



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Diplomová práce

Analýza míry impedančních nesymetrií venkvních vedení 110 kV

Vedoucí práce: Ing. Radek Hanuš Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Bc. Tomáš Nosek

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Nosek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Analýza míry nesymetrií venkovních vedení 110 kV**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor nesymetrie vedení
- 2) Tvorba výpočtového programu pro výpočet provozních impedancí jednotlivých fází v programu MatLab
- 3) Seznámení s možnostmi měření parametrů vedení 110 kV
- 4) Porovnání vypočtených a naměřených hodnot nesymetrií
- 5) Analýza specifik venkovních vedení v městském prostředí

Seznam odborné literatury:

- [1] Ziegler G.: Numerical Distance Protection, Munich, Siemens MCD 1999.
- [2] Chmelík K., Toman P., Hanuš R., Grym R., Machoň J, Hochman P.: CHRÁNĚNÍ 3 - elektrická zařízení vysokého napětí; IRIS 2005.
- [3] Janíček F., Chladný V., Beláň A., Eleschová, Ž.: Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave, Slovenská technická univerzita v Bratislave 2004.
- [4] Němeček F.: Přenos a rozvod elektrické energie, Praha, ČVUT 1983.
- [5] CP CU1 Reference Manuál, OMICRON 2005.

Vedoucí: Ing. Radek Hanuš, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

.....
podpis studenta

V Praze dne

Poděkování

Děkuji panu Ing. Radku Hanušovi Ph.D. za ochotu, cenné rady a vedení při psaní diplomové práce. Dále děkuji společnostem PREdistribuce a EON, které mi poskytly informace o svých vedeních, čímž mi umožnili tuto práci napsat. Poděkování patří také panu Vítu Stiebitzovi ze společnosti PREdistribuce za pomoc při získávání vstupních dat pro mou práci.

Anotace

Práce analyzuje míru impedanční nesymetrie venkovních vedení. První kapitola uvádí postup výpočtu impedanční matice vedení, ze kterého plynou zdroje nesymetrií. Dále jsou popsány reálné zdroje impedanční nesymetrie a druhá kapitola se podrobněji zaměřuje na vliv impedance zemnicího lana. Následující dvě kapitoly jsou věnovány měření fázových parametrů venkovních vedení a jejich porovnání s vypočtenými hodnotami. Závěrečná kapitola zkoumá vliv uzemněných plášťů kabelů vysokého napětí na rozložení zpětných proudů a na impedanční nesymetrii venkovních vedení. Poslední část pojednává o vlivu těchto plášťů kabelů na netočivou impedanci.

Abstract

The thesis analyses the degree of impedance asymmetry of overhead power lines. The first chapter shows the way of calculating the impedance matrix of power line that leads to the sources of asymmetry. Real sources of impedance asymmetry are described in the second chapter, especially the influence of impedance of the grounding cable. The following two chapters describe the measuring of phase line parameters that are compared with the counted values. The last chapter looks into the influence of grounded cable sheaths of high voltage cables on decomposition of ground current and impedance asymmetry of overhead power lines. The final part deals with the influence of those cable sheaths on the zero impedance.

Obsah

Úvod.....	7
1. Indukčnost a podélná impedance.....	9
1.1. Indukčnost a impedance ve smyčce.....	9
1.2. Země jako vodič stacionárního střídavého proudu.....	11
1.3. Vlastní impedance smyčky vodič – zem.....	12
1.4. Vzájemná impedance dvou smyček vodič – zem.....	13
1.5. Trojfázové vedení bez zemních lan.....	14
1.6. Transpozice na vedení.....	16
1.7. Dvojitě vedení s jedním fázovým lanem.....	17
1.8.1. Modifikované matice.....	18
2. Míra impedanční nesymetrie distribučních soustav.....	20
2.1. Neprovádění transpozic vodičů.....	20
2.2. Instalace vodivějších zemních lan.....	21
3. Měření parametrů venkovních vedení.....	26
3.1. Zařízení OMICRON.....	26
3.2. Příprava a průběh měření [5], [6].....	26
3.3. Naměřené parametry vedení 110 kV.....	28
4. Porovnání naměřené a vypočtené míry reaktanční nesymetrie vedení 110 kV.....	33
4.1. Vedení V903, V904 – dvojpotah.....	34
4.2. Vedení V110.....	34
4.3. Vedení V114.....	35
4.4. Vedení V383.....	36
4.5. Vyhodnocení.....	37
5. Analýza specifik venkovních vedení v městském prostředí.....	39
5.1. Cesty zpětných proudů.....	39
5.2. Rozložení zpětných proudů.....	46
5.3. Vliv uzemněných plášťů kabelů VN na netočivou impedanci.....	50
5.3.1. Přejít do složkových soustav.....	51
5.3.2. Výpočtový model pro netočivou impedanci.....	53
Závěr.....	57
Použitá literatura.....	59

Úvod

Tato diplomová práce navazuje na moji bakalářskou práci, která zdůrazňuje potřebu měření podélných parametrů venkovních vedení pro potřeby co nejpřesnějšího nastavení distančních ochran. Tentokrát se však podrobněji zaměříme na parametry jednotlivých fází, především na reaktanci a míru reaktanční nesymetrie.

Abychom mohli hodnotit míru reaktanční nesymetrie z různých hledisek, musel být nejprve vytvořen program v SW MatLab, který sestaví impedanční matici vedení, se kterou můžeme dále pracovat. Pro tento výpočet bude použit postup, který podrobně vysvětluje v kapitole 1. V dalších úvahách budeme impedanční matici používat k dalším výpočtům.

Druhá kapitola se zaměří na skutečné zdroje reaktanční nesymetrie venkovních vedení, a to především na problematiku instalace vodivějších zemnicích lan. Pomocí výpočtu ověříme, jak vodivost zemnicího lana reaktanční nesymetrii ovlivňuje.

Třetí kapitola se bude zabývat měřením fázových parametrů venkovních vedení. Nejprve nás seznámí se zařízením OMICRON, které se pro toto měření používá. Dále vyhodnotí parametry naměřené na vedeních napěťové hladiny 110 kV společnosti PREdistribuce a EON. Spočítá velikosti jejich reaktančních nesymetrií, pokusí se výsledky odůvodnit a najít souvislost s prostředím, ve kterém se tato vedení nacházejí.

Již ve výše zmíněné bakalářské práci byla prokázána odlišnost od vypočítaných a naměřených parametrů vedení. Proto se čtvrtá kapitola opět zaměří na porovnání těchto hodnot získaných dvěma cestami – měřením a výpočtem. Na několika vedeních společnosti PREdistribuce ověří velikost odchylky míry impedanční nesymetrie zjištěné výpočtem od skutečných hodnot změřených přímo na vedení.

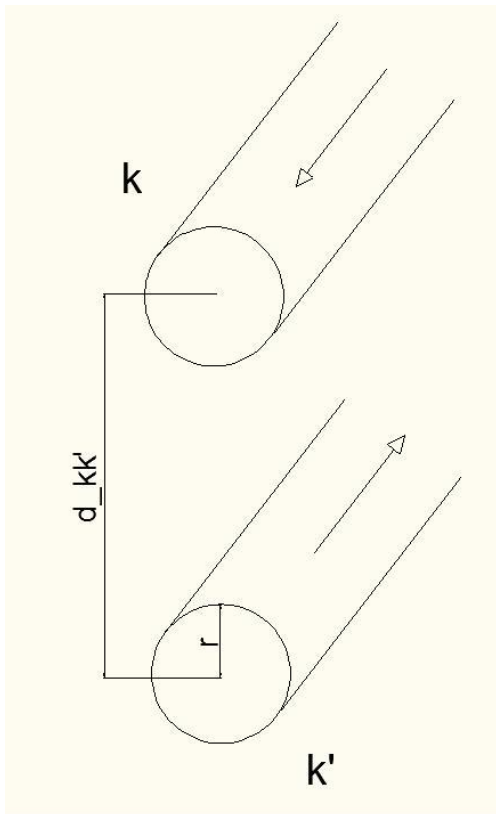
Při porovnání změřených parametrů vedení společností PREdistribuce a EON se dostáváme ke srovnání dvou různých prostředí – venkovské a městské. Proto se pátá kapitola pokusí ukázat, jaký vliv má městské prostředí na parametry venkovního vedení. Pro tyto potřeby nám poslouží výpočtový model, ve kterém zohledníme vliv uzemněných plášťů kabelů vysokého napětí, které ve městech, jako je Praha, často vedou společně s koridory venkovních vedení.

Co nejpřesnější znalost parametrů vedení je důležitá především pro přesné nastavení distančních ochran. Jedním z parametrů, které nastavovací protokol obsahuje je netočivá impedance chráněného vedení. Proto se také pokusíme ověřit, jaký vliv má městské prostředí na tuto veličinu. Poslouží nám k tomu opět výpočtový model, ve kterém budeme uvažovat uzemněné pláště kabelů vysokého napětí v blízkosti koridoru venkovního vedení.

1. Indukčnost a podélná impedance

Cílem následujícího postupu je vytvoření matematického modelu, kterým nahradíme soustavu rovnoběžných vodičů, které jsou rovnoběžné se zemí, soustavou dvojic vodičů. Ke každému vodiči budeme mít jeden fiktivní vodič. Tohoto modelu se používá pro usnadnění výpočtů.

1.1. Indukčnost a impedance ve smyčce



Obr. 1 Smyčka dvou rovnoběžných vodičů

Máme smyčku tvořenou dvěma přímými rovnoběžnými vodiči kruhového průřezu o poloměru r . Označme l délku vodičů a d jejich kolmou vzdálenost. Oba vodiče mají stejné konstrukční provedení. Předpokládáme následující:

$$r \ll d \ll l; \quad d'_{kk} = d.$$

Fázory proudů v obou vodičích budou mít stejnou velikost, ale opačný směr. Můžeme tedy psát:

$$\hat{I}_k = \hat{I}'_k. \quad (1)$$

Uvažujeme části vodičů ve značné vzdálenosti od konců vodičů. Deformaci magnetického pole vlivem konců vodičů můžeme tedy zanedbat.

Z Maxwellových rovnic odvodíme vnitřní a vnější indukčnost na jednotku délky vodiče. Pro vnitřní indukčnost platí vztah:

$$L_{ik} = \frac{\mu_0 \mu_{rv}}{8 \pi} \alpha \quad (2)$$

kde μ_{rv} je poměrná permeabilita materiálu vodiče,

α respektuje nerovnoměrné rozdělení proudu po průřezu vodiče.

Pro vnější indukčnost je:

$$L_{ek} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{R}{r}. \quad (3)$$

Tento vztah popisuje magnetický tok vně vodiče. Poloměr $R \gg d$ má prozatím neurčenou, ale konečnou hodnotu.

Pro magnetický tok od vodiče k' v záběru s vodičem k můžeme psát:

$$L'_{kk} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{R}{d}. \quad (4)$$

Celkové napětí \hat{U}_{ik} v posuzovaném vodiči bude podle [1]:

$$-\hat{U}_{ik} = j\omega [(L_{ik} + L_{ek})\hat{I}_k + L_{kk'}\hat{I}'_k] = j\omega(L_{ik} + L_{ek} - L_{kk'})\hat{I}_k = j\omega L_{kv}\hat{I}_k, \quad (5)$$

kde L_{kv} je indukčnost jednoho vodiče na jednotku délky. Pokud dosadíme za jednotlivé indukčnosti v přechodí rovnici ze vztahů výše, dostaneme:

$$L_{kv} = \frac{\mu_0 \mu_{rv}}{8 \pi} \alpha + \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{R}{r} + \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{R}{d}. \quad (6)$$

Nyní zaměníme přirozené logaritmy za dekadické a dosadíme hodnotu permeability $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. Tím získáme výraz:

$$L_{kv} = 0,05 \mu_{rv} \alpha + 0,46 \log \frac{d}{r}. \quad (7)$$

Dále zavedeme činitel ξ :

$$0,05 \mu_{rv} \alpha = 0,46 \log \xi^{-1} \rightarrow \xi = 10^{\frac{0,05 \mu_{rv} \alpha}{0,46}}. \quad (8)$$

Pro indukčnost jednoho vodiče na jednotku délky můžeme tedy psát:

$$L_{kv} = 0,46 \log \frac{d}{\xi r}. \quad (9)$$

Chceme – li dostat impedanci jednoho vodiče ve smyčce dvou vodičů na jednotku délky, musíme respektovat ještě činný odpor vodiče. Ten vyjádříme rezistancí R_k na jednotku délky vodiče. Pro impedanci potom platí vztah:

$$\hat{Z}_{kv} = R_k + j\omega L_{kv} = R_k + j\omega 0,46 \cdot 10^{-6} \log \frac{d}{\xi r}. \quad (10)$$

1.2. Země jako vodič stacionárního střídavého proudu

Elektrické poměry v zemi závisí především na konfiguraci elektrod a na odporu jednotlivých vrstev země, která není homogenní. V prostoru podél vedení se v zemi uplatní vliv magnetického pole vedení. Hustota střídavého proudu v zemi je nerovnoměrná, což je zapříčiněno jevem podobným skinefektu.

Chceme – li hustotu tohoto střídavého proudu počítat, máme na výběr z několika možností, z nichž každá počítá s jinými vlastnostmi země jako vodiče střídavého proudu. Všechny tyto varianty výpočtu dochází k závěru, že střídavý proud v zemi vede přesně podél vedení a pod lany vedení taky dosahuje hustota proudu maxima. Ve směru do hloubky a do stran hustota rychle klesá.

Nejpoužívanějším postupem výpočtu je koncepce Rūdenbergova, a to z důvodu menší matematické náročnosti. I přes to nám tato metoda dává dostatečně přesné výsledky, aby bylo možné ji v praxi používat. Rūdenberg předpokládal následující [1]:

- rezistivita země má konečnou konstantní velikost a země neobsahuje feromagnetické materiály
- namísto skutečného vodiče nad zemí, ve výšce h , se uvažuje model, kde je smyšlený vodič na povrchu země a zemine zemina se v poloválci kolem vodiče o poloměru h vypouští
- proud vodičem je sinusový bez obsahu vyšších harmonických s konstantní amplitudou

Řešením Maxwellových rovnic dojdeme ke vztahu pro proudovou hustotu jako funkci vzdálenosti x od vodiče, která je podle [1]:

$$\hat{f}(x) = \left(\frac{\pi^2 f}{\rho} + j \frac{4\pi f}{\rho} \ln \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{x \sqrt{f}} \right) \cdot 10^{-7} I_g . \quad (11)$$

1.3. Vlastní impedance smyčky vodič – zem

Magnetický tok vyvolaný proudem v zemi je spřažen s proudem v elementární vrstvě uvažovaného půlválce. Zde v proudovém vlákně vyvolá úbytek napětí na jednotku délky:

$$\Delta \hat{U}(h) = \rho \hat{f}(h) = \left(\pi^2 f + j 4\pi f \ln \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{h \sqrt{f}} \right) \cdot 10^{-7} \hat{I}_g . \quad (12)$$

Pro stejný úbytek napětí můžeme také psát:

$$\Delta \hat{U}(h) = (R_{1g} + j 2\pi f L_{1g}) \hat{I}_g . \quad (13)$$

Porovnáme – li reálné části předchozích dvou rovnic, získáme rezistanci země na jednotku délky:

$$R_{1g} = \pi^2 f \cdot 10^{-7} [\Omega \cdot m^{-1}] . \quad (14)$$

Pro rezistanci smyčky vodič – zem na jednotku délky tedy platí vztah:

$$R_{kk} = R_k + R_{1g} . \quad (15)$$

Při výpočtu indukčnosti smyčky musíme uvažovat vliv všech magnetických toků spřažených se smyčkou:

- magnetický tok uvnitř vodiče nad zemí $L_{ik} = 0,46 \log \frac{1}{\xi}$ (16)

- magnetický tok ve vzduchu $L_{ik} = 0,46 \log \frac{h}{r}$ (17)

- magnetický tok v zemi $L_{ik} = 0,46 \log \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{h \sqrt{f}}$ (18)

Dále zavádíme označení:

$$D_g = \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\sqrt{f}} \quad (19)$$

kde D_g je hloubka fiktivního vodiče v zemi, který by vedl proud. Celková indukčnost smyčky vodič zem bude součtem tří výše zmíněných indukčností:

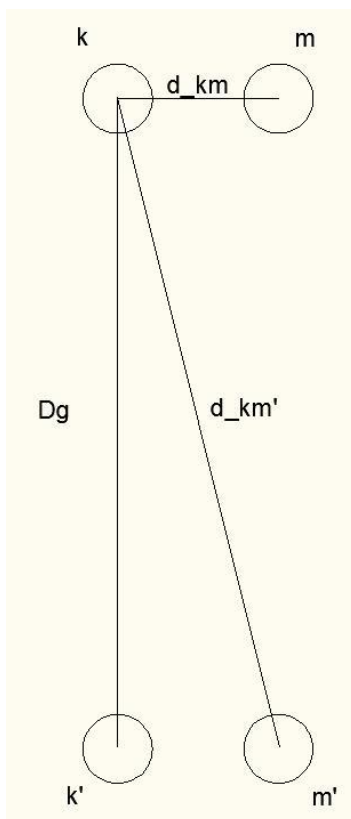
$$L_{kk} = L_{ik} + L_{ek} + L_{1g} = 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r}. \quad (20)$$

