spojení sestrojíme nejjednodušeji pomocí rovnic (51), (52) a (53). Na obr.20 je vyznačen také fázor napětí uzlu \hat{U}_N , který odpovídá rovnici (54):

$$\hat{U}_N = \frac{1}{3}(\hat{U}_A + \hat{U}_B + \hat{U}_C) = \frac{1}{3}(\hat{a}^2 - 1 + \hat{a} - 1) \hat{E}$$

$$\hat{U}_N = -\hat{E} \quad (54)$$



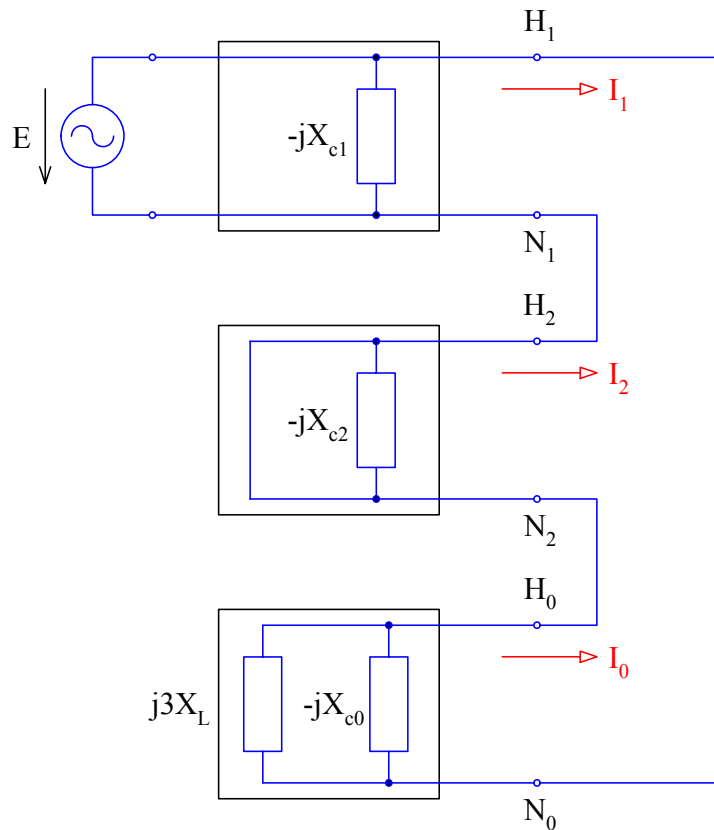
Obr. 19: Fázorový diagram proudů při trvalém zemním spojení



Obr. 20: Fázorový diagram napětí při trvalém zemním spojení

Vyšetřeme nyní poměry při zemním spojení v síti s uzlem transformátoru uzemněným přes indukčnost. Náhradní složkové schéma se bude lišit od náhradního schématu předcházejícího případu

tím, že v obvodu transformátoru bude ve schématu nulové složkové soustavy zapojena trojnásobná reaktance X_L (plyne z úbytku složkových napětí na symetrickém příčném článku). Dostáváme tak náhradní složkové schéma na obr.21.



Obr. 21: Náhradní složkové schéma pro zemní spojení s tlumivkou

Opět jsou zanedbány rezistence a indukční reaktance ostatních článků oproti kapacitním reaktancím, proto budou velikosti celkových složkových reaktancí:

$$X_1 = 0 \quad X_2 = 0$$

$$X_0 = (j3X_L) // (-jX_{c0}) = j \frac{3X_L X_{c0}}{X_{c0} - 3X_L} \quad (55)$$

Sousledný proud pak bude

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_{c1} + \hat{Z}_{c2} + \hat{Z}_{c0}} = \frac{\hat{E}}{j \frac{3X_L X_{c0}}{X_{c0} - 3X_L}} = -j \frac{X_{c0} - 3X_L}{3X_L X_{c0}} \hat{E} \quad (56)$$

Poruchový zemní proud:

$$\hat{I}_p = -\hat{I}_A = -3\hat{I}_1 = j \frac{X_{c0} - 3X_L}{3X_L X_{c0}} \hat{E} \quad (57)$$

Poruchový proud bude nulový při splnění podmínky:

$$\begin{aligned} X_{c0} - 3X_L &= 0 \\ X_L &= \frac{1}{3}X_{c0} = \frac{1}{3\omega k_0} \end{aligned} \quad (58)$$

Pro úplnost můžeme vypočítat proud jdoucí indukčností L, z náhradního schématu:

$$\hat{I}_L = 3\hat{I}_{L0} = 3\frac{\hat{U}_0}{j3X_L} = \frac{-\hat{E}}{jX_L} = j\frac{\hat{E}}{X_L} \quad (59)$$

nebo z rovnice (54)

$$\hat{I}_L = \frac{\hat{U}_N}{jX_L} = \frac{-\hat{E}}{jX_L} = j\frac{\hat{E}}{X_L} \quad (60)$$

Rovněž proudy jdoucí kapacitami lze stanovit výpočtem z náhradního schématu nebo použitím již vypočítaných výrazů pro fázová napětí v místě zemního spojení. Předpokládáme kapacitně symetrickou síť ($X_{CA} = X_{CB} = X_{CC} = X_C$).

