



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

TEORIE A PRAXE VYHLEDÁVÁNÍ PORUCH NA KABELOVÝCH VEDENÍCH VN V DS E.ON

THEORY AND PRACTICE OF FAULT LOCATION ON MV CABLE LINES IN E.ON
DISTRIBUTION NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominika Macků

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Studentka: Bc. Dominika Macků

ID: 173690

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Teorie a praxe vyhledávání poruch na kabelových vedeních VN v DS E.ON

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Způsob provozování kabelových sítí VN, vlivy působící na kabelová vedení a nejčastěji se vyskytující poruchy kabelových vedení
2. Problematika měření impedance kabelových vedení DS
3. Teoretický výpočet vzdálenosti poruch na VN kabelech
4. Praktická lokalizace poruch VN kabelů, analýza a vyhodnocení dat z měření
5. Porovnání přesnosti teoretické a praktické metody lokalizace poruch kabelových vedení VN

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

MACKŮ, D. *Teorie a praxe vyhledávání poruch na kabelových vedeních VN v DS E.ON*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 74 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Teorie a praxe vyhledávání poruch na kabelových vedeních VN v DS E.ON* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 22.05.2019

.....

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá poruchami na kabelových vedeních vysokého napětí v distribuční soustavě společnosti E.ON. První část práce seznamuje čtenáře s problematikou kabelových vedení, používanými typy kabelů a nejčastěji vznikajícími poruchami. V druhé části práce jsou vysvětleny metody používané pro dohledání poruch na kabelových vedeních odbornými pracovníky přímo v terénu. Třetí část je zaměřena na analýzu vybrané skupiny vzniklých poruch. Posledním bodem práce je statistika poruchovosti na území Jižní Moravy v období 1.1.2017 až 1.1.2019.

KLÍČOVÁ SLOVA: kabel; jednofázové zemní spojení; lokátor poruch; poruchovost;

ABSTRACT

This thesis gives an overview on the fault of high-voltage cable transmission lines in the distribution system of the E.ON company. The first part of this thesis introduces reader to the topic of cable transmission lines, types of commonly used cables and the most commonly occurring faults. In the second part of this thesis, the methods of locating faults in cable transmission lines by professional personnel are explained. The third part deals with the analysis of a group of chosen occurred faults. The final part focuses on the statistics of fault occurrence on South Moravian region from 1.1.2017 until 1.1.2019.

KEY WORDS: cable; single-phase earth-fault; fault locator; fault occurrence;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD.....	14
2 KABELOVÁ VEDENÍ	15
2.1 KABELY S PAPIROVOU IZOLACÍ	15
2.2 KABELY S IZOLACÍ ZESÍŤOVANÝMI POLYMERY	15
2.3 KABELOVÉ SOUBORY	16
2.4 KABELOVÉ SPOJKY	17
2.5 PORUCHY KABELOVÝCH VEDENÍ.....	17
2.5.1 JEDNOFÁZOVÉ SPOJENÍ SE ZEMÍ.....	17
3 PŘIBLIŽNÁ LOKALIZACE PORUCHY POMOCÍ OCHRAN	20
3.1 FUNKCE LOKÁTORU	20
3.1.1 VÝPOČET IMPEDANCE PORUCHOVÉ SMYČKY	20
3.1.2 VYHODNOCENÍ VZDÁLENOSTI PORUCHY	28
3.1.3 POSTUP VYHLEDÁNÍ MÍSTA PORUCHY S POMOCÍ LOKÁTORU	28
4 LOKALIZACE PORUCH KABELOVÝCH VEDENÍ	29
4.1 POSTUP.....	29
4.2 METODY PŘEDBĚŽNÉ LOKALIZACE PORUCH.....	30
4.2.1 IMPULZNĚ-ODRAZOVÁ METODA (TDR IMPULZNÍ REFLEKTOMETRIE).....	31
4.2.2 METODA NĚKOLIKANÁSOBNÉHO IMPULZU SIM/MIM	33
4.2.3 RÁZOVÁ-PROUDOVÁ METODA ICM.....	34
4.2.4 DOKMITÁVACÍ METODA.....	35
4.2.5 PROPALOVACÍ METODA	36
4.2.6 MŮSTKOVÉ METODY.....	36
4.3 ZPŮSOB ZAMĚŘOVÁNÍ KABELOVÉ TRASY	38
4.4 ZAMĚŘENÍ PORUCHY KABELU.....	38
4.5 IDENTIFIKACE KABELU.....	40
5 POPIS JEDNOTLIVÝCH PORUCH.....	41
5.1 NEJVYUŽÍVANĚJŠÍ METODY FYZICKÉ LOKALIZACE.....	41
5.2 LOKALIZACE PORUCHY	41
5.3 PORUCHA ČÍSLO 1 – VN 240.....	41
5.4 PORUCHA ČÍSLO 2 – VN 1210.....	47
5.5 PORUCHA ČÍSLO 3 – VN 219	52
5.6 PORUCHA ČÍSLO 4 – VN 231	58
5.7 PORUCHA ČÍSLO 5 -VN 1374	61
5.8 SHRNUTÍ VŠECH ZKOUMANÝCH PORUCH	64
6 PORUCHOVOST NA VEDENÍCH 22 KV	66

6.1 PORUCHOVOST NA HLADINĚ 22 kV V OBDOBÍ 1.1.2017-1.1.2019	66
6.1.1 PORUCHOVOST KABELOVÝCH VEDENÍ V OBDOBÍ 1.1.2017 – 1.1.2019	70
7 ZÁVĚR.....	72
POUŽITÁ LITERATURA	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Silový kabel s izolací ze zesítěného polyethylenu 22-AXEKVCEY [10].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-2 Uzemnění přes zhášecí tlumivku [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-3 Uzemnění přes rezistenci [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-1 Náhradní schéma poruchové smyčky mezifázové poruchy fází L2-L3 [3]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-2 Náhradní schéma poruchové smyčky spojení jedné fáze se zemí [3]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-3 Náhradní složkové schéma – jednofázové spojení se zemí.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-1 Blokové schéma zapojení IRG (impulzní reflektometr) [1]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-2 Grafy odrazu TDR [1]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-3 Příklad grafu TDR: srovnání vadné a neporušené fáze [1]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-4 Graf TDR: neznámá rychlost $v/2$, měření na obou koncích kabelu (A, B) [1]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-5 Blokové schéma zapojení SIM/MIM (SSG-rázový generátor, SA32-vazební jednotka, IRG-impulzní reflektometr) [1]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-6 Blokové schéma zapojení ICM (indukční vazební člen SK1) [1]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-7 Graf měření IRG 3000, ICM [1]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-8 Blokové schéma dokmitávací metoda (kapacitní dělič napětí CC1) [1]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-9 Graf měření IRG 3000, dokmitávací metoda [1]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-10 Wheatstoneův obvod [1].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-11 Murrayův měřicí obvod [1]</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-12 Murray – a) vyrovnávací obvod, b) měřicí obvod [1].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-13 Akustická lokalizace poruchy, schéma zapojení a tvar akustického signálu [1].....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-14 Metoda krokového napětí – pokles napětí ve tvaru gradientu [1]</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-15 Připojení jednožilových kabelů [1]</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-1 Porucha č.1: VN 240, poruchový záznam fázových napětí, porucha L1-E, SIGRA.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5-2 Porucha č.1: VN 240, poruchový záznam proudů, porucha L1-E, SIGRA</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5-3 Porucha č.1: místo poruchy na lince VN 240 naznačeno v RIS.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 5-4 Porucha č.2: VN 1210, výkopové práce, Sukova.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5-5 Porucha č.2: poruchový záznam fázových proudů, porucha L3-E, SIGRA</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5-6 Porucha č.2: kruhový diagram a sinusový průběh proudů, porucha L3-E, SIGRA.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5-7 Porucha č.2: poruchový záznam fázových napětí, porucha L3-E, SIGRA.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5-8 Porucha č.3: místo poruchy VN 219, vrtací souprava</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5-9 Porucha č.3: 1. poruchový záznam efektivních hodnot proudů, porucha L3-E, SIGRA.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5-10 Porucha č.3: 1. poruchový záznam efektivních hodnot napětí, porucha L3-E, SIGRA.....</i>	<i>53</i>