Impedanci ve smyčce vodič – zem na jednotku délky nazýváme vlastní impedanci a platí pro ni vztah:

$$L_{kk} = R_{kk} + j\omega L_{kk} = R_k + R_{1g} + 0,46 \cdot 10^{-6} \log \frac{D_g}{\xi r} \quad [H/m]. \quad (21)$$

1.4. Vzájemná impedance dvou smyček vodič – zem

Pro získání vzájemné impedance dvou smyček vodič – zem budeme uvažovat dvouvodičové jednofázové vedení. S ohledem na magnetické pole, které bude vedení vytvářet, ho můžeme považovat za rovnocenné dvěma vedením vodič – zem, a to proto, že zpětné proudy v zemi se budou navzájem kompenzovat a ve výsledku tedy nemají žádný účinek. Toto platí tehdy, je – li vzdálenost mezi skutečnými vodiči menší nebo rovna jejich výšce nad zemí. [1]



Obr. 2 Dvě smyčky fázový vodič - zem

Pokud si vypočteme hodnoty D_g a d_{km} , zjistíme, že platí:

$$D_g \gg d_{km}$$

Můžeme tedy se zanedbatelnou nepřesností tvrdit, že vzdálenosti vodičů k, m od fiktivních vodičů k', m' jsou stejné. Platí tedy:

$$d_{km'} = d_{k'm} = d_{kk'} = d_{mm'} . \quad (22)$$

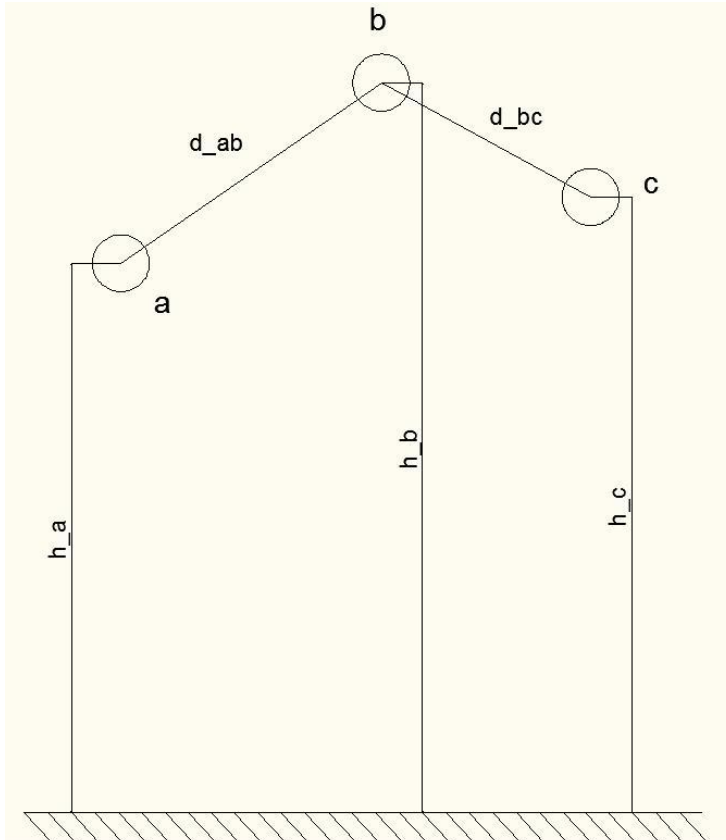
Jako důsledek předcházejících tvrzení bude téměř nulové magnetické působení fiktivních vodičů k', m' na vodiče skutečné k, m. Abychom mohli určit výslednou impedanci pro jeden vodič, musíme zaměnit dvou vodičové vedení za dvě smyčky vodič – zem. Tuto impedanci určíme jako rozdíl impedance jedné smyčky vodič – zem a impedance vzájemné, ke které chceme tímto postupem dospět:

$$\hat{Z}_{kv} = \hat{Z}_{kk} - \hat{Z}_{km} \rightarrow \hat{Z}_{km} = \hat{Z}_{kk} - \hat{Z}_{kv} . \quad (23)$$

Když dosadíme za impedance \hat{Z}_{kk} a \hat{Z}_{kv} a zavedeme, že $d = d_{km}$, dostaneme po úpravě vztah:

$$\hat{Z}_{km} = R_{1g} + j\omega 0,46 \cdot 10^{-6} \log \frac{D_g}{d_{km}} . \quad (24)$$

1.5. Trojfázové vedení bez zemních lan



Obr. 3 Trojfázové vedení bez zemních lan

Pro úbytky napětí v jednotlivých fázích podle [1] platí:

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (25)$$

Matici impedancí na pravé straně rovnice nazýváme impedanční maticí vedení. Podle předchozího maticového zápisu můžeme psát:

$$\hat{Z}_{kk} = R_{kk} + jX_{kk} = R_k + R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{\xi r}, \quad (26)$$

pro diagonální prvek matice impedancí. Pro prvky mimo diagonálu můžeme psát:

$$\hat{Z}_{km} = R_{km} + jX_{km} = R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{d_{km}}. \quad (27)$$

Pro provozní impedace fází platí následující vztahy:

$$\hat{Z}_a = \frac{(\hat{Z}_{aa}\hat{I}_a + \hat{Z}_{ab}\hat{I}_b + \hat{Z}_{ac}\hat{I}_c)}{\hat{I}_a}, \quad (28)$$

$$\hat{Z}_b = \frac{(\hat{Z}_{ba}\hat{I}_a + \hat{Z}_{bb}\hat{I}_b + \hat{Z}_{bc}\hat{I}_c)}{\hat{I}_b}, \quad (29)$$

$$\hat{Z}_c = \frac{(\hat{Z}_{ca}\hat{I}_a + \hat{Z}_{cb}\hat{I}_b + \hat{Z}_{cc}\hat{I}_c)}{\hat{I}_c}. \quad (30)$$

Pokud je zátěž symetrická, tak pro fázory proudu platí:

$$\hat{I}_a = I_a; \hat{I}_b = \hat{a}^2 I_a; \hat{I}_c = \hat{a} I_a, \quad (31)$$

$$\text{kde } \hat{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\text{a } \hat{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}.$$

Ze vztahů pro výpočet jednotlivých prvků impedanční matice je patrné, že diagonální prvky budou pro všechny fáze stejné. To už však neplatí pro prvky mimo diagonálu. Vzdálenost mezi vodiči d_{km} není pro všechny vodiče stejná, z čehož jasně plyne různá velikost mezifázových impedancí. Z toho důvodu budou různé i provozní impedance jednotlivých fází a tato impedanční nesymetrie nám logicky způsobí nesymetrii napětěvovou. Zdroje impedanční nesymetrie budou podrobněji rozebrány v dalších kapitolách této práce.

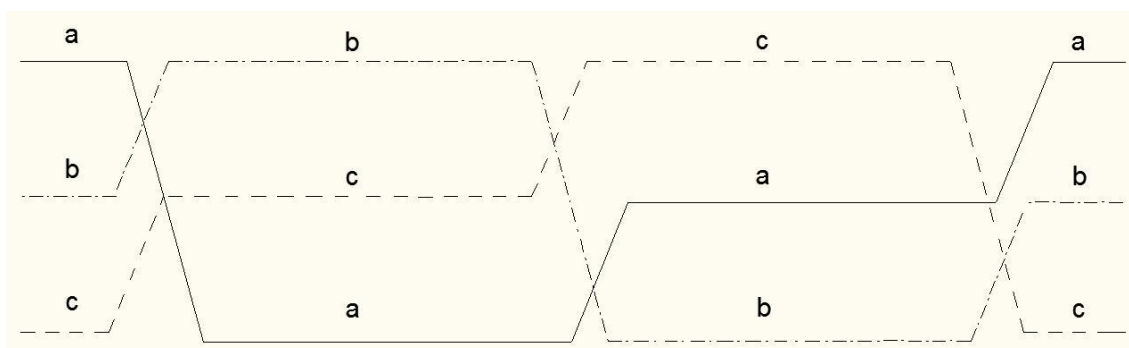
Vedení by bylo symetrické, pokud by platila rovnost:

$$d_{ab} = d_{ac} = d_{bc}. \quad (32)$$

Toto je však stav v praxi těžko dosažitelný. Proto se pro symetrizaci vedení používá křížení (transpozice) fázových vodičů.

1.6. Transpozice na vedení

K dosažení impedanční, tedy i napěťové, symetrie se provádí transpozice vodičů, která spočívá ve výměně pozic vodičů tak, aby každý ze tří fázových vodičů byl po každou 1/3 délky vedení v jiné pozici.



Obr. 4 Schéma transpozice na vedení

U velmi dlouhých vedení je možné provést toto úplné vykřížení i vícekrát. Budeme – li uvažovat každý transpoziční úsek o délce 1/3 km, bude podle [1] pro úbytek napětí na 1 km vedení platit vztah:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \left(\begin{bmatrix} \hat{Z}_{11} & \hat{Z}_{12} & \hat{Z}_{13} \\ \hat{Z}_{12} & \hat{Z}_{22} & \hat{Z}_{23} \\ \hat{Z}_{13} & \hat{Z}_{23} & \hat{Z}_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{33} & \hat{Z}_{13} & \hat{Z}_{23} \\ \hat{Z}_{13} & \hat{Z}_{11} & \hat{Z}_{12} \\ \hat{Z}_{23} & \hat{Z}_{12} & \hat{Z}_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{22} & \hat{Z}_{23} & \hat{Z}_{12} \\ \hat{Z}_{23} & \hat{Z}_{33} & \hat{Z}_{13} \\ \hat{Z}_{12} & \hat{Z}_{13} & \hat{Z}_{11} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \rightarrow \\ &\rightarrow \begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z} & \hat{Z}' & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z} & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z}' & \hat{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (33) \end{aligned}$$

Je patrné, že pro diagonální prvky impedanční matice bude po provedení transpozice platit:

$$\hat{Z} = \frac{1}{3} (\hat{Z}_{11} + \hat{Z}_{22} + \hat{Z}_{33}) = R_1 + R_{1g} + j0,1445 \log \frac{Dg}{\xi r}. \quad (34)$$

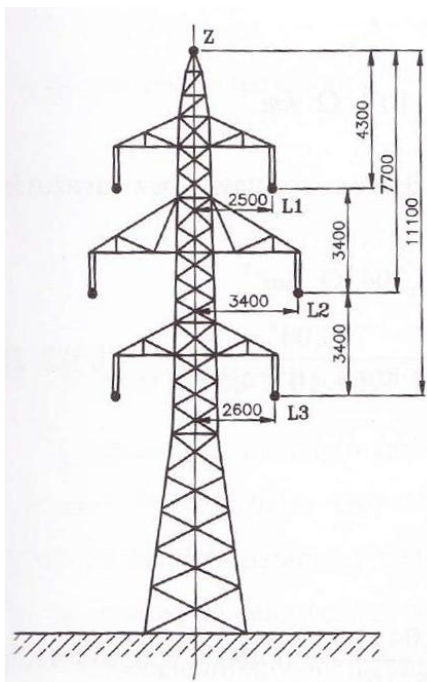
Pro prvky mimo diagonálu (vzájemné impedance smyček) bude platit:

$$\hat{Z}' = \frac{1}{3}(\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{13} + \hat{Z}_{23}) = R_{1g} + j0,1445 \log \frac{Dg}{d}, \quad (35)$$

$$\text{kde } d = \sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}}.$$

Z ekonomických důvodů se dnes transpozice provádějí jen málo, a to u velmi dlouhých vedení. Hlavním důvodem je vyšší cena transpozičního stožáru. Podle normy ČSN 34 1100 je povinnost provádět úplné vykřížení vodičů na vedeních vvn na 100 km délky. [2]

1.7. Dvojitě vedení s jedním fázovým lanem



Obr. 5 Příklad stožáru typu soudek, zdroj [6]

Takové vedení tvoří dvě trojfázové linky ukotvené na jedněch stožárech. Fázovým vodičům jedné linky přiřadíme indexy a, b, c (odpovídající fázím L1, L2, L3) a stejným způsobem přiřadíme fázovým vodičům druhé linky indexy A, B, C. Zamníčí lano označíme indexem z.

Zemní lana jsou většinou na stožárech dobře uzemněna. Jejich hlavními úkoly jsou „zachytávání“ úderů blesků do vedení a snižování krokového napětí při nesymetrických zemních zkratech. Dále snižují indukovaná elektrostatická přepětí. Používá se buď jednoho zemního lana u vedení se stožáry typu soudek nebo donau, případně dvou zemních lan, např. u stožárů typu kočka.

Podle postupu uvedeného výše si pro vedení se stožáry typu soudek sestavíme impedanční matici. Použijeme pro to rovnici vyjadřující úbytky napětí v jednotlivých fázových vodičích a v zemním laně. Pro tyto úbytky napětí platí:

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \\ \Delta \hat{U}_A \\ \Delta \hat{U}_B \\ \Delta \hat{U}_C \\ \Delta \hat{U}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{aA} & \hat{Z}_{aB} & \hat{Z}_{aC} & \hat{Z}_{az} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bA} & \hat{Z}_{bB} & \hat{Z}_{bC} & \hat{Z}_{bz} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cA} & \hat{Z}_{cB} & \hat{Z}_{cC} & \hat{Z}_{cz} \\ \hat{Z}_{Aa} & \hat{Z}_{Ab} & \hat{Z}_{Ac} & \hat{Z}_{AA} & \hat{Z}_{AB} & \hat{Z}_{AC} & \hat{Z}_{Az} \\ \hat{Z}_{Ba} & \hat{Z}_{Bb} & \hat{Z}_{Bc} & \hat{Z}_{BA} & \hat{Z}_{BB} & \hat{Z}_{BC} & \hat{Z}_{Bz} \\ \hat{Z}_{Ca} & \hat{Z}_{Cb} & \hat{Z}_{Cc} & \hat{Z}_{CA} & \hat{Z}_{CB} & \hat{Z}_{CC} & \hat{Z}_{Cz} \\ \hat{Z}_{za} & \hat{Z}_{zb} & \hat{Z}_{zc} & \hat{Z}_{zA} & \hat{Z}_{zB} & \hat{Z}_{zC} & \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \\ \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \\ \hat{I}_z \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} [\Delta \hat{U}_v] \\ [\Delta \hat{U}_V] \\ [\Delta \hat{U}_z] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{vv}] & [\hat{Z}_{vV}] & [\hat{Z}_{vz}] \\ [\hat{Z}_{Vv}] & [\hat{Z}_{VV}] & [\hat{Z}_{Vz}] \\ [\hat{Z}_{zv}] & [\hat{Z}_{zV}] & [\hat{Z}_{zz}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\hat{I}_v] \\ [\hat{I}_V] \\ [\hat{I}_z] \end{bmatrix} \quad (37)$$

Diagonální blok $[\hat{Z}_{vv}]$ obsahuje vlastní a vzájemné impedance potahu v, diagonální blok $[\hat{Z}_{VV}]$ obsahuje vlastní a vzájemné impedance potahu V a diagonální blok $[\hat{Z}_{zz}]$ vyjadřuje vlastní a vzájemné impedance mezi zemnicími lany. V tomto případě, kdy máme jen jedno zemnicí lano, obsahuje jen vlastní impedanci zemnicího lana.

Prvky mimo diagonálu vyjadřují vzájemné impedanční vazby mezi potahy, případně mezi potahy a zemnicím lanem.

1.8.1. Modifikované matice

Tímto postupem vytvoříme impedanční matici pro vedení bez zemnicího lana, které by se chovalo stejně jako naše vedení se zemnicím lanem. Tato modifikace je nutná pro převod impedancí do souměrných složek.