Odvození z náhradního schématu (obr.21):

$$\begin{aligned} \hat{I}_{C1} &= \frac{\hat{E}}{-jX_C} = j\frac{\hat{E}}{X_C} \\ \hat{I}_{C2} &= 0 \\ \hat{I}_{C0} &= \frac{\hat{U}_0}{-jX_C} = \frac{-\hat{E}}{-jX_C} = -j\frac{\hat{E}}{X_C} = -\hat{I}_{C1} \end{aligned} \quad (61)$$

Provedeme lineární transformaci proměnných:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{CA} &= \hat{I}_{C1} + \hat{I}_{C2} + \hat{I}_{C0} = 0 \\ \hat{I}_{CB} &= \hat{a}^2\hat{I}_{C1} + \hat{a}\hat{I}_{C2} + \hat{I}_{C0} = (\hat{a}^2 - 1)\hat{I}_{C1} = (\hat{a}^2 - 1)j\frac{\hat{E}}{X_C} \\ \hat{I}_{CC} &= \hat{a}\hat{I}_{C1} + \hat{a}^2\hat{I}_{C2} + \hat{I}_{C0} = (\hat{a} - 1)j\frac{\hat{E}}{X_C} \end{aligned} \quad (62)$$

Stejné výrazy lze získat z rovnic (51) až (53):

$$\begin{aligned}\hat{I}_{CA} &= \frac{\hat{U}_A}{-jX_C} = 0 \\ \hat{I}_{CB} &= \frac{\hat{U}_B}{-jX_C} = (\hat{a}^2 - 1)j \frac{\hat{E}}{X_C} \\ \hat{I}_{CC} &= \frac{\hat{U}_C}{-jX_C} = \frac{j}{X_C} (\hat{a} - 1)(-jX_C) \frac{\hat{E}}{-jX_C} = (\hat{a} - 1)j \frac{\hat{E}}{X_C}\end{aligned}\tag{63}$$

Součtový proud kapacit obou zdravých fází je

$$\hat{I}_{BB} + \hat{I}_{CC} = j(\hat{a}^2 - 1 + \hat{a} - 1) \frac{\hat{E}}{X_C} = -3j \frac{\hat{E}}{X_C}\tag{64}$$

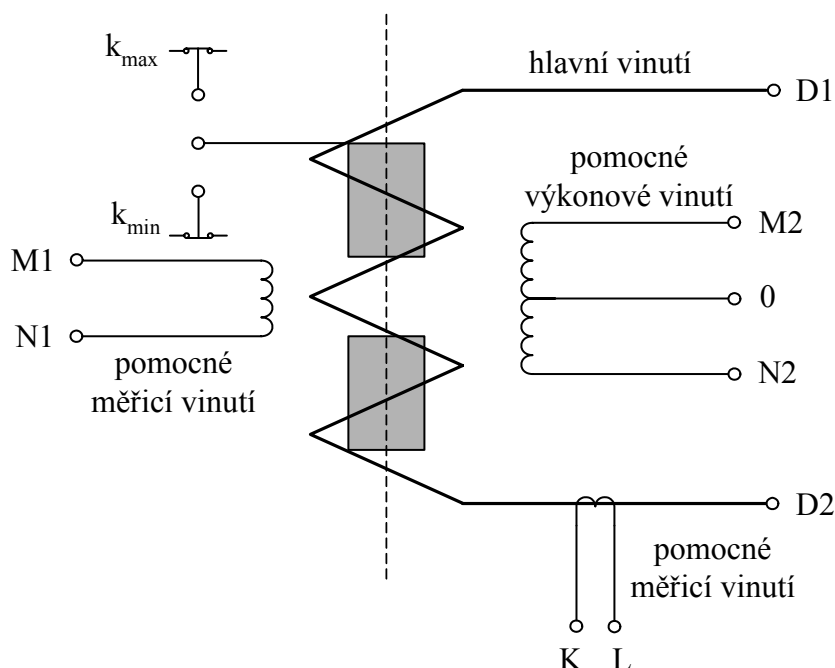
Poruchový proud pak bude

$$\hat{I}_p = \hat{I}_{BB} + \hat{I}_{CC} + \hat{I}_L = -3j \frac{\hat{E}}{X_C} + j \frac{\hat{E}}{X_L} = j \frac{X_C - 3X_L}{3X_L X_C} \hat{E}\tag{65}$$

Výraz (65) je ve shodě s dříve odvozeným vztahem (57).

7. Vlastnosti zhášecí tlumivky

Schématické znázornění zhášecí tlumivky je na obr.22.



Obr. 22: Schéma zhášecí tlumivky

Zhášecí tlumivka musí být vybavena měřicím transformátorem proudu X/5A, 15 VA (vinutí KL) pro měření protékajícího proudu vinutím. Pomocné napěťové vinutí M1N1 má jmenovité napětí 100V, toleranci $\pm 6\%$ při jmenovité zátěži 120 VA.

Každá tlumivka musí mít pomocné výkonové vinutí, zatížitelné 50% ze jmenovitého výkonu zhášecí tlumivky po dobu 10 s. Toto vinutí je zpravidla využíváno pro zvyšování činné složky proudu zemního spojení při vyhledávání vývodu s poruchou.

Zhášecí tlumivky mají podle normy zaručovaný regulační rozsah od 10% do 100% jmenovitého proudu při jmenovitém napětí. Odchylka impedance zhášecí tlumivky určená z impedanční charakteristiky nemá v rozsahu od 10% do 100% jmenovitého napětí překročit 10%. Dimenzovány jsou na dobu zatížení 30 minut a 120 minut.

8. Literatura

- [1] Fejt, Z., Čermák, J.: Elektroenergetika. Skripta ČVUT, Praha 1985.
- [2] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987.
- [3] Veselý, J.: Studie způsobu provozu uzlu sítě vn. Diplomová práce, Praha 1998.