<i>Obr. 5-11 Porucha č.3: 2. poruchový záznam proudů, porucha L1-L2-L3, SIGRA</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5-12 Porucha č.3: 2. poruchový záznam napětí, porucha L1-L2-L3, SIGRA.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5-13 Porucha č.4: poruchový záznam proudů, porucha L1-E, SIGRA</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 5-14 Porucha č.4: poruchový záznam napětí, porucha L1-E, SIGRA.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 5-15 Porucha č.5: Poruchový záznam proudů, porucha L1-E, SIGRA.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 5-16 Porucha č.5: Poruchový záznam napětí, porucha L1-E, SIGRA.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6-1 Distribuční území společnosti E.ON – Jižní Morava</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 6-2 Graf: Poruchovost linek 22 kV v období 1.1.2017-31.12.2018.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6-4 Graf: Poruchovost kabelových vedení 22 kV v období 1.1.2017-1.1.2019</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6-5 Graf: Poruchovost kabelů v období 1.1.2017-1.1.2019</i>	<i>71</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Rozdělené typů poruch kabelů [1].....	30
Tab. 4-2 Rychlost šíření impulzu $v/2$ pro různé typy kabelů [1].....	30
Tab. 4-3 Metody předběžné lokalizace poruchy [1].....	31
Tab. 5-1 Porucha č.1: ukázka – primární hodnoty, porucha typu L1-E, SIGRA.....	43
Tab. 5-2 Porucha č.1: hodnoty pro určení místa poruchy.....	43
Tab. 5-3 Porucha č.1: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS.....	44
Tab. 5-4 Porucha č.1: místo poruchy.....	45
Tab. 5-5 Porucha č.1: hodnoty impedance kabelového vedení VN 240.....	45
Tab. 5-6 Porucha č.1: nastavení lokátoru – zemní poměr.....	46
Tab. 5-7 Porucha č.2: primární hodnoty, porucha typu L3-E, VN 1210.....	49
Tab. 5-8 Porucha č.2: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS.....	49
Tab. 5-9 Porucha č.2: místo poruchy.....	49
Tab. 5-10 Porucha č.2: Hodnoty impedance kabelového vedení VN 1210.....	49
Tab. 5-11 Porucha č.2: Nastavení lokátoru – zemní poměr.....	50
Tab. 5-12 Porucha č.3: místo poruchy.....	55
Tab. 5-13 Porucha č.3: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS.....	55
Tab. 5-14 Porucha č.3: primární hodnoty, porucha typu L3-E, VN 219.....	55
Tab. 5-15 Porucha č.3: Hodnoty impedance kabelového vedení VN 219.....	55
Tab. 5-16 Porucha č.3: Nastavení lokátoru – zemní poměr.....	56
Tab. 5-17 Porucha č.3: primární hodnoty, porucha typu L1-L2-L3, VN 219.....	57
Tab. 5-18 Porucha č.3: porucha typu L1-L2-L3, vypočtené hodnoty poruchové smyčky.....	57
Tab. 5-19 Porucha č.4: primární hodnoty, porucha typu L1-E, VN 231.....	59
Tab. 5-20 Porucha č.4: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS.....	59
Tab. 5-21 Porucha č.4: místo poruchy.....	59
Tab. 5-22 Porucha č.4: Hodnoty impedance kabelového vedení VN 231.....	59
Tab. 5-23 Porucha č.4: Nastavení lokátoru – zemní poměr.....	60
Tab. 5-24 Porucha č.5: primární hodnoty, porucha typu L1-E, VN 1374.....	62
Tab. 5-25 Porucha č.5: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS.....	62
Tab. 5-26 Porucha č.5: místo poruchy.....	62
Tab. 5-27 Porucha č.5: Hodnoty impedance kabelového vedení VN 1374.....	62
Tab. 5-28 Porucha č.4: Nastavení lokátoru – zemní poměr.....	63
Tab. 5-29 Chyba lokalizace.....	64

<i>Tab. 5-30 Vypočtené vhodnější nastavení parametrů zemního poměru.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 5-31 Kabelová vedení – složení.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 5-32 Impedance vedení</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 6-1 Poruchovost v období 1.1.2017 – 31.12.2018 pro jednotlivé měsíce</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 6-2 Poruchovost oblasti Jižní Morava v období 1.1.2017 – 1.1.2019</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 6-3 Poruchovost kabelových vedení v období 1.1.2017 – 1.1.2019.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 6-4 Množství poruch s poškozením</i>	<i>71</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_c	(mm ²)	průřez vodiče
A_s	(mm ²)	průřez pláště
AMKTOYPV		kabel VN
ANKTOYPV		kabel VN
AXEKCEY		kabel VN
AXEKCY		kabel VN
AXEKVCEY		kabel VN
GIS		geografický informační systém
I	(A)	elektrický proud
I_C	(A)	kapacitní proud
I_E	(A)	zemní proud
I_p	(A)	poruchový proud
I_R	(A)	proud přes odporník
\underline{k}	(-)	fázor zemního poměru
k_E	(-)	velikost zemního poměru
k_{RE}	(-)	reálná část zemního poměru
k_{XE}	(-)	imaginární část zemního poměru
l	(km)	délka kabelu
$l_{\text{celková}}$	(km)	celková délka kabelu
$l_{\text{p-ochrana}}$	(km)	délka kabelu v poruše udaná ochranou
$l_{\text{p-skutečná}}$	(km)	skutečná délka kabelu v poruše
NA2XSY		kabel VN
NA2XS(F)SY		kabel VN
PILC		kabely s izolací napuštěným papírem
R	(Ω)	rezistence vedení
R_L	(Ω)	smyčkový odpor
RIS		řídící informační systém
\underline{U}	(V)	fázor napětí
\underline{U}_{LL}	(V)	fázor sdruženého napětí
VN		vysoké napětí

X	(Ω)	reaktance vedení
X_{prim}	(Ω)	reaktance na primární straně udaná ochranou
X_{sec}	(Ω)	reaktance udaná ochranou, sekundární strana
\underline{Y}	(S)	příčná admitance vedení
\underline{Z}	(Ω)	fázor impedance
\underline{Z}_1	(Ω)	fázor impedance první chráněné zóny
\underline{Z}_L	(Ω)	fázor impedance vedení
\underline{Z}_{LE}	(Ω)	fázor zemní impedance
φ_I	($^\circ$)	fázový posuv proudu
φ_{sc}	($^\circ$)	fázový posuv poruchové smyčky
φ_U	($^\circ$)	fázový posuv napětí
ρ_C	($\Omega\text{mm}^2/\text{km}$)	měrný odpor žíly
ρ_S	($\Omega\text{mm}^2/\text{km}$)	měrný odpor pláště
Δl	(km)	rozdíl skutečného místa poruchy od nahlášeného
δ_l	(%)	relativní chyba určeného místa poruchy

HORNÍ INDEXY

(0)	nulová složka
(1)	sousledná složka
(2)	zpětná složka

DOLNÍ INDEXY

E	zem
k	měrná veličina na jednotku délky
L	veličina kabelového vedení
L1	první fáze
L2	druhá fáze
L3	třetí fáze
<i>ph-E</i>	hodnota veličiny při spojení fáze-zem v místě ochrany, <i>ph</i> = L1; L2; L3
<i>ph1-ph2</i>	hodnota veličiny při spojení fáze-fáze v místě ochrany, <i>ph</i> = L1; L2; L3
sc	hodnota veličiny v místě ochrany
vyp	veličina vypočtena pro vhodnější nastavení zemního poměru

1 ÚVOD

Při návrhu a provozu elektrických sítí je potřeba uvažovat nejen se stavy normálního provozu, ale i stavy poruchovými. Všechny prvky v elektrizační soustavě jsou osazeny ochranami, které musí být schopny rozlišit, o který stav se jedná. Ovšem v dnešní době, kdy je nepřetržitá dodávka elektrické energie téměř považována za samozřejmost, je schopnost rychle dohledat a opravit poruchu nutností. Začalo se s nasazováním ochran s implementovanou funkcí lokátoru, která na základě indikace poruchy, zaznamenávaných hodnot napětí a proudu a měrné reaktanci vedení na kilometr, vyhodnotí místo poruchy. Důležitou informací je, o jaký typ poruchy se jedná, zda mezifázovou nebo o zemní spojení.

Na hladině 22 kV je vyhledávání poruch typu zemního spojení pomocí ochran problémové. Soustava na této napěťové hladině je uzemněna přes kompenzační prvky, které v případě poruchy zvyšují bezpečnost a omezují nepříznivé dopady na okolní prvky sítě, ovšem tím se stává porucha hůře dohledatelnou z pohledu vlastních ochran vedení.

Dohledávání poruch na kabelových linkách je často ztížené o místo uložení ve složitě přístupných místech. To vedlo ke vzniku několika metod a postupů na jejich dohledání. Všechny jsou prováděny odborně vyškolenými pracovníky, kteří pokud je to možné poruchu na místě opraví.

Metody dohledávání poruch na kabelových vedeních 22 kV jsou obsahem této práce. V následujících kapitolách budou popsány výpočetní postupy lokátorů, měřicí metody fyzického dohledání, a nakonec jejich aplikace na několika vybraných skutečných poruchách. Poslední částí je vypracovaná statistika poruchovosti za období dvou let.

2 KABELOVÁ VEDENÍ

Vysokonapěťové kabely tvoří převážnou část velkých městských sítí a vedení v průmyslových aglomeracích. Podle hladiny napětí je dále dělíme na pět podkategorií (3kV, 6kV, 10kV, 22kV, 35kV), v nichž se využívá různých typů izolací v závislosti na požadavcích a hospodárnosti. Materiály používané na izolaci kabelů VN musí mít velkou teplotní odolnost, vysokou elektrickou pevnost, malou elektrickou vodivost, velký měrný odpor, dobré mechanické vlastnosti a být odolné proti vlhkosti a dalším chemickým vlivům. Dnes jsou jedním z nejrozšířeněji instalovaných kabelů kabely s izolací zesíťovanými polymery. Důvodem jsou velice dobré tepelně mechanické a elektrické vlastnosti, které umožňují přenášet vysoké výkony a vysokou zkratovou zatížitelnost.

Kabelová vedení na napěťové hladině VN jsou v ČR zejména vedení distribuční soustavy a průmyslové rozvody. Nejčastěji jsou tato kabelová vedení tvořena jedním z těchto typů kabelů, a to v závislosti na době jejich zřízení:

- Kabely s izolací napuštěným papírem
- Kabely s izolací zesíťovanými polymery

2.1 Kabely s papírovou izolací

Dnes již spíše historickými jsou kabely s papírovou izolací, známé také pod zkratkou technologie PILC (Paper Insulated Lead Covered). Tento typ kabelů se přestal zřizovat ke konci minulého století, přesto s tímto typem kabelů bude v budoucnu ještě manipulováno, u již provozovaných vedení, a to díky dlouhé životnosti kabelů.