Pro zemnicí lana se přijímá zjednodušení, že nejsou uzemněna jen na stožárech, ale po celé délce. Můžeme tedy psát:

$$\Delta \hat{U}_z = 0 \rightarrow [\Delta \hat{U}_z] = [0].$$

V maticovém zápise nám tímto zůstává neznámou fázor proudů v zemnicích lanech $[\hat{I}_z]$. Když uvážíme předchozí předpoklad, můžeme maticový zápis rozepsat do následujících tří rovnic:

$$[\Delta \hat{U}_v] = [\hat{Z}_{vv}] \cdot [\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{vV}] \cdot [\hat{I}_V] + [\hat{Z}_{vz}] \cdot [\hat{I}_z], \quad (38)$$

$$[\Delta \hat{U}_V] = [\hat{Z}_{Vv}] \cdot [\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{VV}] \cdot [\hat{I}_V] + [\hat{Z}_{Vz}] \cdot [\hat{I}_z], \quad (39)$$

$$[\Delta \hat{U}_z] = [\hat{Z}_{zv}] \cdot [\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{zV}] \cdot [\hat{I}_V] + [\hat{Z}_{zz}] \cdot [\hat{I}_z] = [0]. \quad (40)$$

Tyto rovnice nám umožní spočítat proudy v zemních lanech, a to přenásobením třetí rovnice maticí $[\hat{Z}_{zz}]^{-1}$:

$$[\hat{I}_z] = -[\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot ([\hat{Z}_{zv}][\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{zV}][\hat{I}_V]). \quad (41)$$

Dále nám tyto rovnice umožní samotnou modifikaci vedení. Když dosadíme za $[\hat{I}_z]$, můžeme psát:

$$[\Delta \hat{U}_v] = ([\hat{Z}_{vv}] - [\hat{Z}_{vz}][\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{zv}])[\hat{I}_v] + ([\hat{Z}_{vV}] - [\hat{Z}_{vz}][\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{zV}])[\hat{I}_V], \quad (42)$$

$$[\Delta \hat{U}_V] = ([\hat{Z}_{Vv}] - [\hat{Z}_{Vz}][\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{zv}])[\hat{I}_v] + ([\hat{Z}_{VV}] - [\hat{Z}_{Vz}][\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{zV}])[\hat{I}_V]. \quad (43)$$

Nyní rovnice zjednodušíme nahrazením výrazů v okrouhlých závorkách:

$$[\Delta \hat{U}_v] = [\hat{Z}_{vvM}][\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{vVM}][\hat{I}_V], \quad (44)$$

$$[\Delta \hat{U}_V] = [\hat{Z}_{VvM}][\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{VVM}][\hat{I}_V]. \quad (45)$$

Pro modifikovanou matici vedení můžeme podle předchozích rovnic a jejich zjednodušení napsat vztah:

$$[\hat{Z}_M] = \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{vvM}] & [\hat{Z}_{vVM}] \\ [\hat{Z}_{VvM}] & [\hat{Z}_{VVM}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aaM} & \hat{Z}_{abM} & \hat{Z}_{acM} & \hat{Z}_{aAM} & \hat{Z}_{aBM} & \hat{Z}_{aCM} \\ \hat{Z}_{baM} & \hat{Z}_{bbM} & \hat{Z}_{bcM} & \hat{Z}_{bAM} & \hat{Z}_{bBM} & \hat{Z}_{bCM} \\ \hat{Z}_{caM} & \hat{Z}_{cbM} & \hat{Z}_{ccM} & \hat{Z}_{cAM} & \hat{Z}_{cBM} & \hat{Z}_{cCM} \\ \hat{Z}_{AaM} & \hat{Z}_{AbM} & \hat{Z}_{AcM} & \hat{Z}_{AAM} & \hat{Z}_{ABM} & \hat{Z}_{ACM} \\ \hat{Z}_{BaM} & \hat{Z}_{BbM} & \hat{Z}_{BcM} & \hat{Z}_{BAM} & \hat{Z}_{BBM} & \hat{Z}_{BCM} \\ \hat{Z}_{CaM} & \hat{Z}_{CbM} & \hat{Z}_{CcM} & \hat{Z}_{CAM} & \hat{Z}_{CBM} & \hat{Z}_{CCM} \end{bmatrix}. \quad (46)$$

2. Míra impedanční nesymetrie distribučních soustav

V kapitole 1 jsme teoreticky odvodili důvody impedanční nesymetrie vedení. Jsou to různé vzájemné vzdálenosti fázových vodičů a různé vzdálenosti jednotlivých fázových vodičů od zemních lan. Také jsme si vysvětlili možnost odstranění nesymetrie. Nyní se zaměříme na příčiny impedanční nesymetrie vyplývající z praxe, protože obecně můžeme říci, že impedanční nesymetrie vedení neustále narůstá. Můžeme nalézt dvě hlavní příčiny a těm se také budeme v dalším textu věnovat. Jedná se o:

- neprovádění transpozic vodičů
- instalaci vodivějších zemnicích lan.

2.1. Neprovádění transpozic vodičů

Již od počátků výstavby třífázových vedení bylo z již zmíněných teoretických a praktických důvodů stanoveno, že je potřeba provádět úplné vykřížení fázových vodičů. Tato úplná transpozice tedy znamená, že každá fáze má vést po 1/3 délky vedení v jiné pozici. U prvních vedení distribuční (i přenosové) soustavy bylo toto ustanovení dodržováno. Ovšem s tím, jak se soustava rozrůstala, vznikala nová odběrná místa a nové rozvodny, docházelo ke zkracování a zasmyčkování vedení a transpozice vodičů se začala zanedbávat. Dalším důvodem upouštění od transpozic byly ekonomické aspekty jejich provádění. Náklady na výstavbu transpozičního stožáru jsou výrazně vyšší než náklady na výstavbu běžných nosných a výstužných stožárů. Tento trend vedl v případě přenosových soustav až k ustanovení normy ČSN 34 1100, která říká, že na vedeních VVN musí být provedena úplná transpozice při délce vedení delší než 100 km. [2]

Pro výpočty a modely zkratových poměrů v energetických sítích, které jsou nezbytné pro nastavení ochran, potřebujeme znát především podélné parametry vedení, tedy rezistanci a reaktanci vedení.

Vlastní parametry, které nám udávají impedance jednotlivých fázových vodičů a jejich smyček se používají jen při modelování elektromagnetických přechodných dějů.

Při výpočtech nastavení ochran všech běžných výrobců se však používají parametry složkové. Jejich použití však naráží na problém neprovádění transpozic na vedení, protože složkové soustavy předpokládají provedení úplné transpozice fázových vodičů. Tato chyba se projeví u měření impedance ochranou, kdy získáme stejné výsledky pro všechny tři fáze.

Dalším důsledkem neprovádění transpozic na vedení je výraznější ovlivnění parametrů vedlejším vedením ve společném koridoru. Výsledkem tohoto vlivu může být značná nepřesnost, často dokonce nemožnost měření parametrů těchto vedení. To je zapříčiněno indukci rušivých napětí od paralelních potahů, které dosahují tak vysokých hodnot, že je nejsme schopni běžně eliminovat.

2.2. Instalace vodivějších zemnicích lan

Dříve byla při výstavbách vedení instalována železná zemnicí lana. Jak se vedení postupně rekonstruovala nebo opravovala, začala se postupně tato železná zemnicí lana nahrazovat lany typu AlFe nebo lany kombinovanými. Tato kombinovaná lana jsou tvořena lanem AlFe a integrovanými optickými vodiči, které slouží pro komunikaci. Kombinovaná a AlFe lana mají však mnohem menší impedanci, než dříve používaná lana železná. Tím se mění cesta zpětných zemnicích proudů při jednopólových poruchách.

Instalujeme – li na vedení vodivější zemnicí lano, vzroste nám podíl zpětného proudu tekoucího tímto lanem na úkor proudu tekoucího zemí. To nám zapříčiní nárůst impedanční nesymetrie jednotlivých fází.

Není – li na vedení žádné zemnicí lano, tečou zpětné proudu pouze zemí a vzdálenost této cesty od fázových vodičů je dostatečná na to, abychom mohli zanedbat různou vzdálenost jednotlivých fází.

Instalací zemnicího lana se nám situace mění. Jak již bylo zmíněno, část zpětného proudu přebírá zemnicí lano. O tom, jak velkou část tohoto proudu zemnicí lano převezme, rozhoduje impedance tohoto lana, a to především její činná složka. Odlišnosti ve vzdálenostech zemnicího lana od jednotlivých fázových vodičů již nejsou, v porovnání s velikostí této vzdálenosti, zanedbatelné. Proto se nám přiblížení cesty zpětných proudů projeví v odlišnosti velikostí impedancí jednotlivých fází, tedy v míře impedanční nesymetrie. Čím bude zemnicí lano vodivější, tím větší část zpětného

proudu převezme, což se projeví v nárůstu impedanční nesymetrie. Tento vliv se především projeví u nesymetrie reaktanční.

Pro ukázání závislosti reaktanční nesymetrie vedení na typu zemnicího lana byl proveden výpočet v SW MatLab, kde bylo počítáno s parametry nejčastěji používaných železných a AlFe lan. V tabulce 1 můžeme vidět vypočítané parametry vedení pro jednotlivá zemnicí lana. Vstupní parametry výpočtu byly získány z podnikové normy pro lana používaná společností PREdistribuce. Výpočty byly provedeny pro typ stožáru soudek.

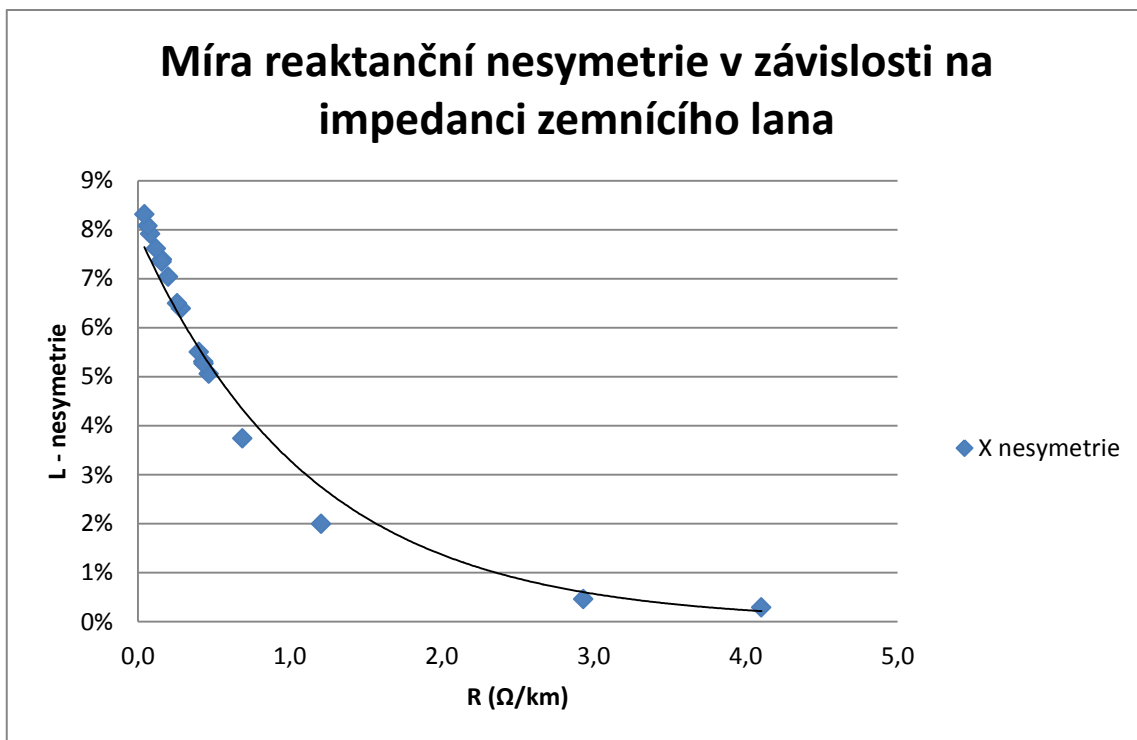
Tabulka 1 Závislost parametrů vedení na typu zemnicího lana

Označení lana	Průměr (mm)	R lana (Ω/km)	Rv-L1 (Ω/km)	Xv-L1 (Ω/km)	Rv-L2 (Ω/km)	Xv-L2 (Ω/km)	Rv-L3 (Ω/km)	Xv-L3 (Ω/km)
Fe50	4,50	4,1030	0,1718	0,5457	0,1698	0,5467	0,1689	0,5473
Fe70	5,30	2,9310	0,1732	0,5437	0,1705	0,5454	0,1693	0,5462
AlFe 25/4	6,75	1,2058	0,2500	0,6648	0,2397	0,6734	0,2343	0,6781
AlFe 42/7	9,00	0,6871	0,2495	0,6307	0,2383	0,6461	0,2325	0,6543
AlFe 60/14	12,00	0,4662	0,2406	0,6081	0,2305	0,6282	0,2253	0,6389
AlFe 70/11	12,00	0,4010	0,2351	0,6013	0,2258	0,6229	0,2210	0,6344
AlFe 70/11-1	11,70	0,4308	0,2376	0,6045	0,2279	0,6254	0,2230	0,6366
AlFe 70/11-2	11,25	0,4337	0,2376	0,6050	0,2280	0,6259	0,2230	0,6369
AlFe 100/25	14,60	0,2843	0,2226	0,5882	0,2154	0,6128	0,2118	0,6258
AlFe 110/22	15,00	0,2591	0,2191	0,5861	0,2125	0,6108	0,2093	0,6242
AlFe 150/25	17,00	0,1999	0,2102	0,5796	0,2052	0,6063	0,2028	0,6204
AlFe 180/59	20,40	0,1593	0,2035	0,5749	0,1997	0,6027	0,1979	0,6174
AlFe 185/31	19,10	0,1562	0,2026	0,5756	0,1990	0,6032	0,1974	0,6179
AlFe 240/39	21,75	0,1181	0,1954	0,5722	0,1931	0,6007	0,1992	0,6158
AlFe 350/59	26,40	0,0816	0,1880	0,5686	0,1870	0,5981	0,1868	0,6136
AlFe 445/17	29,65	0,0645	0,1842	0,5667	0,1840	0,5967	0,1841	0,6125
AlFe 680/83	35,80	0,0425	0,1790	0,5639	0,1797	0,5946	0,1804	0,6108

V tabulce 2 jsou uvedeny vypočítané reaktanční nesymetrie vedení pro jednotlivé typy zemnicích lan. Pro jasné znázornění této závislosti slouží graf na obrázku 1.

Tabulka 2 - Závislost reaktanční nesymetrie na typu zemnicího lana

Označení lana	Průměr (mm)	R (Ω/km)	X-nesym.
Fe50	4,50	4,1030	0,29%
Fe70	5,30	2,9310	0,46%
AlFe 25/4	6,75	1,2058	2,00%
AlFe 42/7	9,00	0,6871	3,74%
AlFe 60/14	12,00	0,4662	5,06%
AlFe 70/11	12,00	0,4010	5,50%
AlFe 70/11-1	11,70	0,4308	5,31%
AlFe 70/11-2	11,25	0,4337	5,27%
AlFe 100/25	14,60	0,2843	6,39%
AlFe 110/22	15,00	0,2591	6,50%
AlFe 150/25	17,00	0,1999	7,04%
AlFe 180/59	20,40	0,1593	7,39%
AlFe 185/31	19,10	0,1562	7,35%
AlFe 240/39	21,75	0,1181	7,62%
AlFe 350/59	26,40	0,0816	7,91%
AlFe 445/17	29,65	0,0645	8,08%
AlFe 680/83	35,80	0,0425	8,32%



Obrázek 6 - Graf závislosti reaktanční nesymetrie na typu zemního lana

Podíváme – li se do tabulek s vypočítanými hodnotami, nebo do výsledného grafu, bude nám již na první pohled jasné, že instalace vodivějších zemních lan skutečně výrazně ovlivňuje míru reaktanční nesymetrie vedení.

Když použijeme jako zemní lano typ AlFe 380/83, dosáhne míra námi zkoumané reaktanční nesymetrie hodnoty 8,32 %. Takto vysoká míra nesymetrie nám může výrazně ovlivnit výsledky měření impedance distančními ochranami.

Když bychom se zaměřili na chybu, které se u takového vedení může dopustit lokátor poruchy, zjistili bychom, že jeho výsledek bude zatížen chybou 83 m na 1 km vedení. U vedení o délce 20 km se tato chyba může vyšplhat i na více než 1,6 km, což může v případě lokalizace poruchy jejího následného odstranění výrazně prodloužit dobu odstávky elektrické energie.

Pokud by k poruše došlo v blízkosti hranice impedanční zóny distanční ochrany, může být vlivem této chyby špatně vyhodnocena porucha a ochrana může působit ve vyšší zóně, tedy s delším časem, což může mít za následek nejen delší odstávku elektrické energie, ale také možné větší škody na majetku v důsledku delší doby trvání poruchy.

Když se zaměříme na opačný konec tabulky s výsledky, můžeme vidět, že reaktanční nesymetrie v případě instalace železného lana, tedy lana s větší impedancí, klesá téměř k nule.

Výše zmíněná kombinovaná lana s optickými vodiči nejsou uvedena, protože jejich parametry se mnoho neliší od lan typu AlFe, z nichž konstrukčně vycházejí a dosáhli bychom tedy podobných výsledků.

3. Měření parametrů venkovních vedení

3.1. Zařízení OMICRON

Ve společnosti PREdistribuce a.s. se pro měření parametrů venkovních vedení VVN používá multifunkční zařízení OMICRON. Posuzované parametry vedení, které se v této práci dále posuzují, byly naměřeny tímto zařízením. Kromě měření parametrů vedení můžeme toto zařízení použít i k jiným úkolům (např. jako proudový zdroj při zkoušení nadproudových ochran, apod.).