Papírová izolace je realizována jako kabelovou hmotou impregnovaná páska kabelového papíru, jež je ovijena okolo jádra nebo povrchu uhlíkového papíru. Toto uspořádání zajišťuje dostatečnou elektrickou pevnost i dobré rozložení elektrického pole. Na impregnaci byla používána kabelová hmota, tvořená kombinací minerálního oleje a kalafuny, s vlastnostmi potřebnými pro dané uložení – v případě nerovinného uložení je potřeba, aby byla izolace nestékavá.

Často využívané kabely byly **ANKTOYPV**. Materiálem jádra je hliník (A), který je ovinut papírovými pásky, tzv. napuštěným papírem „normálním“ (N), v případech nerovinného uložení byl použit napuštěný papír „nemigrujícím“ (M). Jedná se o kabel (K) se samostatně opláštěnými žilami (T) olovem (O). Dále jsou uvedeny obaly nad pláštěm, určeny především pro protikorozi a mechanickou ochranu: souvislý bezešvý obal z měkčeného PVC (Y), pancíř ze dvou pásek včetně polštáře z asfaltového polevu (P) a vláknitý asfaltový obal (V).

Údržba tohoto typu kabelu je technicky náročná. Vzhledem k potřebě permanentně nasáknutého papíru se vytvořil systém dolévacích koncovek, který byl umístěn na obou koncích kabelu.

Kabely s papírovou izolací byly postupně na trhu nahrazeny kabely s výtlačně lisovanou izolací. Důvodem byly výhody odražené jak v bezpečnosti, tak v ekonomické náročnosti údržby, provozu i stavu poruch.

2.2 Kabely s izolací zesíťovanými polymery

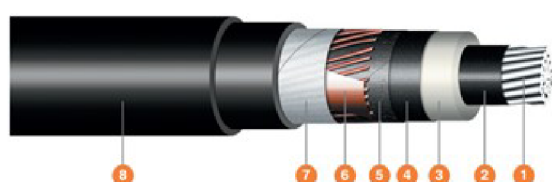
Jedním z nejpoužívanějších kabelů jsou dnes kabely s izolací zesíťovaným polyethylenem (XLPE). *Zesíťení* je pojem, kterým se označuje jev, při němž dochází k vytvoření vazeb mezi polymerickými řetězci, tzn. změna vnitřního uspořádání molekul. Tento jev má za následek vznik

„sítě“ na makromolekulární úrovni. Nastalá změna je trvalá a výsledný produkt má lepší mechanické i elektrické vlastnosti a vyšší chemickou i teplotní odolnost.

Oproti kabelům s izolací napuštěným papírem má tato izolace mnoho výhod:

- lepší celková homogenita,
- vyšší zkratová zatížitelnost,
- menší kapacita,
- menší dielektrické ztráty,
- menší permitivita,
- menší nabíjecí proud.

Všechny tyto atributy umožňují kabelům s izolací XLPE vést vyšší výkon. Pevný izolant umožňuje snadnější montáž kabelových souborů a možnost zřízení kabelů i ve svislých polohách. Existuje mnoho variant provedení tohoto typu kabelu, např.: AXEKCEY, AXEKVCE, NA2XSXY.



Standard

PN 05/96, PNE 347625

Konstrukce:

Design:

- | | | | |
|--|---|--|---|
| 1 Hliníkové jádro
<i>Aluminium conductor</i> | 3 Izolace ze zesíťného polyethylenu
<i>XLPE insulation</i> | 5 Polovodivá vodoblokující páska
<i>Semiconducting water-blocking tape</i> | 7 Vodoblokující páska
<i>Water-blocking tape</i> |
| 2 Vnitřní polovodivá vrstva
<i>Inner semiconducting layer</i> | 4 Vnější polovodivá vrstva
<i>Outer semiconducting layer</i> | 6 Stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky
<i>Cu wire screen and Cu tape</i> | 8 Vnější PE + PVC plášť
<i>Outer PE + PVC sheath</i> |

Obr. 2-1 Silový kabel s izolací ze zesíťného polyethylenu 22-AXEKVCEY [10]

2.3 Kabelové soubory

Kabelové soubory jsou prvky, bez nichž by nebylo možné soustavu provozovat. Jedná se hlavně o kabelové spojky a kabelové koncovky. Je to tedy armatura potřebná k napojování nebo ukončování kabelů. Jsou vyráběny různé typy podle typu kabelů, způsobu a míst své instalace. Jsou na ně kladeny velké požadavky. Montáž musí být provedena precizně, jelikož se jedná o nejslabší místa kabelových vedení s ohledem na možnost vzniku poruchy. Velký důraz je kladen na zabránění vzniku vzduchových bublin, které by mohly vést ke vzniku částečných výbojů a postupné degradaci kabelu a konečnému vzniku vážné poruchy. Pro bezpečné a úspěšné začlenění kabelových souborů bylo vytvořeno několik technologií:

- za tepla smršťitelné,
- za studena smršťitelné,
- za studena nasouvané,

- zalévané,
- gelové.

2.4 Kabelové spojky

Kabelové spojky jsou používány v místech, kde je potřeba spojit konce kabelů a obnovit jejich původní vlastnosti. V principu jde o vodivé spojení jader, odvod tepla, izolační vlastnosti, a to včetně ochrany spoje proti mechanickým poškozením a vnikání vlhkosti. Další požadavky mohou plynout z použitého druhu kabelu. Podle typu kabelů, které budou spojovány, se dělí spojky na přímé, přechodové a opravné.

V případě spojení dvou kabelů stejného typu i konstrukce se používají **spojky přímé**. **Přechodové spojky** jsou využity, jak název napovídá, v případě, že se jedná o spojení kabelů různých typů. Používají se jak při přechodu z jednožilových kabelů na třížilové jednovláškové (a opačně), tak při spojení kabelů s rozdílným typem izolace. **Opravné spojky** jsou využity při náhradě poškozené části kabelu.

2.5 Poruchy kabelových vedení

Kabelová vedení mají mnoho výhod oproti vedením venkovním. Jedním z nich je menší vliv mnoha vnějších vlivů, které mohou ohrožovat vedení venkovní (u nás v ČR zejména vítr a námraza). Při uložení do země jsou kabely i estetičtější a více chráněné než vedení venkovní, zvláště v rušných oblastech jako jsou hustě obydlené městské části. Nevýhoda kabelových vedení se projevuje v případě poruchy. Jednou z částí řešení poruchy kabelu je určení místa poruchy. Přes snahu o co nejkorektnější lokalizaci pomocí lokátorů ochrany, jsou jimi zasílané vzdálenosti ne zcela přesné a s ohledem na typ poruchy a způsob provozu sítě, ne vždy relevantní. Přesné dohledání místa poruchy spadá na specializované pracovníky. Ti k vyhledání místa poruchy projdou proces složený z mnoha dílčích úkonů a měření.

Poruchou kabelu je jakákoliv závada, nehomogenita, zeslabení nebo porušení, jež ovlivňuje výkon kabelu. Poruchy podzemních kabelů jsou silně individuální a úspěšnost lokalizace je dána praktickými aspekty a zkušenostmi pracovníka. Poruchy je možné dělit podle mnoha kritérií, ovšem nejvhodnější je rozdělení, které dále poslouží při řešení poruchy. Běžně se poruchy dělí podle velikosti impedance poruchy (poruchy nízko-ohmové a vysoko-ohmové) a podle poškozených částí kabelu (porucha vodiče, více vodičů, pláště) nebo poškozeného prvku vedení (kabel, spojka, koncovka).

Poruchy kabelů jsou nejčastěji způsobeny vlivem stárnutí materiálu, kvalitou a manipulací během pokládky a montáží, nebo zásahy cizích osob (velice často výkopové a stavební práce). Jednotlivé části vedení (kabely, kabelové soubory) mají specifické předpoklady, které se mohou vlivem času vyvinout až v poruchu. Například pro kabely s izolací napuštěným papírem a jejich kabelové soubory je vznik poruch většinou vázán na stav kabelového oleje. Poruchy kabelů mohou být z dlouhodobého hlediska způsobeny špatnou manipulací při pokládání kabelu, špatným uložení, nedokonalou montáží nebo propadáním pískovým ložem.

2.5.1 Jednofázové spojení se zemí

Kabelová vedení VN jsou provozována jako neúčinně uzemněné sítě. Nejčastější poruchou v neúčinně uzemněných sítích je jednofázové zemní spojení. Zem během ní přebírá část potenciálu porušené fáze. Velikost napětí země je určena velikostí impedance v místě poruchy. Během

zemního spojení je možné dále provozovat síť, ovšem jeho vznik zatěžuje rozvodná zařízení přepětími. Identifikace zemního spojení v síti neúčinně uzemněné je prováděna za pomoci vzniklé netočivé složky napětí a proudu. Metod indikace je několik, například využití netočivé složky proudu nebo měření výkonu nebo fázového úhlu mezi netočivými složkami napětí a proudu.

2.5.1.1 Vliv způsobu provozování kabelových sítí VN

Způsob provozování sítě značně ovlivňuje její chování během spojení jedné fáze se zemí, a tento vliv se projevuje primárně velikostí poruchového proudu a velikostí napětí mezi fázovým vodičem a zemí. S ohledem na tyto veličiny jsou následně voleny způsob dimenzování a chránění soustavy a nároky na izolaci.

Rozdělení sítí podle způsobu uzemnění uzlů vinutí transformátoru:

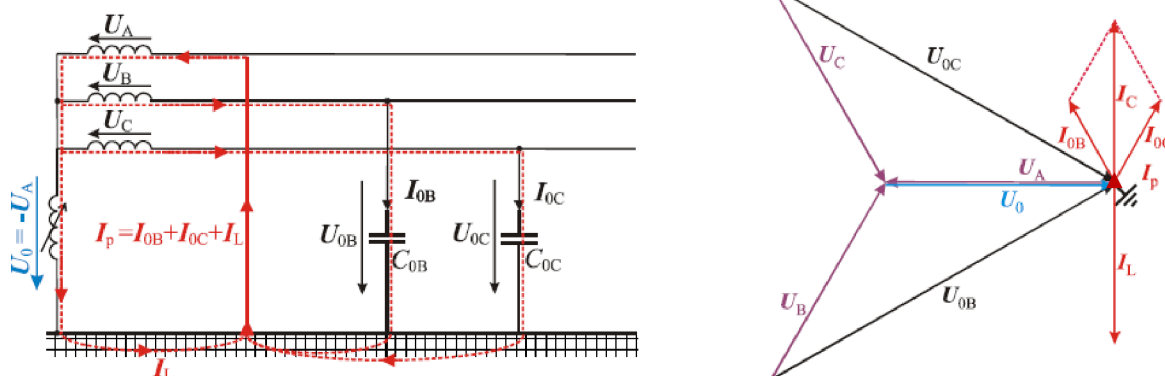
- izolovaný uzel
- účinně uzemněný uzel
- neúčinně uzemněný uzel
 - přes zhašecí tlumivku (Petersonovu cívku)
 - přes rezistanci

V ČR jsou kabelové sítě v rámci distribuční soustavy provozovány jako sítě neúčinně uzemněné, to znamená, že jsou uzly vinutí transformátoru uzemněny přes velkou impedanci.

Princip obou používaných způsobů uzemnění bude ilustrován na vodivém spojení jedné fáze se zemí. Kdy obecně platí, že v bezporuchovém stavu je mezi fázemi a zemí napětí fázové, zatímco napětí uzlu vinutí transformátoru vůči zemi je nulové. Po vzniku poruchy dojde k nárůstu napětí uzlu vinutí transformátoru vůči zemi na hodnotu napětí fázového a napětí zdravých fází vůči zemi vzroste na sdružené napětí. Zemní proud jež začne protékat místem poruchy je kapacitního charakteru. Jeho velikost je závislá na kapacitě zdravých fází celé sítě vůči zemi. Přičemž pro zjednodušení bude zanedbán činný odpor obvodu a uvažovat se bude pouze proud čistě kapacitního charakteru I_C .

Neúčinně uzemněná síť – uzemnění přes zhašecí tlumivku (kompenzovaná síť)

Uzemnění uzlu transformátoru je realizováno přes tzv. zhašecí tlumivku, která během poruchy začne fungovat jako zdroj induktivního proudu (obr. 2-2 značeno I_L). Tento proud je nutné regulovat podle velikosti zemního proudu, jež je dán celkovou délkou vedení a mění se s každou změnou konfigurace sítě. V momentě, kdy nabydou zemní a induktivní proud stejné velikosti se vzájemně vykompenzují a poruchový proud I_p bude nulový. Ovšem v případě uvažování činného odporu obvodu i cívky bude místem poruchy téct tzv. zbytkový proud nabývající velice malých hodnot. Obecně bývá velikost zbytkového proudu v rozmezí 3–10 % celkového kapacitního proudu soustavy. Takto provozovaná soustava je síť kompenzovaná.

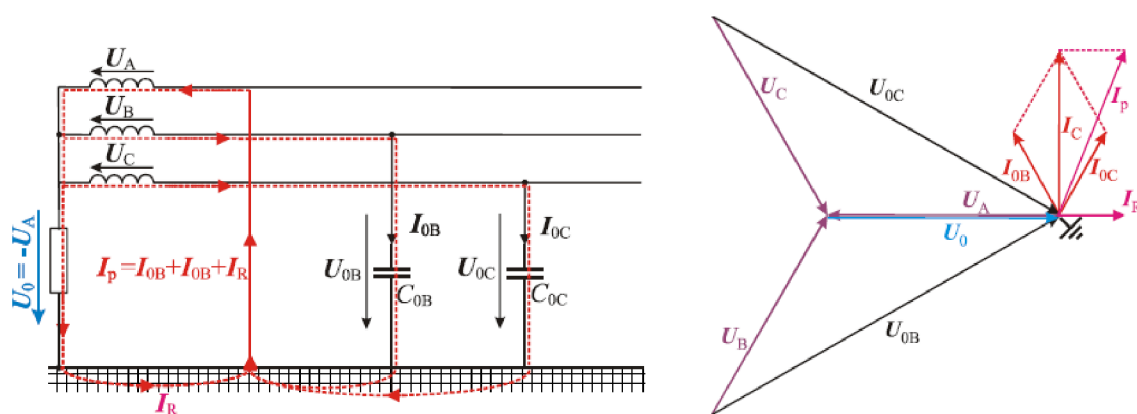


Obr. 2-2 Uzemnění přes zhášecí tlumivku [2]

V případě kabelových soustav je možné použít tento způsob uzemnění pro síť, kde celkový kapacitní proud sítě nepřesáhne 450 A, tato mez byla dána pro zajištění bezpečnosti s ohledem na hodnoty dotkových a krokových napětí. Výhodou kompenzovaných sítí je možnost provozu i během zemního spojení a nízká hodnota poruchového proudu, ovšem velkou nevýhodou je složitá lokalizace poruchy. Pro potřebu lokalizování poruchy byla zavedena varianta kompenzované sítě s automatikou připínání pomocného odporu.

Neúčinně uzemněný uzel – uzemnění přes uzlový odporník

Tento způsob provozu je preferován u rozsáhlých kabelových sítí, vzhledem k vyskytujícím se velkým kapacitním proudům poruchy. Uzemnění nulového bodu transformátoru je provedeno pomocí rezistoru. Na rozdíl od uzemnění přes tlumivku, kde dochází ke kompenzaci poruchového proudu a zbytkový proud procházející místem poruchy nabývá malých hodnot, v sítích uzemněných přes odpor je poruchový proud navyšován. Poruchový proud je dán fázorovým součtem celkového kapacitního proudu soustavy, jež je jalového charakteru, a proudem procházející přes odporník I_R , který je činného charakteru. Poruchový proud je pomocí vhodné velkého odporníku navyšěn na hodnoty, kdy je spojení jedné fáze se zemí považováno za jednofázový zkrat.



Obr. 2-3 Uzemnění přes rezistenci [2]

Volba odporníku je složitá vzhledem k protichůdným požadavkům. S ohledem na bezpečnost jsou požadavky na co nejnižší jmenovitý proud odporníku, ale současně je vyžadován co nejvyšší proud odporníku, aby byla zajištěna správná činnost ochran.

3 PŘÍBLIŽNÁ LOKALIZACE PORUCHY POMOCÍ OCHRAN

Kabelové sítě 22 kV jsou stejně jako všechny používané elektrické soustavy jištěny pro případ vzniku poruch pomocí ochran. Ty indikují vznik poruchy a podle vlastního nastavení vyhodnotí další postup (vypnutí vedení, sepnutí časového členu, OZ, atd.). Pro urychlení dohledání místa poruchy a možnost jejího rychlého odstranění, byly do digitálních ochranných implementovány lokátory poruch, které posílají vyměřené kilometry do řídicího systému SCADA. Vzdálenost místa vzniku poruchy je vymezena na základě ochrannou vygenerovaných poruchových záznamů.

Lokátory našly uplatnění zejména u sítí s jednoduchou topologií a konstantními elektrickými parametry v celém úseku, jako jsou soustavy 110 kV. U těchto soustav je možné využití lokátorů jak k určení místa vzniku zemní poruchy, tak pro místo vzniku mezifázové poruchy. Využití lokátorů v sítích 22 kV je obtížnější vzhledem ke složitější topologii sítě a častým změnám elektrických parametrů podél vedení, způsobených zejména různými průřezy vodičů nebo jejich různým uspořádáním. Na napěťové hladině 22 kV jsou údaje poskytované lokátory považovány za relevantní pouze v případě, že se jedná o poruchu mezifázovou, jelikož zemní poruchy u kompenzovaných vedení není lokátor schopen adekvátně změřit.

V ČR se na vedeních v soustavách 22 kV společnosti E.ON používají zejména ochrany Siemens typu 7SJ63 a 7SJ8. V této kapitole bude přiblížena funkce lokátoru poruch ochrany SIPROTEC 7SJ63.

3.1 Funkce lokátoru

Funkce lokátoru je aktivována, když směrové nebo nesměrové prvky nadproudového relé ochrany vyšlou vypínací signál. Do paměti ochrany jsou uloženy dvojice změřených hodnot poruchového proudu a poruchového napětí, ze kterých je následně možné vyčíslit hodnoty parametrů impedanční smyčky (odporu R a reaktance X). Z uložených dat jsou vypočteny nejméně tři výsledné dvojice R a X . Po selekci relevantních a sporných výsledků, které jsou rozpoznány velkou odchylkou od směrodatné odchylky a z výpočtu vyřazeny, jsou znovu vypočteny průměrné hodnoty pro reaktanci smyčky X . Získaná poruchová reaktance je úměrná elektrické vzdálenosti místa poruchy od napájecí rozvodny.

Vzdálenost místa poruchy udaná reaktancí poruchové smyčky nemusí odpovídat pouze jednomu místu v soustavě. Zde přichází na řadu další vypovídající prvky vedení, jako jsou inteligentní dálkově ovladatelné úsekové odpínače. Ty jsou vybaveny měřením proudů a napětí a ochrannými funkcemi, jež signalizují, když přes ně prochází poruchový proud. Všechny tyto dílčí informace jsou poskytnuty řídicímu systému GIS (geografický informační systém) v němž jsou zpracovávány a v mapě je graficky vyznačeno předpokládané místo/místa poruchy. Zpracované výsledky jsou poskytnuty dispečerovi VN dané oblasti.