Měřicí souprava se skládá z těchto částí [4]:

- Měřicí zařízení CPC 100, které se používá pro testy a měření, je vybaveno integrovaným počítačem, obrazovkou a základními ovládacími prvky. Má mnoho předdefinovaných funkcí (např. měření přístrojových transformátorů proudu a napětí, měření odporu, atd.) a může být také použito jako univerzální zdroj 400 A stejnosměrných (při napětí 4 -4,5 V) a 800 A střídavých (při napětí 6,1 – 6,5 V) s frekvencí 10 – 400 Hz.
- Vazební jednotka CP CU1 rozšiřuje funkce CPC 100 o další možnosti, jako je měření impedance a zemních poměrů venkovních vedení, měření krokových a dotykových napětí, měření vzájemných impedančních vazeb paralelních venkovních vedení atd. Jednotka má v sobě proudový transformátor s převodem 100/2,5 A a napěťový transformátor s převodem 600/30 V.
- Uzemňovací jednotka CP GB1 se používá k bezpečnému propojení měřicí soupravy s vedením. Má v sobě tři bleskojistky (pro každou fázi) a v případě překročení mezní hladiny napětí je schopna odvádět proudy až 30 kA.

3.2. Příprava a průběh měření [5], [6]

Nejprve připojíme uzemňovací jednotku GB1 na jednotlivé fáze vedení, což se provádí pomocí tzv. zkratů, které jsou k dispozici na rozvodně. Abychom se mohli připojit bezpečně, musí být vedení odpojené a uzemněné na obou koncích. V přípravě na měření také propojíme příslušné svorky CPC 100 a CP CU1, ale zatím se nepřipojujeme k uzemňovací jednotce. Vedení odzemníme na straně, kde měříme a na protějším konci ho necháme uzemněné. Nyní na měřících hrotech jednotky GB1 zkontrolujeme velikost

napětí, které se nám může ve vedení indukovat. Podle velikosti tohoto napětí a délky měřeného vedení nastavíme proudový rozsah vazební jednotky CP CU1.

Je – li indukované napětí menší než 50 V, můžeme použít všechny proudové rozsahy a budeme se řídit délkou vedení. Zjistíme – li napětí větší, použijeme tyto rozsahy:

- při napětí 100 V, proud max. 50 A
- při napětí 250 V, proud max. 20 A
- při napětí 500 V a více, nedoporučuje se měřit

Při měření na napětí 500 V a více dochází k proražení bleskojistek, které jsou instalovány pod měřicími hroty uzemňovací jednotky.

Při zohlednění délky vedení jsou rozsahy rozvrženy následovně:

- délka 2 km, proud 100 A
- délka 1 – 10 km, proud 50 A
- délka 5 – 50 km, proud 20 A
- délka větší než 20 km, proud 10 A.

Rozložení rozsahů měření najdeme v uživatelské příručce zařízení OMICRON.

Můžeme si všimnout, že rozsahy se navzájem překrývají. Vždy se snažíme měřit při co největším proudu. V případě, že použijeme nevhodný rozsah, CPC 100 měření samo ukončí a vrátí chybovou hlášku.

„CPC 100 umožňuje nastavit šablony měření, ale má v sobě také šablonu dodávanou výrobcem. Tato šablona provede měření při proudu nastaveném v CP CU1. Měření trvá vždy 2 sekundy a probíhá dvakrát při frekvencích 30 Hz a 70 Hz, jednou při frekvencích 90 Hz, 110 Hz a 130 Hz. CPC 100 zaznamená hodnoty napětí a proudu, při kterých měření probíhalo a také naměřené hodnoty odporu a reaktance. Průběh série měření je signalizován svítící LED diodou. Po proměření všech požadovaných frekvencí se měření automaticky přeruší, aby mohla obsluha přepojit kabely na zemnicí jednotce. Po přepojení je možno spustit další sérii měření.

Během měření je vhodné kontrolovat měřené hodnoty na displeji, abychom ověřili, že skutečně měříme požadovanou smyčku. Nejlepší možnost kontroly nám poskytují naměřené hodnoty odporu. Pohybují – li se řádově v desítkách ohmů, je

pravděpodobné, že je měřený okruh někde rozpojen, např. může být vedení na opačném konci odzemněno. Jsou – li naměřené hodnoty odporu velmi nízké (téměř nulové), s největší pravděpodobností měříme tzv. minimální smyčku. To znamená, že je na bližším konci vedení zkrat, který může nastat například proražením bleskojistky.

Výsledky měření můžeme uložit na hard disk integrovaný v jednotce CPC 100, výsledky se ukládají ve formátu XML. Ve stejném formátu můžeme vše uložit na externí USB disk. Do programu MS Excel je možno doinstalovat šablony, které zpracují naměřené hodnoty do přehledné tabulky.“ [6]

3.3. Naměřené parametry vedení 110 kV

Systematické měření venkovních vedení napěťové hladiny 110 kV zařízením Omicron, jehož funkci jsme popsali výše, probíhá v České republice ve společnostech PREdistribuce a EON. Porovnání vedení těchto dvou společností bylo vybráno z toho důvodu, že vedení PREdistribuce vedou převážně na území Prahy, tedy v městském prostředí, zatímco koridory linek EON se nacházejí v jižní části České republiky a vedou převážně mimo města.

Cílem porovnání těchto dvou odlišných oblastí, z hlediska prostředí, v nichž se vedení nachází, je zjištění, zda má městské prostředí vliv na reaktanční nesymetrii. Další odlišností, taktéž vyplývající z faktu, že vedení PREdistribuce jsou jen na území Prahy, je délka vedení. Obecně platí, že vedení EON jsou výrazně delší.

Budeme se zabývat nesymetrií reaktanční, protože odpor vedení je závislý jen na typu použitých lan, jejichž parametry jsou nám známy a velikosti odporových nesymetrií jsou v podstatě zanedbatelné.

Důležitý parametr, který se v městském prostředí může od venkovského výrazně lišit, je rezistivita půdy. Na území Prahy je položeno mnoho silových kabelů VN, jejichž uzemněné pláště mohou rezistivitu půdy snižovat. Mohou také měnit cestu zemních proudů, které se přes ně mohou uzavírat. Tento předpoklad se pokusíme v dalších kapitolách této práce potvrdit nebo vyvrátit výpočtovým modelem.

Z důvodu nedostatečné nebo nejasné dokumentace o vedeních bohužel nevíme, zda byly na vedeních provedeny transpozice, či nikoliv. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativně

krátké linky, je nepravděpodobné, že by transpozice byly využity a nenapovídají tomu ani naměřené hodnoty.

Tabulka 3 - Naměřené parametry vedení PREdi

Vedení	Rozvodna		Naměřené parametry jednotlivých fází (Ω)						Nesymetrie (%)
	číslo	A	B	R-L1	X-L1	R-L2	X-L2	R-L3	
V 100	MAL MALEŠICE	MEX MĚCHOLUPY	1,33	4,93	1,33	4,92	1,38	4,88	0,9%
V 101	MAL MALEŠICE	PJH JIH	1,18	3,42	1,18	3,41	1,22	3,46	1,5%
V 102	MAL MALEŠICE	PJH JIH	1,35	3,60	1,30	3,57	1,27	3,60	0,6%
V 103	XOD CHODOV	PJH JIH	0,56	3,61	0,51	3,47	0,51	3,57	4,0%
V 104	XOD CHODOV	PJH JIH	0,48	3,57	0,50	3,60	0,57	3,48	3,4%
V 107	XOD CHODOV	PJH JIH	0,48	3,63	0,48	3,59	0,57	3,49	3,7%
V 108	XOD CHODOV	PJH JIH	0,57	3,42	0,47	3,51	0,48	3,56	3,9%
V 109	MAL MALEŠICE	LET LETŇANY	1,75	5,75	1,72	5,83	1,71	5,88	2,3%
V 110	MAL MALEŠICE	PCM Č. MOST	0,83	2,57	0,83	2,58	0,83	2,51	2,6%
V 111	MAL MALEŠICE	PSE SEVER	1,74	6,29	1,75	6,29	1,77	6,20	1,5%
V 111	PVY VÝCHOD	MAL MALEŠICE	0,55	2,52	0,49	2,56	0,55	2,49	2,7%
V 113	LET LETŇANY	PSE SEVER	0,90	3,00	0,90	3,05	0,92	2,92	4,1%
V 114	PCM Č. MOST	PSE SEVER	1,56	5,08	1,56	5,24	1,55	5,21	3,0%
V 120	PZA ZÁPAD	PSE SEVER	2,06	9,37	2,06	9,32	2,11	9,17	2,1%
V 303	REP ŘEPORYJE	XOD CHODOV	1,37	7,26	1,36	7,20	1,32	7,43	3,1%
V 304	REP ŘEPORYJE	XOD CHODOV	1,36	7,01	1,35	6,96	1,28	7,28	4,4%
V 383	PZL ZLIČÍN	PZA ZÁPAD	0,56	3,94	0,57	3,84	0,62	3,96	3,2%
V 385	REP ŘEPORYJE	PZL ZLIČÍN	0,53	3,69	0,60	3,52	0,57	3,72	5,3%
V 389	PSE SEVER	CVR Č. VRCH	1,70	6,84	1,75	6,78	1,70	6,71	2,0%
V 919	TRE TŘEBORADICE	PSE SEVER	0,84	4,90	0,88	4,88	0,84	4,95	1,5%
V 1923	REP ŘEPORYJE	ZBR ZBRASLAV	1,15	6,86	1,18	6,55	1,14	6,90	5,1%
V 1924	REP ŘEPORYJE	ZBR ZBRASLAV	1,24	7,00	1,26	6,61	1,19	6,95	5,5%

V tabulce 3 můžeme vidět parametry naměřené na venkovních vedení 110 kV společnosti PREdistribuce. Reaktanční nesymetrie se pohybuje v rozmezí od 0,6 % až po 5,5 %.

Vedení s nejvyšší mírou nesymetrie vede mezi rozvodnami Řeporyje a Zbraslav (poslední v seznamu linek) a je dlouhé 12,2 km. Pokud bychom chtěly vyjádřit vzdálenostní chybu lokátoru případné poruchy, zjistíme, že se při zaměření může dopustit nepřesnosti až 670 m. Tato nepřesnost může ovlivnit rychlost lokalizaci poruchy a následnou opravu zařízení. Při vyhodnocování poruchy distanční ochranou může dokonce nastat situace, že se porucha projeví do vyšší zóny s delším časem vypnutí.

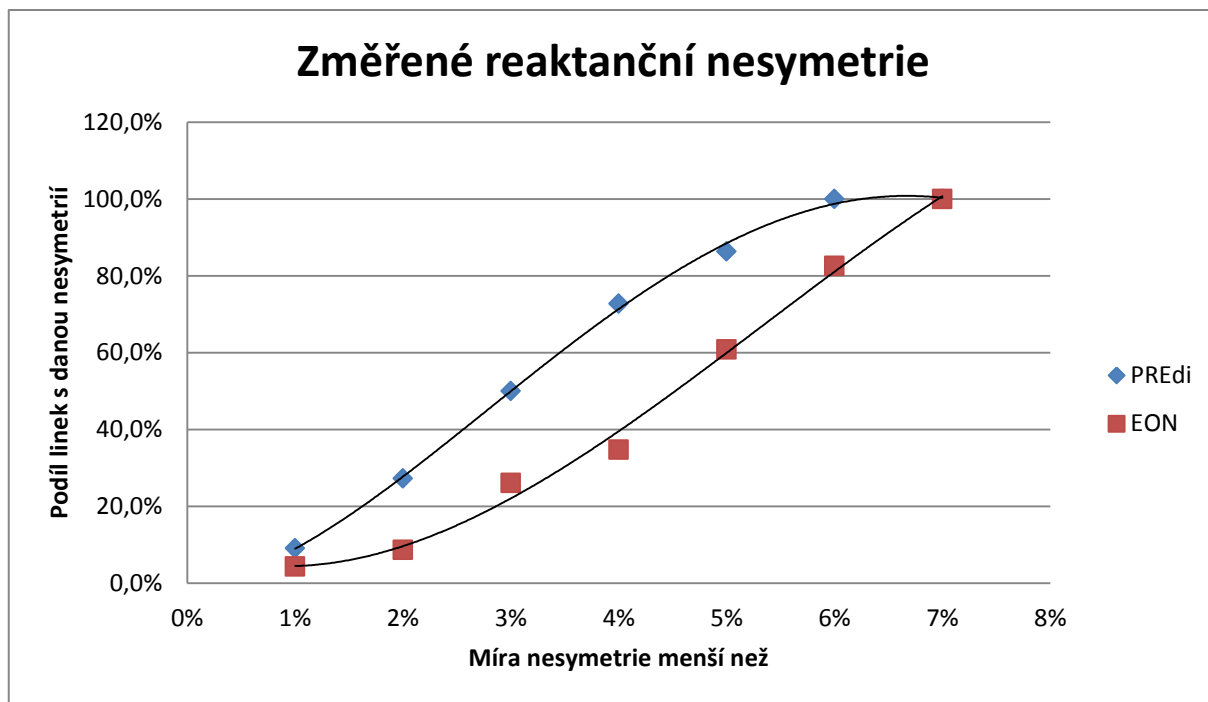
Průměrná délka měřených vedení PREDistribuce je 9,3 km a průměrná míra změřené reaktanční nesymetrie jsou 3 %. Z toho snadno získáme průměrnou chybu při výpočtu vzdálenosti poruchy, která bude 280 m.

Nyní se zaměříme na vedení společnosti EON, tedy linky vedoucí v jižní části České republiky, převážně ve venkovském prostředí.

Tabulka 4 - Naměřené parametry vedení EON

Vedení	Naměřené parametry jednotlivých fází (Ω)						Nesymetrie (%)
	R-L1	X-L1	R-L2	X-L2	R-L3	X-L3	
V 1363	2,44	7,64	2,46	7,61	2,48	7,44	2,65%
V 1367	3,77	11,25	3,77	11,26	3,75	11,29	0,33%
V 1368	5,02	14,72	4,88	15,61	4,92	15,33	6,05%
V 1369	5,92	18,16	5,86	18,49	5,95	17,96	2,91%
V 1370	4,84	14,91	4,89	14,68	4,86	14,75	1,56%
V 1375	5,05	18,91	5,01	19,19	5,15	18,35	4,58%
V 1376	5,16	18,28	5,03	19,11	5,05	18,83	4,54%
V 1377	3,97	19,39	4,06	18,62	4,00	19,01	4,11%
V 1378	3,34	10,51	3,35	9,91	3,33	10,32	6,05%
V 1379	3,39	10,33	3,39	10,52	3,39	9,92	6,04%
V 1322	0,86	2,95	0,86	3,01	0,87	2,85	5,32%
V 1323	1,71	5,36	1,68	5,63	1,69	5,54	5,10%
V 1324	0,58	1,53	0,57	1,61	0,57	1,58	4,98%
V 1331	3,89	14,76	3,86	15,01	3,98	14,30	5,00%
V 1332	1,42	4,36	1,44	4,63	1,43	4,54	6,06%
V 1333	3,88	13,53	3,75	14,28	3,80	14,02	5,51%
V 1334	7,02	24,39	6,81	25,66	6,89	25,21	5,20%
V 1341	0,20	0,65	0,21	0,63	0,20	0,66	4,95%
V 1343	2,66	7,67	2,61	7,91	2,67	7,64	3,52%
V 1344	1,76	14,91	1,82	14,48	1,75	14,95	3,22%
V 1345	1,74	14,88	1,80	14,55	1,75	14,89	2,32%
V 1349	1,68	5,58	1,66	5,68	1,71	5,37	5,76%
V 1350	7,88	23,32	7,76	23,85	7,89	23,25	2,54%

Prostudujeme – li si tabulky s naměřenou mírou nesymetrií vedení PREDistribuce a vedení EON, zjistíme, že vedení jihočeského distributora vykazují vyšší míru nesymetrie. Její průměrná hodnota dosahuje 4,3 %. O těchto vedení bohužel nemáme informaci o jejich délce, abychom mohli vyjádřit případnou chybu ve výpočtu lokátoru poruch. Uvážíme – li však fakta, že se jedná o delší vedení než v případě PREDi a míra nesymetrie je větší, můžeme obecně říci, že chyba určení vzdálenosti poruchy bude výrazně vyšší. Pro jasnější znázornění rozdílu v míře reaktanční nesymetrie těchto dvou skupin vedení se můžeme podívat na následující graf, který udává procentuelní podíl vedení s nesymetrií menší, než je hodnota na horizontální ose.



Obrázek 7 - Míra reaktanční nesymetrie vedení společností PRE distribuce a EON

Z grafu je jasně patrné, že linie vedení PREdistribuce je nad linií EON, což je znamení toho, že se téměř 90 % vedení PREdistribuce vejde do hranice pětiprocentní nesymetrie, zatímco u vedení EON se do této hranice vejde jen přibližně 60 % vedení.