3.1.1 Výpočet impedance poruchové smyčky

Poruchová smyčka vzniká se vznikem poruchy. Její impedance je dána součtem impedancí všech částí obvodu, kterými protéká poruchový proud od zdroje k místu poruchy. Výpočet impedance poruchové smyčky se dále odvíjí podle místa poruchy, jejího typu a typu uzemnění zdroje napájení, tedy distribučního transformátoru. Pro některé typy poruch vzniká zároveň s poruchou několik poruchových smyček, jedná se o poruchy třífázové, spojení tří fází se zemí anebo dvou fází se zemí.

Sousledná složka impedance vedení $\underline{Z}_L^{(1)}$ se vypočte z měrných hodnot rezistence R_k a reaktance X_k a délky vedení l jako

$$\underline{Z}_L^{(1)} = (R_k + jX_k) \cdot l. \quad (3.1)$$

Zpětná složka je u vedení rovna sousledné, tzn. $\underline{Z}_L^{(1)} = \underline{Z}_L^{(2)}$. Netočivá (nulová) složka impedance vedení $\underline{Z}_L^{(0)}$ se vypočte z udaných měrných hodnot pro daný typ kabelu, nebo podle poměru mezi souslednou a netočivou složkou impedance.

Především v případě jednofázových poruch se zemí je potřeba počítat nejen s impedancí vedení, ale i zpáteční cestou, která není předem určená. Impedance zpětné cesty proudu je

$$\underline{Z}_{LE} = \frac{1}{3} (\underline{Z}_L^{(0)} - \underline{Z}_L^{(1)}). \quad (3.2)$$

Pro impedanci poškozené části vedení $\underline{Z}_{sc}^{(1)}$ budou hodnoty vztaženy na zjištěnou vzdálenost poruchy $l_{p-skutečná}$. Hodnoty napětí \underline{U}_{sc} a proudu \underline{I}_{sc} v místě ochrany jsou dané typem poruchy. V případě mezifázové poruchy jsou napětí a proud

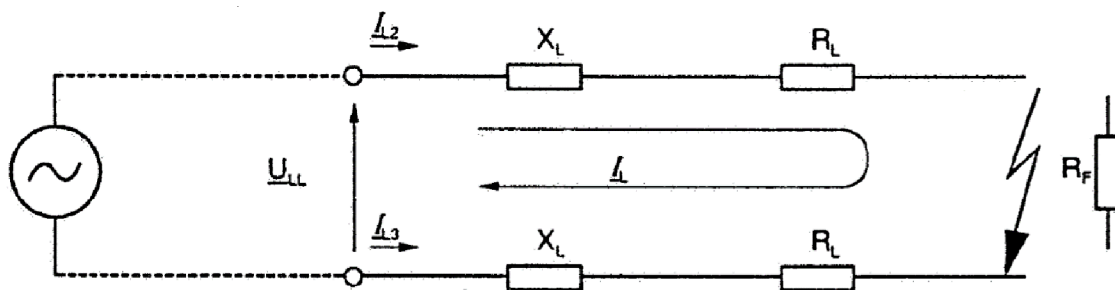
$$\underline{U}_{sc} = \underline{U}_{ph1} - \underline{U}_{ph2} = \underline{U}_{ph1-ph2} \quad \text{a} \quad \underline{I}_{sc} = \underline{I}_{ph1} - \underline{I}_{ph2}. \quad (3.3)$$

Pro jednofázové spojení se zemí platí

$$\underline{U}_{sc} = \underline{U}_{ph-E} \quad \text{a} \quad \underline{I}_{sc} = \underline{I}_{ph} - \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E. \quad (3.4)$$

3.1.1.1 Porucha fáze-fáze

Při mezifázové poruše dojde k vodivému spojení dvou fází, čímž vznikne poruchová impedanční smyčka, jejíž reaktance vypovídá o vzdálenosti poruchy od rozvodny, v níž je umístěna ochrana s funkcí lokátoru. Výpočet poruchové smyčky bude ilustrován pomocí obrázku 3-1, kde budou parametry každé fáze zastoupeny odporem R_L a reaktancí X_L , v místě poruchy (elektrického oblouku) bude uvažován odpor poruchy R_F .



Obr. 3-1 Náhradní schéma poruchové smyčky mezifázové poruchy fází L2-L3 [3]

Hlavními vypovídajícími parametry jsou ochranou zaznamenané sružené napětí $\underline{U}_{ph1-ph2}$ a fázové proudy \underline{I}_{ph1} a \underline{I}_{ph2} . Pro sružené napětí a pro fázové proudy dále platí

$$\underline{U}_{ph1-ph2} = \underline{U}_{ph1} - \underline{U}_{ph2} = \underline{Z}_{sc}^{(1)} \cdot \underline{I}_{ph1} - \underline{Z}_{sc}^{(1)} \cdot \underline{I}_{ph2}, \quad (3.5)$$

$$\underline{I}_{ph1} = -\underline{I}_{ph2} = \underline{I}_{ph1-ph2}. \quad (3.6)$$

Impedance poruchové smyčky se vyjádří jako

$$\underline{Z}_{ph1-ph2} = \frac{\underline{U}_{ph1-ph2}}{\underline{I}_{ph1} - \underline{I}_{ph2}}, \quad (3.7)$$

při dosazení rovnic (3.5) a (3.6) do vzorce (3.7) se proudy vykrátí a vypočtená impedance je rovna sousledné složce impedance postiženého vedení $\underline{Z}_{ph1-ph2} = \underline{Z}_{sc}^{(1)}$.

Pro konkrétní případ, kdy dojde k mezifázové poruše fází L2 a L3 na konci vedení, tzn. $\underline{Z}_{sc}^{(1)} = \underline{Z}_L^{(1)}$ (viz. obr 3-1). Jsou změřenými parametry poruchy sružené napětí \underline{U}_{L2-L3} a fázové proudy \underline{I}_{L2} a \underline{I}_{L3} . Impedance poruchové smyčky L2-L3 je tedy

$$\underline{Z}_{L2-L3} = \frac{\underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3}}{\underline{I}_{L2} - \underline{I}_{L3}} = \frac{\underline{U}_{L2-L3}}{\underline{I}_{L2} - \underline{I}_{L3}}, \quad (3.8)$$

přičemž reálnou složku impedance R_{L2-L3} a imaginární složku impedance X_{L2-L3} lze samostatně vyčíslit jako

$$R_{L2-L3} = \frac{U_{L2-L3} \cdot [I_{L2} \cdot \cos(\varphi_{U,L2-L3} - \varphi_{I,L2}) - I_{L3} \cdot \cos(\varphi_{U,L2-L3} - \varphi_{I,L3})]}{I_{L2}^2 - 2 \cdot I_{L2} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_{I,L2} - \varphi_{I,L3}) + I_{L3}^2}, \quad (3.9)$$

$$X_{L2-L3} = \frac{U_{L2-L3} \cdot [I_{L2} \cdot \sin(\varphi_{U,L2-L3} - \varphi_{I,L2}) - I_{L3} \cdot \sin(\varphi_{U,L2-L3} - \varphi_{I,L3})]}{I_{L2}^2 - 2 \cdot I_{L2} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_{I,L2} - \varphi_{I,L3}) + I_{L3}^2}. \quad (3.10)$$

Pro případ vedení napájeného z jednoho konce, kdy platí pro fázový úhel proudů $\varphi_{I,L3} = \varphi_{I,L2} + 180^\circ$, je možné rovnice (3.9) a (3.10) zjednodušit na:

$$R_{L2-L3} = \frac{U_{L2-L3} \cdot \cos(\varphi_{U,L2-L3} - \varphi_{I,L})}{2 \cdot I_L} = \frac{U_{L2-L3} \cdot \cos(\varphi_{sc})}{2 \cdot I_L}, \quad (3.11)$$

$$X_{L2-L3} = \frac{U_{L2-L3} \cdot \sin(\varphi_{U,L2-L3} - \varphi_{I,L})}{2 \cdot I_L} = \frac{U_{L2-L3} \cdot \sin(\varphi_{sc})}{2 \cdot I_L}, \quad (3.12)$$

kde φ_{sc} je fázový úhel poruchové smyčky.

Při uvažování odporu místa poruchy se výpočet impedance poruchové smyčky L2-L3 změní následujícím způsobem. Velikost odporu místa poruchy se promítne v hodnotě sruženého napětí

$$\underline{U}_{L2-L3} = \underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} = 2 \cdot (R_{sc} \cdot \underline{I}_{L2-L3} + jX_{sc} \cdot \underline{I}_{L2-L3}) + R_F \cdot \underline{I}_{L2-L3}. \quad (3.13)$$

Dosazení do (3.5) a s uvažováním $\underline{I}_{L2} = -\underline{I}_{L3} = \underline{I}_{L2-L3}$, platí pro impedanci poruchové smyčky mezifázové poruchy fází L2 a L3

$$\underline{Z}_{L2-L3} = \frac{2 \cdot (R_L \cdot \underline{I}_{L2-L3} + jX_L \cdot \underline{I}_{L2-L3}) + R_F \cdot \underline{I}_{L2-L3}}{2 \cdot \underline{I}_{L2-L3}} = R_L + \frac{R_F}{2} + jX_L. \quad (3.14)$$

3.1.1.2 Porucha fáze-zem

Při spojení fáze se zemí je určení impedance poruchové smyčky složitější. Při mezifázové poruše známe cestu k poruše i od poruchy, ale v případě poruchy fáze-zem je zpáteční cesta nejistá. Do výpočtu se zavádí zemní poměr \underline{k}_E

$$\underline{k}_E = \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}, \quad (3.15)$$

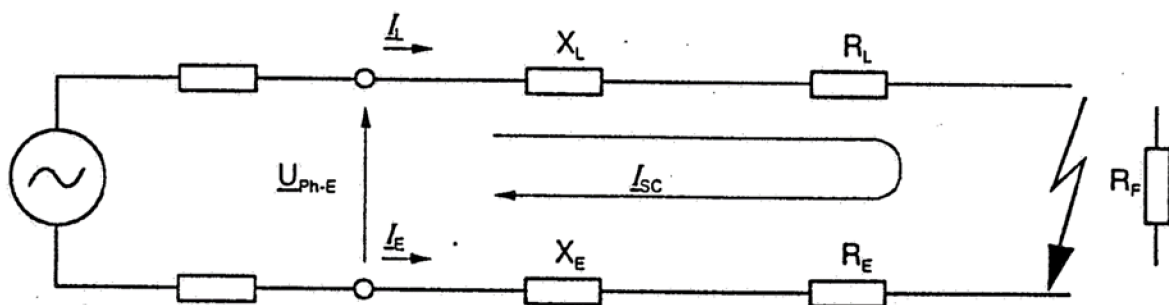
hodnota \underline{Z}_L se vypočte podle (3.1) a \underline{Z}_E podle (3.2).