Důvodem pro vyšší nesymetrii těchto „venkovských“ vedení může být již zmiňovaná rezistivita půdy a vliv uzemněných plášťů kabelů VN na území Prahy. Vlivem vyšší impedance zpětné cesty zemí (tedy neuvažujeme – li zemní lano) se větší část zpětných proudů vrací zemním lanem, což u vedení EON přibližuje zemní cestu fázovým vodičům. To je pravděpodobně důvod vyšší míry reaktanční nesymetrie.

U vedení PREdistribuce se mohou zpětné proudy uzavírat zemí snáze, z důvodu snížené rezistivity zemní cesty (opět si představme zemní cestu bez zemního lana) a uzemnění vodivých plášťů kabelů VN. Tím zemním lanem teče menší část zpětných proudů než u vedení EON a cesta těchto proudů je tedy vzdálenější od fázových vodičů.

Teorii uvedenou v předchozích dvou odstavcích se v rámci této práce pokusíme ukázat také výpočtovým modelem.

4. Porovnání naměřené a vypočtené míry reaktanční nesymetrie vedení 110 kV

Při přípravě nastavovacích dokumentů pro ochrany vedení (především distanční ochrany) se převážně používají parametry chráněných vedení získané výpočtem. Protože se při výpočtech přijímají různá zjednodušení, nemusí tyto hodnoty odpovídat realitě. Následující srovnání má ukázat, jak moc se mohou naměřené a vypočítané hodnoty lišit.

V software MatLab byl vytvořen výpočtový program pro sestavení impedanční matice vedení a tedy pro výpočet impedancí jednotlivých fází. Tento program funguje pro vedení se dvěma potahy na jedné stožárech a jedním zemnicím lanem a využívá postupu uvedeného v kapitole 1. (Zdrojový kód je přílohou této diplomové práce, stejně jako zdrojový kód pro výpočet vedení s více zemními lany.) Pro všechny výpočty byl uvažován stožár typu soudek.

Bylo počítáno s rezistivitou země $75 \Omega/\text{m}$. Průměrnou hodnotu, se kterou se běžně počítá udávají tabulky $100 \Omega/\text{m}$. Protože všechna posuzovaná vedení vedou ve městském prostředí (na území Prahy), byla uvažována hodnota nižší. Rezistivitu země v městském prostředí mohou snižovat například uzemněné pláště kabelů VN, které vedou společně nebo poblíž koridorů venkovních vedení.

Pro porovnání míry reaktančních nesymetrií venkovních vedení 110 kV byly vybrány tři linky společnosti PREdistribuce, a to dvojpotah linek V903, V904, dále linky V110, V114 a V383.

Pro výpočet parametrů vybraných linek byly jako vstupy použity podnikové normy společnosti PREdistribuce uvádějící vlastnosti použitých AlFe lan a zemních lan.

Změřené parametry byly získány měřením přístrojem OMICRON, které bylo popsáno již dříve.

4.1. Vedení V903, V904 – dvojpotah

Délka $l = 5,198 \text{ km}$

Fázové vodiče – 185AlFe6

$r = 9,55 \text{ mm}; \rho = 0,1562 \text{ } \Omega/\text{km}$

Zemní lano – AA/ACS 187/40

$r = 10,4 \text{ mm}; \rho = 0,166 \text{ } \Omega/\text{km}$

Vypočítané parametry

$$\hat{Z}_{L1} = (1,054 + 3,030j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L2} = (1,035 + 3,167j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L3} = (1,028 + 3,238j)\Omega$$

Vypočítaná reaktanční nesymetrie je 6,8 %.

Změřené parametry

$$\hat{Z}_{L1} = (1,065 + 3,110j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L2} = (1,053 + 3,219j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L3} = (1,068 + 3,104j)\Omega$$

Změřená reaktanční nesymetrie je 3,7 %.

4.2. Vedení V110

Délka $l = 4,750 \text{ km}$

Fázové vodiče – 240AlFe6

$r = 10,87 \text{ mm}; \rho = 0,1181 \text{ } \Omega/\text{km}$

Zemní lano – AA/ACS 127/40

$r = 8,65 \text{ mm}; \rho = 0,235 \text{ } \Omega/\text{km}$

Vypočítané parametry

$$\hat{Z}_{L1} = (0,831 + 2,758j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L2} = (0,806 + 2,876j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L3} = (0,794 + 2,938j)\Omega$$

Vypočítaná reaktanční nesymetrie je 6,5 %.

Změřené parametry

$$\hat{Z}_{L1} = (0,832 + 2,573j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L2} = (0,834 + 2,561j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L3} = (0,832 + 2,508j)\Omega$$

Změřená reaktanční nesymetrie je 2,5 %.

4.3. Vedení V114

Délka $l = 9,850 \text{ km}$

Fázové vodiče – 240AlFe6

$r = 10,87 \text{ mm}; \rho = 0,1181 \Omega/\text{km}$

Zemní lano – AA/ACS 127/40

$r = 8,65 \text{ mm}; \rho = 0,235 \Omega/\text{km}$

(stejná lana jako u vedení V110)

Vypočítané parametry

$$\hat{Z}_{L1} = (1,723 + 5,775j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L2} = (1,671 + 5,964j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L3} = (1,647 + 6,092j)\Omega$$

Vypočítaná reaktanční nesymetrie je 5,5 %.

Změřené parametry

$$\hat{Z}_{L1} = (1,562 + 5,081j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L2} = (1,561 + 5,239j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L3} = (1,554 + 5,214j)\Omega$$

Změřená reaktanční nesymetrie je 3,1 %.

4.4. Vedení V383

Délka $l = 7,370 \text{ km}$

Fázové vodiče – 680AlFe6

$r = 17,90 \text{ mm}; \rho = 0,0425 \Omega/\text{km}$

Zemní lano – AA/ACS 127/40

$r = 12,33 \text{ mm}; \rho = 0,125 \Omega/\text{km}$

Vypočítané parametry

$$\hat{Z}_{L1} = (0,605 + 3,979j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L2} = (0,590 + 4,179j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L3} = (0,583 + 4,285j)\Omega$$

Vypočítaná reaktanční nesymetrie je 7,7 %.

Změřené parametry

$$\hat{Z}_{L1} = (0,563 + 3,943j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L2} = (0,572 + 3,838j)\Omega$$

$$\hat{Z}_{L3} = (0,624 + 3,962j)\Omega$$

Změřená reaktanční nesymetrie je 3,2 %.

4.5. Vyhodnocení

Pro názornější vyjádření rozdílné míry nesymetrie při výpočtu a při měření se můžeme podívat do následující tabulky se získanými výsledky.

Tabulka 5 - Porovnání změřené a vypočítané nesymetrie

Vedení	Vypočtená nesym. (%)	Změřená nesym. (%)
V903,V904	6,8%	3,7%
V110	6,5%	2,5%
V114	5,5%	3,1%
V383	7,7%	3,2%

Již na první pohled je patrně, že vypočtené reaktanční nesymetrie jsou výrazně vyšší, než nesymetrie skutečně naměřené, a to zhruba dvojnásobně. Budeme – li hledat důvod zjištěného rozdílu, můžeme se zaměřit na hodnotu rezistivity půdy, která byla při výpočtu použita. Tato veličina se sice při výpočtu vyskytuje v logaritmu, ale i tak může její špatné zvolení zapříčinit značné nepřesnosti. Její velikost se totiž pohybuje ve velkém rozmezí (od 10^{-1} Ω .m pro slanou mořskou vodu do 10^9 Ω .m pro suchý písek). Námí uvažovaná hodnota 75 Ω .m platí pro vlhkou hlínu.

Z toho plyne další možný zdroj nepřesnosti, a to zanedbání vlivu klimatických podmínek v době měření. Hlavním důvodem neuvažování klimatických podmínek je fakt, že nám tato data (informace o počasí – teplotě vzduchu, srážkách, sněhové pokrývce, apod.) nejsou známa.

Pokusíme se dojít k takové hodnotě rezistivity půdy, aby se po výpočtu parametrů shodovala reaktanční nesymetrie s reálně naměřenými hodnotami. Výpočet provedeme jednoduchou změnou vstupního parametru rezistivity půdy ve výpočtovém programu. Tuto hodnotu se pokusíme určit u vedení V114.

K naměřené hodnotě reaktanční nesymetrie dojdeme úpravou velikosti rezistivity půdy ve výpočtu na 0,08 Ω .m, což je, jak bylo uvedeno výše, přibližně hodnota rezistivity pro slanou mořskou vodu.

Při této velikosti rezistivity se však stále výrazně liší velikosti vypočítaných a změřených reaktancí, a to o 8 %. Nyní se budeme snažit přizpůsobit velikost rezistivity

půdy tak, abychom docílili odchylky vypočítaných a naměřených reaktancí maximálně 1 %. Takového výsledku docílíme pro hodnotu 0,5 Ω/m .

Z těchto úvah je zřejmé, že námi zvolená velikost rezistivity půdy pro výpočet byla naprosto odlišná od hodnoty, která by nám pro výpočet poskytla výsledky shodné s naměřenými hodnotami.

5. Analýza specifik venkovních vedení v městském prostředí

5.1. Cesty zpětných proudů

Jak nám již ukázalo porovnání impedančních nesymetrií vedení společností EON a PREDistribuce, prostředí, ve kterém se vedení nacházejí, má na jejich parametry určitý vliv. Trasa vedení může ovlivňovat především vlastnosti zpětné zemní cesty a tedy trasu zpětných zemních proudů. Tento předpoklad se v rámci následující kapitoly pokusíme ověřit pomocí výpočtového modelu.

Proudové smyčky se při jednopólových poruchách uzavírají zemí, popřípadě zemnicím lanem, což bylo podrobně probráno už výše. Také jsme již vysvětlili a výpočtem potvrdili, že rozdělení těchto proudů mezi zemnicí lano a zem ovlivňuje vodivost zemnicího lana. Důsledkem různého rozdělení cesty zemních proudů je závislost míry impedanční nesymetrie na vodivosti použitého zemnicího lana.

Nyní budeme na problém nahlížet z opačné strany a pokusíme se prověřit, jak ovlivňuje míru impedanční nesymetrie změna vodivostních poměrů země v okolí koridoru vedení. Na území velkých měst, jako je například Praha, jsou často vedena kabelová vedení napěťové hladiny 22 kV v blízkosti koridorů venkovních vedení napěťové hladiny 110 kV.

Podle statistiky uvedené v [9] je nejpoužívanější typ kabelu v sítích PREDistribuce jednožilový kabel typu 22-AXEKVCEY. Tento typ kabelu se dle podnikové normy skládá z následujících částí [10]:

1. Hliníkové kulaté komprimované jádro
2. Vnitřní polovodivá vrstva
3. Izolace z XLPE
4. Vnější polovodivá vrstva
5. Stínění z měděných drátů a protispirála
6. Vodoblokující separační vrstva proti podélnému šíření vody pod pláštěm
7. PE(E) plášť
8. PVC (Y) plášť.

V našem případě se zaměříme na vrstvu číslo 6, tedy měděné stínění kabelu. Podle normy PNE 34 1050, Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky z roku 2011 slouží kovové stínění nebo kovový plášť pro odvod svodových kapacitních proudů a jednopólových zkratových proudů. Dále ohraničuje elektrické pole kabelu a vytváří ochranu před nebezpečným dotykem. Základním zapojením kovového pláště nebo kovového stínění podle [11] je:

- oboustranné uzemnění
- jednostranné uzemnění
- transpoziční uzemnění.

V našich úvahách se budeme zabývat jen nejčastějším typem zapojení, a to oboustranným uzemněním.

Jelikož kabely VN na území Prahy často vedou poblíž koridorů vedení 110 kV, tvoří uzemněné pláště kabelů ideální cestu pro zpětné proudy vedení. Nabízí se otázka, jak tato změna rozložení tras zpětných proudů ovlivní parametry těchto vedení?

Takovou situaci můžeme namodelovat pomocí výpočtu. Jak bylo již zmíněno v kapitole 1 této práce, v impedanční matici se před její modifikací, kterou vytvoříme model vedení bez fázových lan, vyskytují vlastní impedance jednotlivých zemnicích lan a také impedance smyček zemnicí lano – fázový vodič. Uzemněný plášť kabelu VN můžeme vlastně považovat za další zemnicí lano, které není na stožárech, společně s fázovými vodiči a standardním zemnicím lanem, ale vede v zemi.

Pro tento model byl vytvořen výpočtový program v SW MatLab, který nalezneme v příloze této práce.

Při takové úvaze musíme samozřejmě určit parametry tohoto fiktivního zemnicího lana. Pro náš výpočet jsme uvažovali již výše zmíněný kabel typu 22-AXEKVCEY, který se v PREDistribuce běžně používá pro kabelová vedení s napětím 22 kV. Plášť kabelu je tvořen spirálou z měděných vodičů. Pro stanovení parametrů potřebných pro výpočet, tedy poloměr fiktivního zemnicího lana a jeho rezistance, budeme považovat stínění za svazkový vodič o dvaceti vodičích.

Pro výpočet ekvivalentního poloměru svazkového vodiče použijeme následující vzorec [7]:

$$r_e = \sqrt[n]{n r r_k^{n-1}},$$

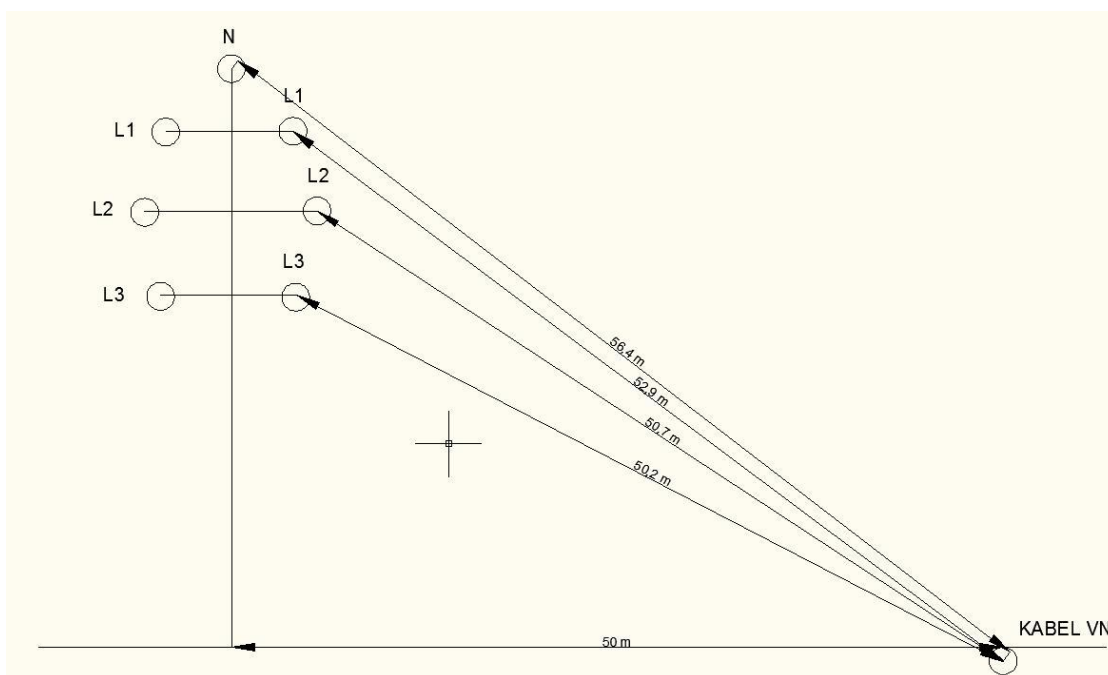
kde dosadíme	počet vodičů	$n = 20$
	poloměr vodičů	$r = 1,25 \text{ mm}$
	poloměr kružnice svazku	$r_k = 17 \text{ mm}$.

A získáme:

$$r_e = \sqrt[20]{20 * 1,25 * 10^{-3} * (17 * 10^{-3})^{19}} = 17,331 \text{ mm}.$$

Dalším vstupním parametrem je rezistance pláště kabelu, kterou získáme z tabulek. Jedná se o měď s průřezem 25 mm^2 . Rezistance bude rovna $0,727 \Omega/\text{km}$.

Jelikož kabely VN nemusí vždy vést přímo společně s vedením 110 kV, jehož parametry prošetřujeme, umístíme při výpočtu kabel do vzdálenosti 50 metrů od paty stožáru venkovního vedení. Pro jednoduchost ho budeme považovat za souběžný s vedením. Konfigurace vodičů uvažovaných při výpočtu je znázorněna na obrázku 8.