Zemní poměr \underline{k}_E je ovlivněn způsobem uzemnění uzlů vinutí transformátoru. Na napěťové hladině 22 kV jsou sítě uzemněny přes uzlové odporníky anebo zhášecí tlumivky. V rámci této práce je relevantní uzemnění přes uzlové odporníky.

V následujícím textu bude prvně předveden výpočet pro případ, kdy jsou uzly transformátoru přímo uzemněny a následně pro případ, kdy jsou uvažovány uzlové odporníky.

Přímo uzemněný uzel

Jednofázové spojení se zemí na hladině 22 kV, s distribučním transformátorem 110/22 kV uzemněným na straně 22 kV přes uzlové odporníky, lze považovat za síť přímo uzemněnou pouze v případě, že je velikost odporníků R_{odp} výrazně menší než netočivá složka příčné admittance $Y_L^{(0)}$, tzn. platí $3 \cdot R_{\text{odp}} \ll$



Obr. 3-2 Náhradní schéma poruchové smyčky spojení jedné fáze se zemí [3]

Vzorec pro výpočet impedance poruchové smyčky

$$\underline{Z}_{ph-E} = \frac{\underline{U}_{ph-E}}{\underline{I}_{ph} - \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E}, \quad (3.16)$$

kde je \underline{I}_{ph} proud fází v poruše, \underline{I}_E je proud zemí a fázové napětí je

$$\underline{U}_{ph-E} = \underline{I}_{ph} \cdot \underline{Z}_{sc}^{(1)} - \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_{scE}^{(0)} = \underline{Z}_{sc}^{(1)} \cdot \left(\underline{I}_{ph} - \frac{\underline{Z}_{scE}}{\underline{Z}_{sc}^{(1)}} \cdot \underline{I}_E \right), \quad (3.17)$$

je možné zapsat ve tvaru

$$\underline{Z}_{ph-E} = \underline{Z}_{sc}^{(1)} \cdot \frac{\left(\underline{I}_{ph} - \frac{\underline{Z}_{scE}}{\underline{Z}_{sc}^{(1)}} \cdot \underline{I}_E \right)}{\underline{I}_{ph} - \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E}. \quad (3.18)$$

Zemní poměr je vhodně nastaven tehdy, když platí $\underline{k}_E = \frac{\underline{Z}_{scE}}{\underline{Z}_{sc}^{(1)}}$.

Zemní poměr \underline{k}_E je komplexní číslo. Ochrana na chráněné lince si počítá zemní poměr sama, podle zadané reálné složky zemního poměru \underline{k}_{RE} a imaginární složky zemního poměru \underline{k}_{XE} . Vzorec pro určení zemního poměru a jeho složek podle vzorců z [3]

$$\underline{k}_{RE} = \frac{R_E}{R_L} = \frac{R^{(0)} - R^{(1)}}{3 \cdot R^{(1)}}, \quad (3.19)$$

$$\underline{k}_{XE} = \frac{X_E}{X_L} = \frac{X^{(0)} - X^{(1)}}{3 \cdot X^{(1)}}, \quad (3.20)$$

$$\underline{k}_E = \frac{(k_{RE} \cdot R_L + jX_L \cdot k_{XE}) \cdot (R_L - jX_L)}{R_L^2 + X_L^2}. \quad (3.21)$$

Použité hodnoty impedance jsou pro chráněnou sekci vedení. U distančních ochran se běžně nastavuje pro první zónu $\underline{Z}_{z1} = 0,85 \cdot \underline{Z}_L$.

Pro výpočet reaktance a rezistence jednofázového spojení se zemí je možné využít tyto vzorce

$$R_{ph-E} = \frac{U_{ph-E}}{I_L} \cdot \frac{\cos(\varphi_U - \varphi_{IL}) - \frac{I_E}{I_L} \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_E)}{1 - \left(\frac{X_E}{X_L} + \frac{R_E}{R_L} \right) \cdot \frac{I_E}{I_L} \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_{IL}) + \frac{R_E}{R_L} \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot \left(\frac{I_E}{I_L} \right)^2}, \quad (3.22)$$

$$X_{ph-E} = \frac{U_{ph-E}}{I_L} \cdot \frac{\sin(\varphi_U - \varphi_{IL}) - \frac{I_E}{I_L} \cdot \frac{R_E}{R_L} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_E)}{1 - \left(\frac{X_E}{X_L} + \frac{R_E}{R_L} \right) \cdot \frac{I_E}{I_L} \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_{IL}) + \frac{R_E}{R_L} \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot \left(\frac{I_E}{I_L} \right)^2}, \quad (3.23)$$

kde U_{ph-E} je velikost zkratového napětí a jeho fázový úhel φ_U , I_L modul zkratového proudu fáze a jeho fázový úhel φ_{IL} , I_E velikost zkratového proudu zemí a jeho fázový úhel φ_E . Poměry R_E / R_L a X_E / X_L jsou parametry nastavené v ochraně pro reziduální kompenzaci.

Výpočet (3.22) a (3.23) je možné zjednodušit, pokud jsou proudy \underline{I}_L a \underline{I}_E přibližně v protifázi. Tedy v případě, že platí $\varphi_E = \varphi_L + 180^\circ$, přičemž velikosti proudů mohou být rozdílné v závislosti na typu uzemnění. Zjednodušené vzorce jsou

$$R_{ph-E} = \frac{U_{ph-E} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I)}{I_L + \frac{R_E}{R_L} \cdot I_E} = \frac{U_{ph-E} \cdot \cos(\varphi_{sc})}{I_L + \frac{R_E}{R_L} \cdot I_E}, \quad (3.24)$$

$$X_{ph-E} = \frac{U_{ph-E} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I)}{I_L + \frac{X_E}{X_L} \cdot I_E} = \frac{U_{ph-E} \cdot \sin(\varphi_{sc})}{I_L + \frac{X_E}{X_L} \cdot I_E}, \quad (3.25)$$

kde φ_U je fázový úhel napětí, φ_I je fázový úhel proudů \underline{I}_L a \underline{I}_E , úhel poruchové smyčky je $\varphi_{sc} = \varphi_U - \varphi_I$.

Pro případ s odporem poruchy, je napětí v místě ochrany

$$\underline{U}_{ph-E} = \underline{I}_L \cdot (R_L + jX_L) + \underline{I}_E \cdot (R_E + jX_E) + \underline{I}_L \cdot R_F. \quad (3.26)$$

Dosazením do vzorců (3.24) a (3.25) se získají dvě nové rovnice, kde $(R_E / R_L)_{set}$ a $(X_E / X_L)_{set}$ odpovídají nastavení ochran

$$R_{ph-E} = \frac{R_L \cdot \left(\underline{I}_L + \frac{R_E}{R_L} \cdot \underline{I}_E \right) + R_F \cdot \underline{I}_L}{\underline{I}_L + \left(\frac{R_E}{R_L} \right)_{set} \cdot \underline{I}_E}, \quad (3.27)$$

$$X_{ph-E} = \frac{X_L \cdot \left(\underline{I}_L + \frac{X_E}{X_L} \cdot \underline{I}_E \right)}{\underline{I}_L + \left(\frac{X_E}{X_L} \right)_{set} \cdot \underline{I}_E}. \quad (3.28)$$

Při přizpůsobení nastavení ochrany chráněné lince, tzn. $(R_E / R_L)_{set} = R_E / R_L$ a $(X_E / X_L)_{set} = X_E / X_L$, se dosáhne přesného určení reaktance bez ohledu na velikost rezistence poruchy R_F . Platí

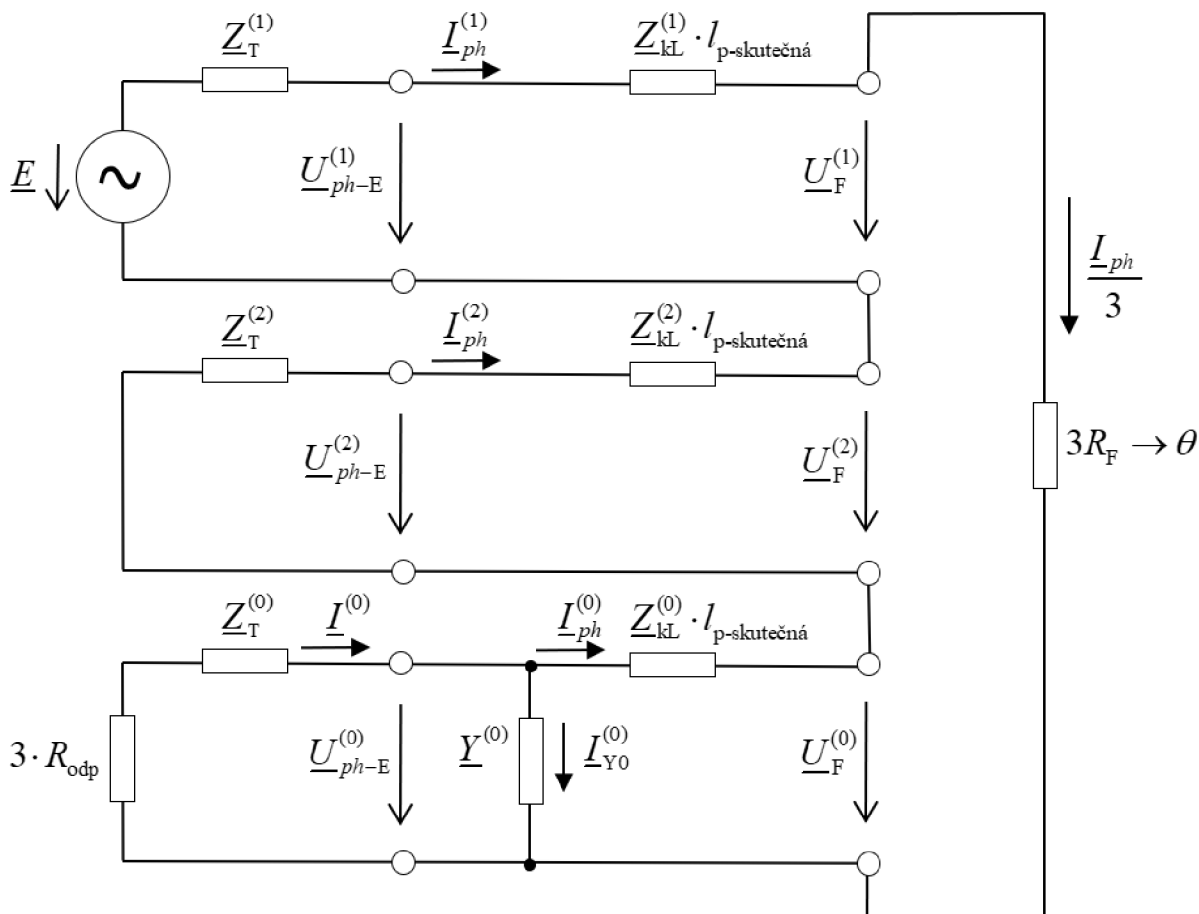
$$X_{ph-E} = X_L, \quad (3.29)$$

$$R_{ph-E} = R_L + \frac{R_F}{1 + \left(\frac{R_E}{R_L} \right)_{set}}. \quad (3.30)$$

Uzemnění přes uzlové odporníky

Jedním ze zjednodušujících předpokladů při výpočtech poruch je, že proudy protékající v příčném směru přes kapacitu a konduktanci jsou tak malé v porovnání s proudy protékajícími v podélném směru, že se příčná admitance všech prvků soustavy (transformátorů, vedení atd.) neuvažuje.

Náhradní schéma jednofázového spojení se zemí ve složkovém tvaru je zobrazeno na obrázku 3-3. Způsob uzemnění uzlů transformátoru se projevuje v části netočivé složky schématu.



Obr. 3-3 Náhradní složkové schéma – jednofázové spojení se zemí

Ekvivalentní napěťový zdroj pro jednofázové spojení se zemí je

$$\underline{E} = \frac{c \cdot \underline{U}_n}{\sqrt{3}}, \quad (3.31)$$

kde \underline{U}_n je jmenovité napětí a konstanta $c = 1,1$ je součinitel pro výpočet zkratových proudů.

Za použití I. a II. KZ se z náhradního schématu sestaví rovnice, která umožní určit vzdálenost poruchy l_p . Vzdálenost poruchy l_p se určí z podílu změřeného napětí \underline{U}_{ph-E} a proudu \underline{I}_{ph} v místě ochrany

$$\begin{aligned} \frac{\underline{U}_{ph-E}}{\underline{I}_{ph}} &= \frac{\underline{U}_{ph-E}^{(1)} + \underline{U}_{ph-E}^{(2)} + \underline{U}_{ph-E}^{(0)}}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} = \frac{\underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} + \underline{U}_F^{(0)} + I_p \cdot \left(\underline{Z}_{kl}^{(1)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{Z}_{kl}^{(2)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{Z}_{kl}^{(0)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(0)} \right)}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} \\ &= \frac{\underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} + \underline{U}_F^{(0)}}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} + \frac{I_p \cdot \left(\underline{Z}_{kl}^{(1)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{Z}_{kl}^{(2)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{Z}_{kl}^{(0)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(0)} \right)}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}}. \end{aligned}$$

Impedance vedení je pro souslednou a zpětnou soustavu stejná $\underline{Z}_L^{(1)} = \underline{Z}_L^{(2)}$.

$$\begin{aligned} \frac{\underline{U}_{ph-E}}{\underline{I}_{ph}} &= \frac{\underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} + \underline{U}_F^{(0)}}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} + \frac{I_p \cdot \left(\underline{Z}_{kl}^{(1)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{Z}_{kl}^{(2)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{Z}_{kl}^{(0)} \cdot \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)} - \underline{I}_{ph}^{(0)} \cdot \underline{Z}_{kl}^{(2)} \right)}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}}, \\ \frac{\underline{U}_{ph-E}}{\underline{I}_{ph}} &= \frac{\underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} + \underline{U}_F^{(0)}}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} + \frac{I_p \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)} \left(\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} \right)}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} + \frac{I_p \cdot \underline{I}_{ph}^{(0)} \left(\underline{Z}_{kl}^{(0)} - \underline{Z}_{kl}^{(1)} \right)}{\underline{I}_{ph}^{(1)} + \underline{I}_{ph}^{(2)} + \underline{I}_{ph}^{(0)} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}}. \quad (3.32) \end{aligned}$$

Dosazením vzorce pro zemní poměr (3.15) do výpočtu impedance (3.2) se získá $3 \cdot \underline{Z}_L^{(1)} \cdot \underline{k}_E = \underline{Z}_L^{(0)} - \underline{Z}_L^{(1)}$. Dále je možné nahradit napětí v místě poruchy jejím odporem a protékajícím proudem $\underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} + \underline{U}_F^{(0)} = 3 \cdot R_F \cdot \underline{I}_{ph}^{(1)}$. Uvažuje se, že pro proudy platí

$\underline{I}_{ph}^{(1)} = \underline{I}_{ph}^{(2)} = \underline{I}_{ph}^{(0)} = \frac{\underline{I}_{ph}}{3}$. Tato zjednodušení se dosadí se do rovnice (3.32)

$$\begin{aligned} \frac{\underline{U}_{ph-E}}{\underline{I}_{ph}} &= \frac{3 \cdot R_F \cdot \underline{I}_{ph}^{(1)}}{\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} + \frac{I_p \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)} \cdot \underline{I}_{ph}}{\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} + \frac{I_p \cdot \underline{I}_{ph}^{(0)} \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)} \cdot 3 \cdot \underline{k}_E}{\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} \\ &= \frac{3 \cdot R_F \cdot \underline{I}_{ph}^{(1)}}{\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} + I_p \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)} \cdot \frac{\left(\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{ph}^{(0)} \cdot 3 \cdot \underline{k}_E \right)}{\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}}, \quad (3.33) \end{aligned}$$

a tím se vytvoří konečná podoba rovnice

$$\frac{\underline{U}_{ph-E}}{\underline{I}_{ph}} = R_F \cdot \frac{\underline{I}_{ph}}{\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}} + I_p \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)} \frac{\underline{I}_{ph} + \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E}{\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}}. \quad (3.34)$$

Pro zemní poměr pak platí

$$\underline{k}_E = \frac{\underline{U}_{ph-E} \cdot \left(\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)} \right)}{\underline{I}_E \cdot \underline{I}_{ph} \cdot I_p \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)}} - \frac{R_F \cdot \underline{I}_{ph}}{I_p \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)} \cdot \underline{I}_E} - \frac{\underline{I}_{ph}}{\underline{I}_E}. \quad (3.35)$$

V případě, že odpor poruchy bude nula nebo se k ní bude blížit, platí

$$\frac{\underline{U}_{ph-E}}{\underline{I}_{ph}} = I_p \cdot \underline{Z}_{kl}^{(1)} \frac{\underline{I}_{ph} + \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E}{\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)}}, \quad (3.36)$$

vzdálenost poruchy se určí z imaginární složky impedance

$$\underline{Z}_{ph-E} = \frac{\underline{U}_{ph-E} \cdot (\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)})}{\underline{I}_{ph} \cdot (\underline{I}_{ph} + \underline{I}_E \cdot \underline{k}_E)} \quad (3.37)$$

Zemní poměr je

$$\underline{k}_E = \frac{\underline{U}_{ph-E} \cdot (\underline{I}_{ph} + \underline{I}_{Y0}^{(0)})}{\underline{I}_E \cdot \underline{I}_{ph} \cdot l_p \cdot \underline{Z}_{KL}^{(1)}} - \frac{\underline{I}_{ph}}{\underline{I}_E} \quad (3.38)$$

3.1.2 Vyhodnocení vzdálenosti poruchy

V předchozích podkapitolách byla zdůrazněna neměnnost poměru reaktance a vzdálenosti s ohledem na poruchu. Je tedy možné stanovit vzdálenost poruchy podle ochrany zjištěné reaktance X_{prim} a měrné reaktance na jednotku délky X' , která je zadaná v lokátoru

$$l_{p-ochrana} = \frac{X_{prim}}{X'} \quad (3.39)$$

Relativní chybu v procentech je možné určit, když je známa nejen vzdálenost stanovená pomocí lokátoru $l_{p-ochrana}$, ale i vzdálenost přesná (fyzicky určena) $l_{p-skutečná}$

$$\delta_{\%} = \frac{|l_{p-ochrana} - l_{p-skutečná}|}{l_{p-skutečná}} \cdot 100 \quad (3.40)$$

3.1.3 Postup vyhledání místa poruchy s pomocí lokátoru

Lokátorem vypočítaná reaktance poruchové smyčky je zapsána do registru. Následně lokátorem zasláná komunikací řídicímu systému rozvodny, kde dojde k přepočtu na primární hodnoty. Reaktance jedné fáze postiženého úseku je uložena do archivu systému SCADA a zároveň zobrazena v systému dispečerovi.