Obrázek 8 - Vzdálenosti vodičů venkovního vedení a kabelu VN

Výpočet byl proveden s těmito dalšími vstupními parametry:

- typ stožáru ... soudek
- fázová lana ... 185AlFe6

- poloměr $r = 9,54 \text{ mm}$
- rezistance $\rho = 0,156 \text{ } \Omega/\text{km}$
- zemní lano ... AA/ACS 127/40
 - poloměr $r = 8,65 \text{ mm}$
 - rezistance $\rho = 0,235 \text{ } \Omega/\text{km}$
- rezistivita půdy ... $\rho_p = 100 \text{ } \Omega \text{ m}$
- kabel a jeho plášť ... viz text výše.

V tabulce 6 jsou vypočítané parametry vedení pro počet fiktivních zemních cest (tedy plášťů kabelů VN) od nuly, kdy tvoří zpětnou cestu jen standardní zemní lano a zem, až po deset plášťů kabelů ve vzdálenosti 50 metrů od vedení. V posledním sloupci je vypočítaná míra reaktanční nesymetrie vedení.

Tabulka 6 - Parametry vedení pro fiktivní zemní cesty ve vzdálenosti 50 metrů

Poč.fiktivních zemních cest	Rv-L1 (Ω/km)	Xv-L1 (Ω/km)	Rv-L2 (Ω/km)	Xv-L2 (Ω/km)	Rv-L3 (Ω/km)	Xv-L3 (Ω/km)	X-nesym
0 (jen zem. lano)	0,2138	0,5921	0,2084	0,6173	0,2058	0,6307	6,52%
1	0,2050	0,5781	0,1995	0,6002	0,1968	0,6119	5,85%
2	0,2023	0,5769	0,1965	0,5985	0,1936	0,6100	5,74%
3	0,2012	0,5765	0,1951	0,5979	0,1922	0,6093	5,69%
4	0,2005	0,5763	0,1944	0,5977	0,1915	0,6090	5,67%
5	0,2001	0,5762	0,1940	0,5975	0,1910	0,6089	5,68%
6	0,1999	0,5762	0,1936	0,5974	0,1906	0,6088	5,66%
7	0,1997	0,5761	0,1934	0,5974	0,1904	0,6087	5,66%
8	0,1995	0,5761	0,1932	0,5973	0,1902	0,6086	5,64%
9	0,1994	0,5761	0,1931	0,5973	0,1901	0,6086	5,64%
10	0,1993	0,5760	0,1930	0,5973	0,1899	0,6085	5,64%

Když se v tabulce zaměříme na sloupec reaktančních nesymetrií, můžeme si všimnout vlivu fiktivní zemní cesty na velikost nesymetrie. Přidáním jednoho pláště kabelu se velikost nesymetrie zmenšila o 0,7 %. Přidáváním dalších plášťů kabelů velikost nesymetrie dále klesá, ale čím dál pomaleji a přidáním osmého pláště se tento pokles zastaví.

Pro vysvětlení tohoto jevu se opět zaměříme na postup tvorby impedanční matice uvedený v kapitole 1 této práce. Při výpočtu je zdrojem impedanční nesymetrie různá vzdálenost fázových vodičů od zpětné cesty v podobě zemního lana.

Uvažujeme – li vedení bez zemnicího lana je, vzhledem ke značné hloubce fiktivního vodiče v zemi, která se značí D_g , rozdíl vzdáleností jednotlivých fázových vodičů od zemní cesty zanedbatelný. Když převezme část zpětných proudů zemnicí lano, začne se tato různá vzdálenost projevovat, což bylo ukázáno již dříve. Pokud se ale začnou zemní proudy uzavírat také přes pláště kabelů VN, v našem případě ve vzdálenosti 50 metrů od vedení, bude se cesta zpětných proudů fázovým vodičům opět vzdalovat. Čím více těchto zemních cest přidáme, tím bude tato zpětná cesta více vodivá a převezme větší část zpětných proudů. Tím jsme vysvětlili pokles reaktanční nesymetrie v důsledku toku zpětných proudů přes uzemněné pláště kabelů VN.

Zastavení poklesu nesymetrie při přidání osmi a více kabelů můžeme odůvodnit tím, že pláště kabelů již převzaly maximální možnou část zpětných proudů a další snižování impedance této cesty již nemá na rozložení trasy zemních proudů značný vliv. Toto tvrzení se později pokusíme podložit výpočtem rozložení zpětných proudů mezi jednotlivé cesty.

Dále si můžeme všimnout mírného poklesu velikosti imaginární složky vypočítané impedance, která se přidáváním plášťů kabelů postupně snižuje až o 3 – 4 % pro deset přidávaných zemních cest. Zde se opět dostáváme k možnosti vzniku chyby v nastavení ochrany nebo lokátoru poruchy, protože s vedením zpětných proudů pláště kabelů VN se běžně nepočítá.

Nyní se zaměříme na to, jak se nám změní míra reaktanční nesymetrie, případně její trend, pokud stejným způsobem budeme to výpočtu přidávat pláště kabelů blíže vedení. Zvolíme tedy vzdálenost 20 metrů od paty stožáru a opět budeme postupně přidávat od jednoho do deseti plášťů kabelů. Výsledky, které získáme jsou v tabulce 7.

Tabulka 7 - Parametry vedení pro fiktivní zemní cesty ve vzdálenosti 20 metrů

Poč.fiktivních zemních cest	Rv-L1 (Ω/km)	Xv-L1 (Ω/km)	Rv-L2 (Ω/km)	Xv-L2 (Ω/km)	Rv-L3 (Ω/km)	Xv-L3 (Ω/km)	X-nesym
0 (jen zem. Lano)	0,2138	0,5921	0,2084	0,6173	0,2058	0,6307	6,52%
1	0,2040	0,5659	0,1988	0,5860	0,1963	0,5952	5,18%
2	0,2000	0,5629	0,1943	0,5822	0,1914	0,5907	4,94%
3	0,1982	0,5619	0,1922	0,5809	0,1892	0,5892	4,86%
4	0,1972	0,5614	0,1911	0,5803	0,1879	0,5884	4,81%
5	0,1966	0,5611	0,1904	0,5799	0,1872	0,5879	4,78%
6	0,1961	0,5609	0,1899	0,5796	0,1866	0,5876	4,76%
7	0,1958	0,5608	0,1895	0,5795	0,1862	0,5874	4,74%
8	0,1956	0,5607	0,1893	0,5793	0,1859	0,5872	4,73%
9	0,1954	0,5606	0,1890	0,5792	0,1857	0,5871	4,73%
10	0,1952	0,5605	0,1889	0,5791	0,1855	0,5870	4,73%

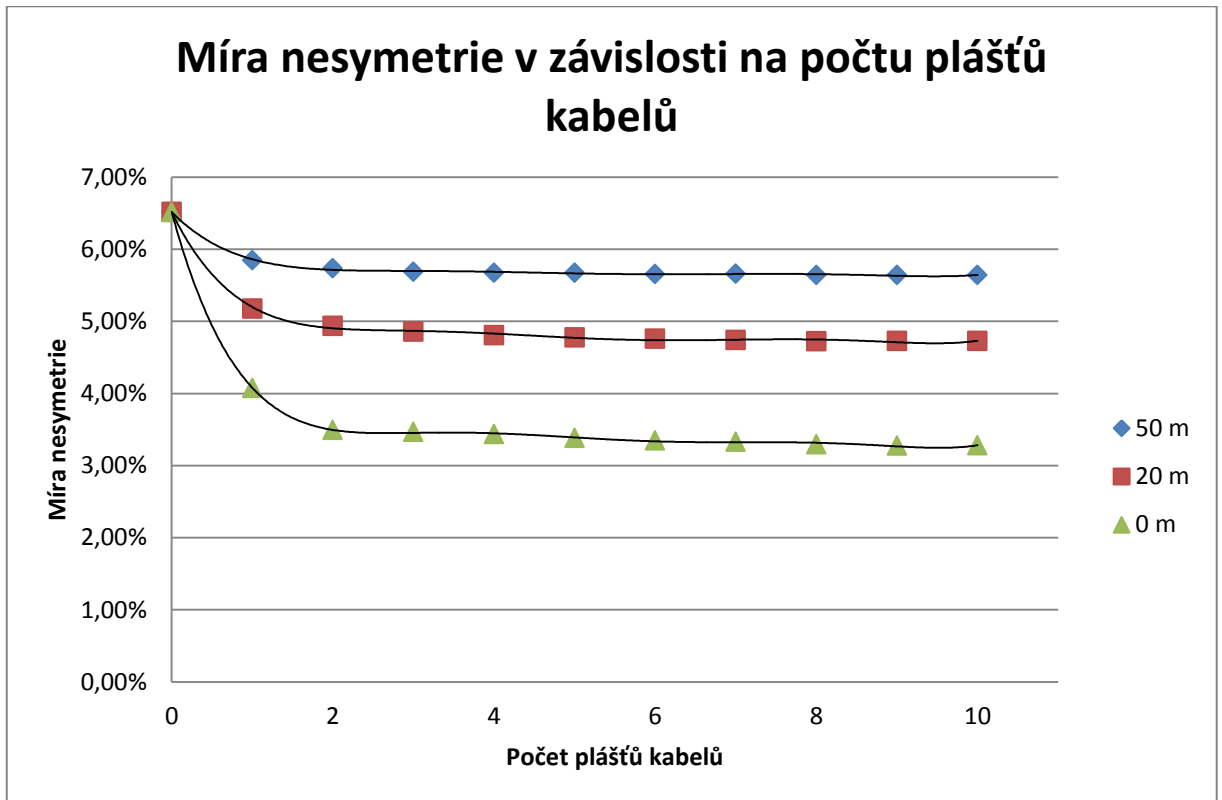
Při porovnání tabulek 6 a 7 vidíme již na první pohled, že posunutím plášťů kabelů blíže stožáru se míra nesymetrie snižuje. Klesající trend při přidávání více plášťů však zůstává shodný.

Konečně posuneme přidávané kabely přímo pod vedení, tedy k patě stožáru. Výsledky výpočtu po přidání kabelů nalezneme v tabulce 8.

Tabulka 8 - Parametry vedení pro fiktivní zemní cesty ve vzdálenosti 0 metrů (u paty stožáru)

Poč.fiktivních zemních cest	Rv-L1 (Ω/km)	Xv-L1 (Ω/km)	Rv-L2 (Ω/km)	Xv-L2 (Ω/km)	Rv-L3 (Ω/km)	Xv-L3 (Ω/km)	X-nesym
0 (jen zem. Lano)	0,2138	0,5921	0,2084	0,6173	0,2058	0,6307	6,52%
1	0,2039	0,5592	0,1989	0,5768	0,1967	0,5820	4,08%
2	0,1991	0,5552	0,1934	0,5716	0,1905	0,5746	3,49%
3	0,1970	0,5538	0,1910	0,5698	0,1877	0,5730	3,47%
4	0,1958	0,5531	0,1896	0,5688	0,1862	0,5721	3,44%
5	0,1951	0,5527	0,1887	0,5683	0,1810	0,5714	3,38%
6	0,1946	0,5524	0,1881	0,5679	0,1844	0,5709	3,35%
7	0,1942	0,5522	0,1877	0,5677	0,1839	0,5706	3,33%
8	0,1939	0,5521	0,1873	0,5675	0,1835	0,5703	3,30%
9	0,1937	0,5520	0,1871	0,5673	0,1832	0,5701	3,28%
10	0,1935	0,5519	0,1869	0,5672	0,1830	0,5700	3,28%

Pro snazší porovnání posuzovaných situací můžeme nahlédnout do následujícího grafu, který ukazuje chování míry reaktanční nesymetrie v závislosti na počtu přidávaných plášťů kabelů pro tři výše uvedené vzdálenosti od paty stožáru.



Obrázek 9 - Míra reaktanční nesymetrie v závislosti na počtu plášťů kabelů VN

Z grafu je jasně patrný shodný klesající trend pro všechny vzdálenosti od stožáru. Po přidání prvního pláště kabelu míra nesymetrie výrazně klesne a přidáváním dalších plášťů se její pokles zpomalí, až přidáním osmého pláště téměř zastaví.

Otázkou zůstává, proč se, navzdory přibližování zemní cesty fázovým vodičům, míra nesymetrie s přibližováním zemní cesty patě stožáru snižuje? Podle již několikrát uvedeného tvrzení, že se nesymetrie zvyšuje společně s poměrem rozdílu vzdálenosti fázových kabelů od zemní cesty k velikosti této vzdálenosti, by měla míra nesymetrie přibližováním plášťů kabelů patě stožáru narůstat.

Vysvětlení můžeme hledat v rozložení zpětného proudu mezi zemnicí lano a pláště kabelů, kterým se budeme podrobněji zabývat níže.

Můžeme říci, že již tímto rozbořením přidávaných cest zpětných proudů jsme pomocí výpočtu odůvodnili výše popisovaný rozdíl velikosti míry reaktanční nesymetrie u

vedení společností PREDistribuce a EON. Můžeme tedy říci, že uzemněné pláště kabelů VN na území Prahy mají na reaktanční nesymetrii vedení prokazatelný vliv.

5.2. Rozložení zpětných proudů

V předchozí části jsme popsali možné cesty zpětných proudů v městském prostředí. Teď se pokusíme ukázat, jak se tyto proudy rozdělí mezi uvažované zpětné cesty. Zaměříme se na to, jak velkou část proudu zemního lana přejímají uzemněné pláště kabelů VN, které do výpočtu přidáváme výše popsaným způsobem.

Pro výpočet proudů v zemních lanech použijeme rovnici (41) z první kapitoly této práce. Proudů obou potahů si musíme zvolit. Protože nás nezajímají velikosti proudů, ale jejich poměrné rozdělení mezi zemnicí lano a pláště kabelů, můžeme si proudy potahů zvolit tak, aby byl výpočet co nejjednodušší. Z toho důvodu budeme jeden z potahů na stožáru „soudek“ považovat za nezatížený a jeho proud bude tedy nulový. Pro druhý potah zvolíme jednotkový proud. Impedanční nesymetrie nás z pohledu distančních ochran a lokátoru poruchy zajímá především v případě jednofázové poruchy. V tomto případě teče většina proudu postiženou fází a proudy v dalších fázích můžeme považovat za nulové. Pro výpočet tedy zvolíme proudy jednotlivých fází následovně:

$$I_{L1} = 1$$

$$I_{L2} = 0$$

$$I_{L3} = 0$$

Výpočtem zjistíme, že rozložení zemních proudů mezi zemnicí lano a pláště kabelů je závislé na vzdálenosti kabelů od vedení. Získané hodnoty ukazují tabulky 9, 10 a 11.

Tabulka 9 - Rozložení zemního proudu pro pláště kabelů 50 metrů od paty stožáru

Poč.fiktivních zemních cest	I _{zem.lano} (%)	I _{pláště} (%)	I _{země} (%)
0	41,12%	0,00%	58,88%
1	37,90%	15,20%	46,90%
2	37,51%	17,57%	44,92%
3	37,38%	18,49%	44,12%
4	37,32%	18,98%	43,70%
5	37,28%	19,29%	43,43%
6	37,26%	19,49%	43,25%
7	37,24%	19,64%	43,12%
8	37,23%	19,76%	43,02%
9	37,22%	19,85%	42,94%
10	37,21%	19,92%	42,87%

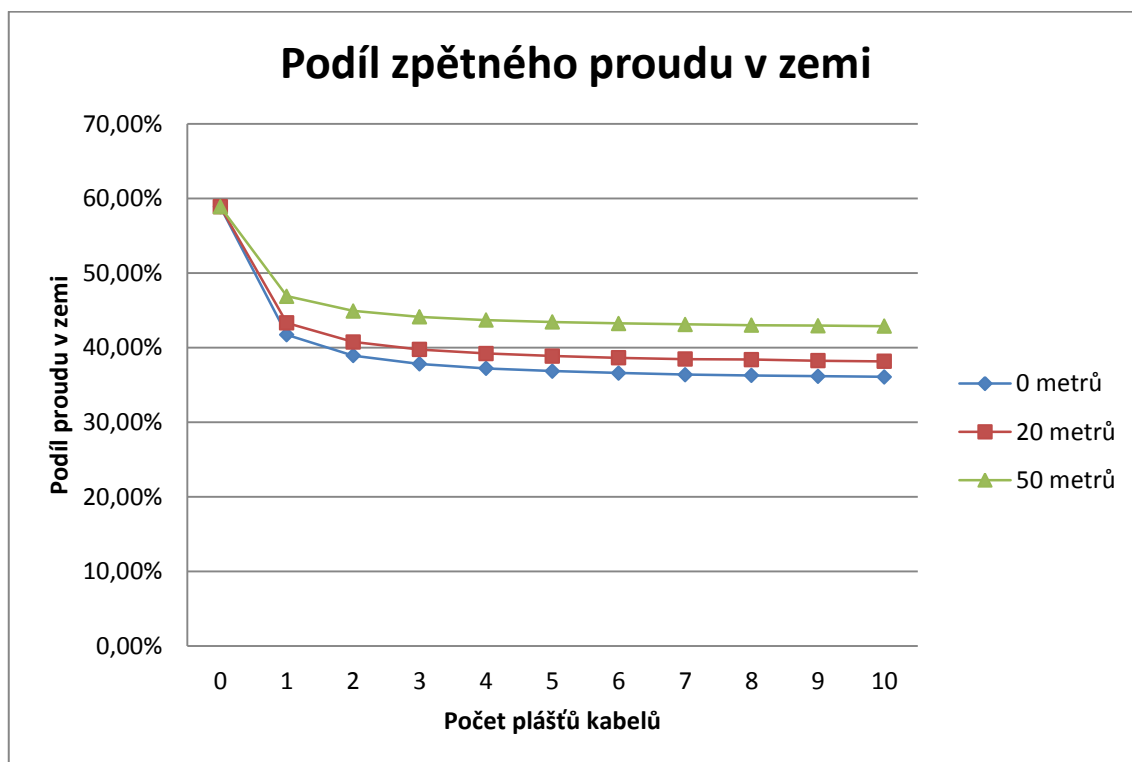
Tabulka 10 - Rozložení zemního proudu pro pláště kabelů 20 metrů od paty stožáru

Poč.fiktivních zemních cest	I _{zem.lano} (%)	I _{pláště} (%)	I _{země} (%)
0	41,12%	0,00%	58,88%
1	36,80%	19,90%	43,30%
2	36,23%	23,01%	40,76%
3	36,03%	24,22%	39,75%
4	35,93%	24,87%	39,20%
5	35,87%	25,26%	38,86%
6	35,83%	25,53%	38,63%
7	35,81%	25,73%	38,47%
8	35,75%	25,85%	38,39%
9	35,77%	25,99%	38,24%
10	35,76%	26,09%	38,16%

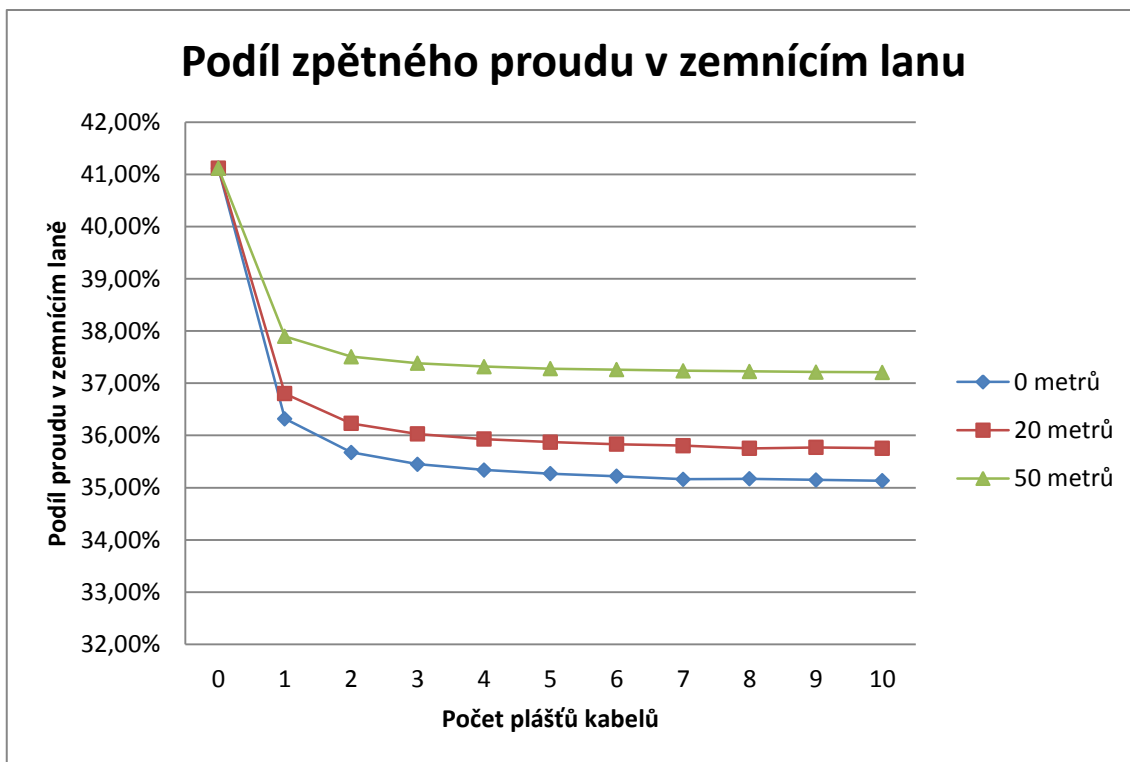
Tabulka 11 - Rozložení zemního proudu pro pláště kabelů u paty stožáru

Poč.fiktivních zemních cest	I _{zem.lano} (%)	I _{pláště} (%)	I _{země} (%)
0	41,12%	0,00%	58,88%
1	36,32%	21,97%	41,71%
2	35,68%	25,40%	38,93%
3	35,45%	26,73%	37,82%
4	35,34%	27,44%	37,22%
5	35,27%	27,88%	36,85%
6	35,22%	28,18%	36,60%
7	35,16%	28,46%	36,38%
8	35,17%	28,56%	36,27%
9	35,15%	28,69%	36,16%
10	35,13%	28,79%	36,07%

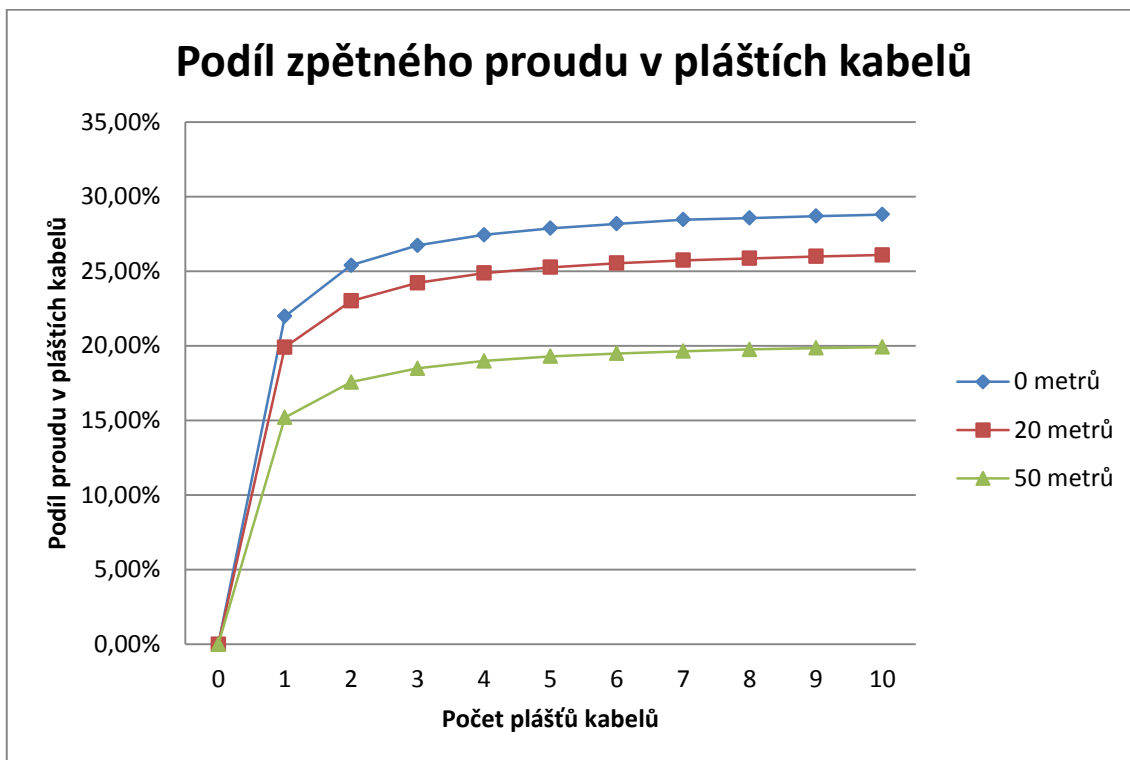
Pro snazší porovnání výsledků v tabulkách se můžeme podívat do následujících grafů, které ukazují, jak velký podíl zpětného proudu teče ve které zpětné zemi cestě.



Obrázek 10 - Podíl zpětného proudu v zemi



Obrázek 11 - Podíl zpětného proudu v zemnicím lanu



Obrázek 12 - Podíl zpětného proudu v pláštích kabelů

Při prostudování grafu, ve kterém je jasně patrné, jak velká část zpětného proudu teče pláští kabelů, snadno získáme vysvětlení poklesu reaktanční nesymetrie při posunutí plášťů kabelů blíže patě stožáru. Jak je patrné z grafu i z tabulek s vypočítanými

hodnotami, čím dále od stožáru pláště kabelů umístíme, tím menší podíl zpětného proudu zemnicímu lanu seberou. To znamená, že budou – li pláště kabelů ve vzdálenosti 50 metrů od paty stožáru, poteče pláští kabelů menší část zpětného proudu, než když bychom je umístili přímo k patě stožáru, a to asi o 6 - 8 %. To znamená, že v případě kabelů ve větší vzdálenosti bude větší část zpětného proudu dále fázovým vodičům, z čehož jasně plyne nižší reaktanční nesymetrie.

Při porovnání úbytků proudů v zemnicím lanu a v zemi zjistíme, že pláště kabelů převezmou jen malou část proudu zemnicího lana (nejvíce 5 %). U zpětného proudu tekoucího zemí je však úbytek výraznější. Přidáním deseti plášťů kabelů k patě stožáru zpětný proud v zemi poklesne dokonce o 22 %.

Můžeme vidět, že trend poklesu podílu proudu v zemnicím laně při přidávání plášťů kabelů VN je velmi podobný trendu poklesu reaktanční nesymetrie. Přidání další zemní cesty má tedy na rozložení zpětných proudů a následnou nesymetrii prokazatelný vliv, přičemž je důležitější existence a poloha této zpětné cesty než její impedance. To můžeme vidět jak v grafu Podílu zpětného proudu v zemnicím laně, tak v grafu Míry nesymetrie v závislosti na počtu plášťů kabelů. Přidáním jednoho pláště kabelu se rozložení zpětných proudů značně změní, ale další přidávání kabelů do stejného místa již nemá na toto rozložení takový vliv. To samé v důsledku platí i pro reaktanční nesymetrii. Další přidávání plášťů kabelů sice způsobuje další pokles nesymetrie, ale zdaleka ne tak výrazný, jako přidání prvního kabelu.

Z předcházejících výpočtů je tedy jasné, že uzavírání zpětných proudů přes uzemněné pláště kabelů VN způsobuje, že venkovní vedení, která se nacházejí v městských oblastech jsou do jisté míry specifická a jejich parametry se mohou lišit od linek vedoucích ve venkovském prostředí.

5.3. Vliv uzemněných plášťů kabelů VN na netočivou impedanci

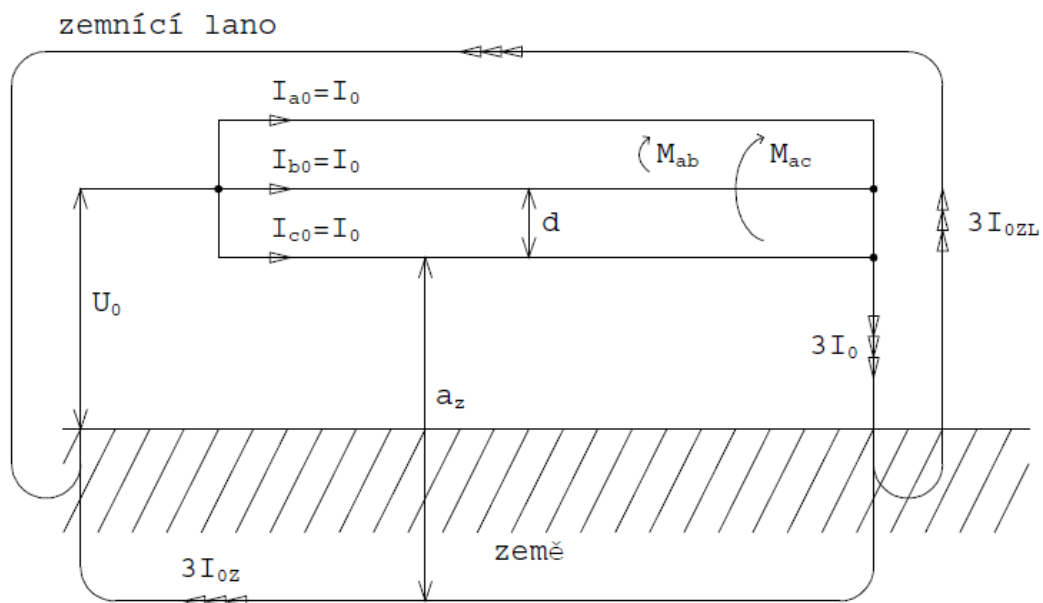
Důležitý parametr v nastavovacím protokolu distančních ochran je netočivá impedance. Značíme ji Z_0 a často se také nazývá impedancí nulovou. Pro jasnější představu, co je to netočivá impedance si nejprve vysvětlíme, jak se tato veličina měří.

[12] Při jejím zjišťování se vedení třífázově spojí na začátku a třífázově kovově zkratuje na svém konci a spojí se zemí. Takto se napájí společným jednofázovým napětím U_0 . Toto napětí protlačí proud netočivé složky, který bude v každé fázi přibližně stejný a

označíme ho I_0 . Proud I_0 se dělí na proud zemnicím lanem (nebo více lany), označíme ho $3I_{0ZL}$, a proud zemí, který označíme $3I_{0Z}$. Schéma měření netočivé složky můžeme vidět na obrázku 11. Pro netočivou impedanci pak bude platit:

$$\hat{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0 = \frac{U_0}{I_0}. \quad (47)$$

Pro netočivou impedanci vedení platí, že je přibližně v rozmezí 2 – 5ti násobku impedance sousledné nebo zpětné (které jsou co do velikosti totožné. Důvodem je právě odlišná cesta průtoků netočivých proudů oproti zbylým dvěma složkám. Netočivé proudy se vždy uzavírají přes zem a zemnicí lana. [12]



Obrázek 13 - Způsob měření netočivé impedance, zdroj: [12]

5.3.1. Přechod do složkových soustav

Při přechodu do složkových soustav jde v podstatě o náhradu fázorů fyzikálních veličin složkami. Matematicky se jedná o podrobení lineární n – fázové soustavy se střídavým harmonickým proudem transformaci. V našem případě je hlavní motivací pro tento přechod zjednodušení výpočtu v nesouměrné soustavě. Následující postup vychází z [1].

Pokud bychom měli soustavu symetrickou jak uspořádáním, tak provozem, můžeme uvažovat poměry jen v jedné fázi a ostatní fáze budou jen časové posunuté. Není – li tato podmínka zcela splněna, používá se s výhodou převod do složkové soustavy.

Mějme původní soustavu s fázemi (a, b, c), jejichž fázorům proudu a napětí přísluší maticové rovnice:

$$[\hat{U}_a \hat{U}_b \hat{U}_c]^T = [\hat{U}_{abc}] \quad (48)$$

$$[\hat{I}_a \hat{I}_b \hat{I}_c]^T = [\hat{I}_{abc}] \quad (49)$$

Transformaci původních fázorů napětí a proudů z původní soustavy do soustavy složkové a naopak umožňují čtvercové regulární převodní matice třetího řádu $[T_U]$ a $[T_I]$, které mohou být navzájem různé. Můžeme je nazvat transformačními maticemi a platí pro ně následující rovnice:

$$[\hat{U}_{abc}] = [T_U] [\hat{U}_{omn}] \quad (50)$$

$$[\hat{U}_{omn}] = [T_U]^{-1} [\hat{U}_{abc}] \quad (51)$$

$$[\hat{I}_{abc}] = [T_I] [\hat{I}_{omn}] \quad (52)$$

$$[\hat{I}_{omn}] = [T_I]^{-1} [\hat{I}_{abc}] \quad (53)$$

Pro složkové soustavy jsme v předchozích rovnicích (50) – (53) použili indexy o, m, n. Když rovnici (50) podrobně rozepíšeme získáme následující vztah:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_o \\ \hat{U}_m \\ \hat{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}\hat{U}_o & t_{12}\hat{U}_m & t_{13}\hat{U}_n \\ t_{21}\hat{U}_o & t_{22}\hat{U}_m & t_{23}\hat{U}_n \\ t_{31}\hat{U}_o & t_{32}\hat{U}_m & t_{33}\hat{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}_{oa} & \hat{U}_{ma} & \hat{U}_{na} \\ \hat{U}_{ob} & \hat{U}_{mb} & \hat{U}_{nb} \\ \hat{U}_{oc} & \hat{U}_{mc} & \hat{U}_{nc} \end{bmatrix} \quad (54)$$

kde například \hat{U}_{mb} je fázor složky m příslušící fázi b. Z rovnice (54) plyne, že při zadané matici $[T_U]$ nám již stačí určit jen jednotlivé složky $\hat{U}_o, \hat{U}_m, \hat{U}_n$.

Chceme – li vyjádřit vztah mezi fázory napětí a proudu pro trojfázový odvod, můžeme jej popsat maticovou rovnicí pro obě soustavy – jak původní, tak složkovou:

$$[\hat{U}_{abc}] = [\hat{Z}_{abc}] [\hat{I}_{abc}] \quad (55)$$

$$[\hat{U}_{omn}] = [\hat{Z}_{omn}] [\hat{I}_{omn}] \quad (56)$$

Rovnice (55) a (56) můžeme dále rozepsat do rovnic:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_o \\ \hat{U}_m \\ \hat{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{oo} & \hat{Z}_{om} & \hat{Z}_{on} \\ \hat{Z}_{mo} & \hat{Z}_{mm} & \hat{Z}_{mn} \\ \hat{Z}_{no} & \hat{Z}_{nm} & \hat{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_o \\ \hat{I}_m \\ \hat{I}_n \end{bmatrix} \quad (58)$$

Pro matici $[\hat{Z}_{abc}]$ platí, že na její hlavní diagonále jsou vlastní impedance fází, zatímco prvky mimo hlavní diagonálu vyjadřují vzájemné impedance mezi jednotlivými fázemi. To samé platí analogicky pro matici $[\hat{Z}_{omn}]$, ve které se na hlavní diagonále nachází vlastní složkové impedance a prvky mimo hlavní diagonálu vyjadřují impedance mezisložkové.

Využitím rovnic (50) – (53) získáme rovnici:

$$[\hat{U}_{omn}] = [T_U]^{-1} [\hat{Z}_{abc}] [T_I] [\hat{I}_{omn}] \quad (59)$$

Porovnáme – li rovnice (56) a (59), získáme vztah:

$$[\hat{Z}_{omn}] = [T_U]^{-1} [\hat{Z}_{abc}] [T_I] \quad (60)$$

5.3.2. Výpočtový model pro netočivou impedanci

Nyní vezmeme výpočtový program sestavený v SW MatLab, pomocí kterého získáme impedanční matici vedení, a na tuto matici aplikujeme rovnici (60). Tím získáme matici složkových impedancí, kde na hlavní diagonále budou po řadě impedance netočivé, sousledné a zpětné složky. Mimodiagonální prvky nám vyjadřují vztahy mezi těmito složkami.

Prvky mimo hlavní diagonálu by v ideálně symetrickém systému vycházely nulové. Protože vedení není dokonale symetrické, nebudou tyto prvky matice nulové, ale jejich velikost je vzhledem k velikosti složkových impedancí na hlavní diagonále zanedbatelná.

Jak bylo řečeno výše, budeme se zabývat impedancí netočivou, a to její absolutní hodnotou, tedy velikostí vektoru \hat{Z}_0 . Abychom mohli určit, jaký vliv mají na tuto veličinu uzemněné pláště kabelů VN v blízkosti koridoru vedení, budeme opět do

výpočtu tyto pláště přidávat výše popsaným způsobem ve vzdálenostech 0, 20 a 50 metrů od paty stožáru. Získané výsledky můžeme vidět v tabulkách 12, 13 a 14.

Tabulka 3 - Velikost netočivé impedance v závislosti na počtu plášťů kabelů VN 50 metrů od paty stožáru

Poč.fiktivních zemních cest	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	Z0 (Ω/km)
0	0,3154	1,0463	1,0928
1	0,2887	0,9965	1,0375
2	0,2797	0,9916	1,0303
3	0,2759	0,9901	1,0278
4	0,2737	0,9894	1,0266
5	0,2724	0,9889	1,0257
6	0,2715	0,9887	1,0253
7	0,2708	0,9885	1,0249
8	0,2703	0,9884	1,0247
9	0,2699	0,9883	1,0245
10	0,2695	0,9882	1,0243

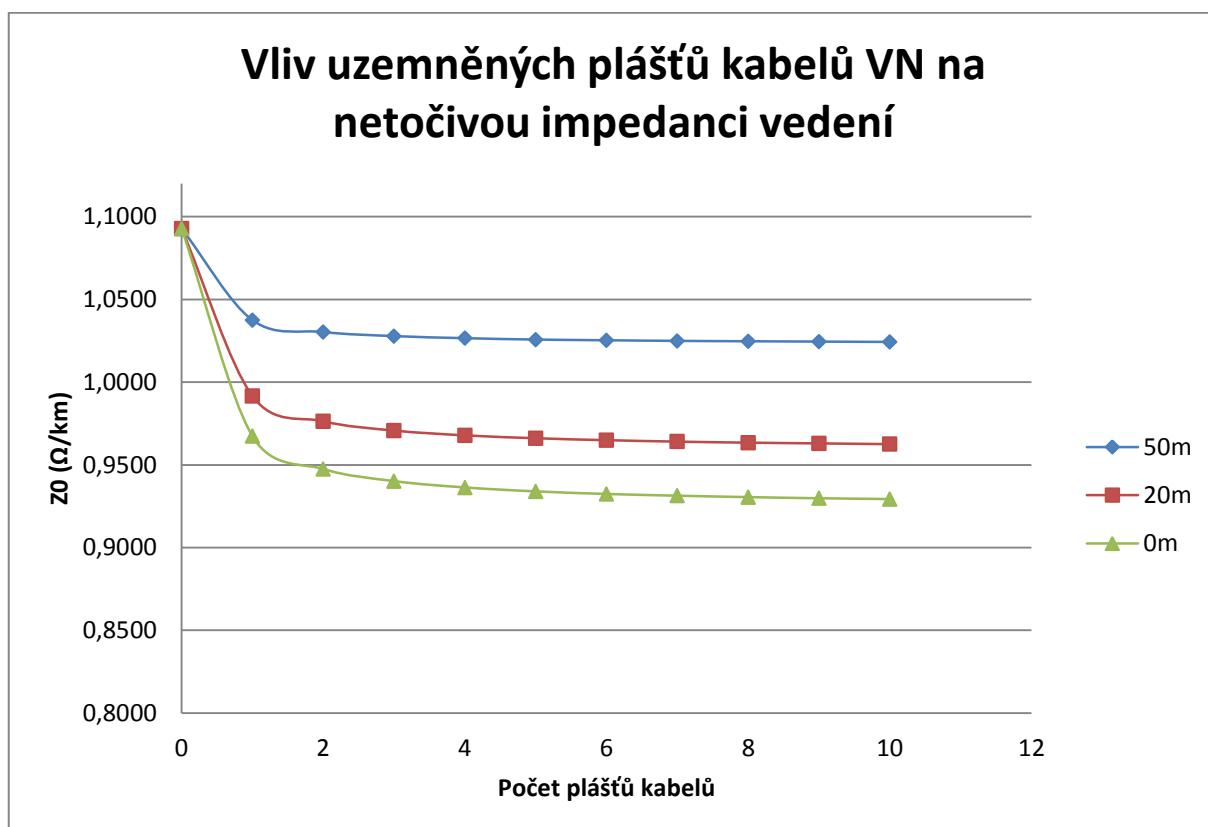
Tabulka 13- Velikost netočivé impedance v závislosti na počtu plášťů kabelů VN 20 metrů od paty stožáru

Poč.fiktivních zemních cest	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	Z0 (Ω/km)
0	0,3154	1,0463	1,0928
1	0,2863	0,9494	0,9916
2	0,2724	0,9376	0,9764
3	0,2662	0,9335	0,9707
4	0,2627	0,9315	0,9678
5	0,2605	0,9303	0,9661
6	0,2590	0,9295	0,9649
7	0,2579	0,9289	0,9640
8	0,2570	0,9285	0,9634
9	0,2564	0,9282	0,9630
10	0,2558	0,9279	0,9625

Tabulka 4 - Velikost netočivé impedance v závislosti na počtu plášťů kabelů VN u paty stožáru

Poč.fiktivních zemních cest	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	Z0 (Ω/km)
0	0,3154	1,0463	1,0928
1	0,2866	0,9239	0,9673
2	0,2702	0,9082	0,9475
3	0,2628	0,9027	0,9402
4	0,2587	0,8999	0,9363
5	0,2560	0,8982	0,9340
6	0,2542	0,8971	0,9324
7	0,2528	0,8964	0,9314
8	0,2518	0,8958	0,9305
9	0,2510	0,8953	0,9298
10	0,2503	0,8950	0,9293

Pro názornější představu o chování netočivé impedance při přidávání těchto dalších zemních cest se můžeme podívat do následujícího grafu.



Obrázek 14 - Vliv uzemněných plášťů kabelů VN na netočivou impedanci vedení

Z tabulek s vypočtenými hodnotami a především z grafu je na první pohled patrný vliv uzemněných plášťů kabelů VN na netočivou impedanci venkovních vedení. Můžeme si

všimnout, že impedance přidané zemní cesty nemá tak velký vliv jako její samotná přítomnost. To nám ukazuje výrazný pokles netočivé impedance již po přidání jednoho pláště kabelu, a to až téměř o 13 % v případě pláště u paty stožáru. Přidáváním dalších plášťů sice impedance i nadále klesá, ale již mnohem pomaleji.

Vysvětlení tohoto jevu je poměrně jednoduché. Vyjdeme ze způsobu měření netočivé impedance, který je znázorněn na obrázku 11. Přidáváním plášťů kabelů do cesty zpětných proudů snižujeme impedanci této cesty. Při měření znázorněném v tomto schématu bude při nižší impedanci zpětné cesty (způsobeném přidáním plášťů kabelů) a stejném napětí protékat vyšší proud. Z toho jasně plyne pokles netočivé impedance.

Rozdíl v poklesu impedance při různých vzdálenostech plášťů kabelů od paty stožáru je poměrně výrazný. Zatímco přidáním deseti plášťů kabelů 50 metrů od paty stožáru poklesne impedance o přibližně 6 %, umístěním těchto plášťů k patě stožáru dojde k poklesu o 17,5 %.

Jelikož je netočivá impedance jedním ze základních parametrů, které se zadávají v nastavení distanční ochrany, můžou tyto chyby funkci ochrany značně ovlivnit. Z toho důvodu by pro nastavení distančních ochran bylo výhodnější využít přímého měření na chráněném vedení, protože výpočtem nemusíme vždy získat reálné hodnoty. To platí především pro vedení v městském prostředí, kde může být cesta zpětných proudů často velice různorodá.

Závěr

Cílem práce bylo analyzovat impedanční nesymetrie venkovních vedení napětíové hladiny 110 kV, a to především v městském prostředí. Pro tento účel byla vybrána vedení společnosti PREdistribuce, která se nacházejí na území Prahy. Za účelem srovnání s vedeními, která vedou mimo městskou zástavbu byla použita vedení společnosti EON, která jsou provozována převážně na území jižních Čech. Předmětem analýzy bylo vyhodnocení změřené míry impedanční nesymetrie těchto vedení a porovnání změřených parametrů některých linek s parametry vypočítanými.

Za tímto účelem jsem vytvořil výpočtový program v SW MatLab, který sestaví impedanční matici vedení, se kterou dále pracuje v dalších výpočtech. V kapitole 1 této práce je uveden postup, kterým lze dojít ke vztahům, které jsou v tomto programu použity.

V kapitole 2 jsem se zaměřil na zdroje impedanční nesymetrie, a to především na vliv instalace vodivějších zemnicích lan. Provedl jsem výpočet pro běžně používaná lana AlFe a železná lana a ověřil chování impedanční nesymetrie v závislosti na typu použitého zemnicího lana. Výpočet jasně potvrdil předpoklad, že instalace vodivějšího zemnicího lana impedanční nesymetrii zvyšuje. Použijeme – li železné lano s vyšší impedancí, dojdeme k velikosti nesymetrie blízké nule.

V následující kapitole jsem se seznámil se způsobem měření parametrů venkovních vedení zařízením OMICRON. Společnosti PREdistribuce a EON mi poskytly naměřené parametry svých vedení, ze kterých jsem vypočítal jejich reaktanční nesymetrii. V porovnání nesymetrií vedení těchto dvou společností jsem zjistil, že vedení EON mají nesymetrii vyšší přibližně o 1,3 %. Důvodem tohoto rozdílu je pravděpodobně prostředí, ve kterém tyto linky vedou. V Praze se v blízkosti koridorů vedení nacházejí kabely VN s uzemněnými plášti, což snižuje rezistivitu půdy. To může způsobit změnu cesty zpětných proudů. Tento předpoklad jsem analyzoval a prokázal v kapitole 5.

Ve čtvrté kapitole jsem vybral některá vedení PREdistribuce a porovnal jejich naměřené parametry a reaktanční nesymetrii s hodnotami získanými výpočtem. Vypočítaná reaktanční nesymetrie byla však přibližně dvojnásobkem změřené hodnoty. Nejpravděpodobnějším zdrojem tohoto rozdílu je jeden ze vstupních parametrů výpočtu, který se velmi těžko určuje, a tím je rezistivita půdy. Když se však pokusíme

upravit výpočet tak, aby se vypočítané hodnoty shodovaly s naměřenými, dojdeme k velice malé hodnotě rezistivity půdy. To je jasným podnětem k zamyšlení se nad tím, zda je správné nastavovat distanční ochrany a lokátory poruch podle vypočítaných parametrů.

V kapitole 5 jsem prokázal vliv uzemněných plášťů kabelů VN vedoucích společně s koridory venkovních vedení na reaktanční nesymetrii těchto linek, z čehož plynou jistá specifika venkovních vedení v městském prostředí. Za tímto účelem byl použit model, ve kterém se do výpočtového programu přidávaly další zemní cesty v podobě těchto plášťů kabelů. Výpočty skutečně prokázaly, že uzemněné pláště kabelů přejímají nezanedbatelnou část zpětných proudů, což mění vzdálenost zpětné cesty od fázových vodičů, s čímž se v důsledku mění i velikost reaktanční nesymetrie.

Jedním z důležitých parametrů v nastavovacím protokolu distančních ochran je také netočivá impedance. Pomocí výpočtu jsem však opět prokázal, že uzavírání zpětných proudů přes uzemněné pláště kabelů VN má na velikost této veličiny prokazatelný vliv.

Co nejpřesnější znalost parametrů vedení je důležitá především při nastavování distančních ochran a lokátorů poruchy. Tato nastavení většinou vycházejí z vypočítaných hodnot, které, jak potvrzuje tato práce, mohou být často nepřesné. Tyto nepřesnosti mohou vyústit ve špatné vyhodnocení případné poruchy. Z pohledu lokátoru poruchy se jedná o špatné určení vzdálenosti poruchy, což může znesnadnit a prodloužit hledání místa poruchy a tím prodloužit dobu odstávky elektrické energie. Z pohledu distanční ochrany může dokonce nastat situace, kdy porucha bude v blízkosti hranice impedančně časových zón a ochrana bude nesprávně působit ve vyšší zóně a k vypnutí dojde v delším čase. Z těchto důvodů jsem došel k závěru, že pro přesné nastavení distanční ochrany je nejvýhodnější použít parametry změřené přímo na chráněném zařízení.

Použitá literatura

- [1] NĚMEČEK, František, Miloslav HODINKA a Štefan FECKO. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 323 s. ISBN 80-030-0065-3.
- [2] HANUŠ, Radek. *Distanční ochrany v systému přenosových a distribučních sítí*. Praha. Disertační práce. ČVUT v Praze, 2005.
- [3] Chmelík K., Toman P., Hanuš R., Grym R., Machoň J, Hochman P. *Chránění III: elektrická zařízení vysokého napětí*. Havířov: IRIS, c2005, 279 s. Pracovní a učební pomůcky. ISBN 80-903-5405-X.
- [4] HANUŠ, Radek a Petr DENEMARK. Analýza měření parametrů vedení přístrojem OMICRON CPC 100. s. 11.
- [5] CP CU1 Reference Manual (příručka dodávaná k zařízení IMICRON CP CU1)
- [6] NOSEK, Tomáš. *Optimalizace nastavení distančních ochrany s využitím měření parametrů vedení 110 kV*. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. 2013.
- [7] HORÁK, Karel. *Výpočet elektrických sítí*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1980, 307 s.
- [8] *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*. 93rd ed. Editor William M Haynes, David R Lide, Thomas J Bruno. Boca Raton: CRC Press, c2012.
- [9] KŘIVÁNEK, František. *Diagnostika kabelových vedení 22 kV v PREDistribuce, a.s. a vývoj poruchovosti kabelů VN za dobu používání diagnostiky částečných výbojů*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [10] Podniková norma PREDistribuce SK 221. Jednožilový kabel 22 AXEKVCEY. Praha, 2009.
- [11] PNE 34 1050. *Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky*. 2011.
- [12] PETRUZELA, Ivan. *Řízení s stabilitou elektrizační soustavy*. Praha, 2008.