Dispečer má nyní k dispozici hlášení ochrany, hodnoty reaktance získané lokátorem a hlášení inteligentních dálkově ovladatelných úsekových odpínačů, kterými poruchový proud procházel, než ochrana vybavila a vypla celý postižený vývod. Dispečer musí postupně obnovit dodávku v postiženém vývodu tak, aby minimalizoval vliv poruchy na koncové spotřebitele. Ze získaných údajů je schopen identifikovat a vypnout nejbližší situované dálkově ovladatelné odpínače a obnovit dodávku v nepostižené části vývodu.

Při dohledávání vzdálenosti pomocí vypočtené reaktance je potřeba dbát na to, že kabelová vedení mohou být složena z více typů kabelů. Reaktance jednotlivých úseků kabelu jsou rozdílné v závislosti na použitém typu kabelu. V těchto situacích vzdálenost nelze zjistit jednoduchým poměrem vypočtené poruchové reaktance a poměrné reaktance daného typu vedení. Proto je vhodné znát reaktance jednotlivých úseků kabelu a místo poruchy určit pomocí postupného sčítání reaktancí jednotlivých úseků směrem od rozvodny. Poškozený úsek je vybrán tak, že po přičtení jeho reaktance, bude součtová reaktance větší než poruchová reaktance. Pokud by si byly hodnoty rovny, šlo by s největší pravděpodobností o poruchu na pomezí dvou úseků kabelu (např. porucha na kabelové spoje).

4 LOKALIZACE PORUCH KABELOVÝCH VEDENÍ

Lokalizace poruch je důležitou součástí energetiky. Na rozdíl od venkovních vedení, kde jsou porušená místa dohledatelná často pouze s pomocí lidského zraku, v případě kabelových vedení ukládaných pod úrovní povrchu země je dohledání místa poruchy o poznání složitější. Není myslitelné pro lokalizaci poruchy vykopat celý kabel s délkou v řádech kilometrů. Požadavky na rychlejší odstranění poruch a tedy i rychlejší obnovení dodávky elektrické energie, vedly k vytvoření mnoha různých postupů a metod, které mají umožnit přesné a rychlé dohledání poruchy kabelu.

Dohledání poruchy na kabelu je nutné provádět v terénu. V závislosti na charakteru poruchy je potřeba zvolit vhodnou metodu, přičemž provedení jednotlivých metod vyžaduje určité vybavení. Potřebná mobilita velkého množství zařízení vedla k tomu, že se k lokalizaci poruch a zkoušení kabelů dnes používají především kabelové měřicí vozy, které obsahují příslušenství pro realizaci osvědčených používaných metod, jež jsou popsány níže v této kapitole.

Hlavními výhodami použití měřicího vozu je velmi přesná identifikace místa poruchy, která minimalizuje zemní práce při vyhledávání poruchy výkopovou metodou a při následném obnovování původního stavu povrchu a dále tím minimalizuje i finanční náklady na opravu. V některých případech je možné nejen vyhledání místa poruchy, ale i následná oprava, čímž se zkrátí čas do obnovy dodávky elektrické energie konečným zákazníkům. Vybavení vozu často umožňuje provést i diagnostiku celkového stavu kabelu.

4.1 Postup

Vzhledem k velkému množství faktorů (typ poruchy, konfigurace sítě, typ kabelu a jeho izolace, atd.), které ovlivňují metody lokalizace poruch byl vytvořen postup, který je složen z mnoha dílčích úloh a vede k rychlejšímu řešení nastalého problému postupnou selekcí vhodných metod. Postup lokalizace poruchy je možné shrnout do těchto kroků:

- Indikace poruchy
- Odpojení a uzemnění
- Analýza poruchy a zkouška izolace
- Předběžná lokalizace poruch kabelu
- Zaměření kabelové trasy
- Přesná lokalizace poruchy kabelu (zaměření)
- Identifikace kabelu
- Označení a oprava kabelu
- Zkouška a diagnostika kabelu
- Zapnutí napájení

Vhodné je začít **analýzou kabelu**, kdy se zjistí údaje, které mají vliv na postup lokalizace poruchy. Důležité jsou zejména informace o jeho typu, materiálu izolace (rozdílná impulzní rychlost $v/2$), délce zkoušeného kabelu, způsobu uložení, konfiguraci sítě (umístění a délky T-odboček). Dále pak musí být známy všechny hodnoty odporu (žíla-zem, žíla-žíla) a všechny odpory vedení.

Analýza poruchy a určení **typu poruchy** je realizována měřením velikosti izolačních odporů nebo napěťovou zkouškou. Poruchy se podle velikosti odporu dělí na nízko-ohmové a vysoko-ohmové. Za předěl je považován odpor 100 – 200 Ω , tato hodnota byla zvolena z důvodu změny

reakce poruchy na měření pomocí reflektometrie, kdy se z negativního odrazu stává impedanční charakteristika.

Tab. 4-1 Rozdělení typů poruch kabelů [1]

Porucha mezi: žilou a žilou žilou a pláštěm	Nízko-ohmová porucha $R < 100 - 200 \Omega$	Zkrat
	Vysoko-ohmová porucha $R > 100 - 200 \Omega$	Přerušované poruchy (průraz, jiskra) Přerušování (přetržení)
Porucha vnějšího ochranného pláště (PVC, PE)	Porucha pláště kabelu	

Nejčastěji se vyskytují poruchy mezi žilou a pláštěm. Důvodem přerušování žíly mohou být například rozpojený spoj nebo vypařený kabelový úsek. Takto vzniklá porucha naruší spojitost a je možné ji určit s pomocí obyčejného multimetru, zkouškou smyčkového odporu. Tu je možné realizovat tak, že se na vzdáleném konci nechá uzemněný jistič. Odpor vedení za normálního stavu je uvažováno $R_L \sim 0,7 \Omega/\text{km}$.

Při výpočtu smyčkového odporu R_L (Ω), uvažujeme měrný odpor žíly ρ_C ($\Omega\text{mm}^2/\text{km}$), průřez vodiče A_C (mm^2), měrný odpor pláště ρ_S ($\Omega\text{mm}^2/\text{km}$), průřez pláště A_S (mm^2) a délku kabelu l (km).

$$R_L = \frac{\rho_C \cdot l}{A_C} + \frac{\rho_S \cdot l}{A_S} \quad (\Omega) \quad (4.1)$$

4.2 Metody předběžné lokalizace poruch

Při předběžné lokalizaci poruch se vzdálenost poruchy určuje většinou metodami založenými na impulzní reflektometrii. Principem reflektometrie je, že je do kabelu vyslán vysokofrekvenční impulz a na zařízení je zaznamenán jeho odraz. Vykreslené křivky jsou reflektografy. Nejjednodušeji měřitelnými jsou kabely bez odboček, kde jsou na vytvořeném reflektografu snadno viditelné spojky kabelů, konec kabelu a případná porucha. Vzdálenosti jsou stanovovány na základě znalosti typu kabelu a pro něj specifické průměrné rychlosti šíření impulzu $v/2$. Pro běžně používané typy kabelu jsou tyto hodnoty uvedeny v tabulce 4-2.

Tab. 4-2 Rychlost šíření impulzu $v/2$ pro různé typy kabelů [1]

Typ kabelu	Průměrná rychlost šíření $v/2$ (m/ μs)	Pozn.
PILC	75-85 108-132	Impregnovaný papír Suchý papír
XLPE	78-87	
PE	cca 100	
PVC	76-87	
EPR	68-83	

Výběr metody, která bude použita, závisí na charakteristice poruchy. Pro nízko-ohmové poruchy se volí nízkonapěťové metody, zatímco pro vysoko-ohmové poruchy jsou vhodnější metody vysokonapěťové. Vysokonapěťové metody jsou z většiny na principu měření přechodných dějů způsobených vytvořením elektrického oblouku, buď pomocí rázů emitovaných rázovým generátorem nebo propalováním pomocí DC zdroje. Obě metody vedou na krátkodobou změnu vysoko-ohmové poruchy na poruchu nízko-ohmovou. Kategorizace jednotlivých metod je uvedena v tabulce 4-3.

Tab. 4-3 Metody předběžné lokalizace poruchy [1]

Kategorie	Metoda	Charakteristika poruchy
Nízkonapěťové metody	Impulzně-odrazová metoda TDR	Nízko-ohmové závady Určení konce kabelu Lokalizace přerušení kabelu Detekce spojů podél kabelu
Vysokonapěťové metody	Rázová-proudová metoda ICM (dlouhé kabely)	Vysoko-ohmové závady Závady přerušení
	Několikanásobná impulzní metoda SIM/MIM (cca 80-90 % všech poruch)	Vysoko-ohmové závady Závady přerušení
	Dokmitávací metody	Přerušované závady
	Propalovací metody Modifikace charakteristik poruchy (např. vlivu vody ve spojích)	Vysoko-ohmové závady Závady přerušení
Můstkové metody	Můstková měření	Vysoko-ohmové závady Nízko-ohmové závady Poruchy plášťů kabelů

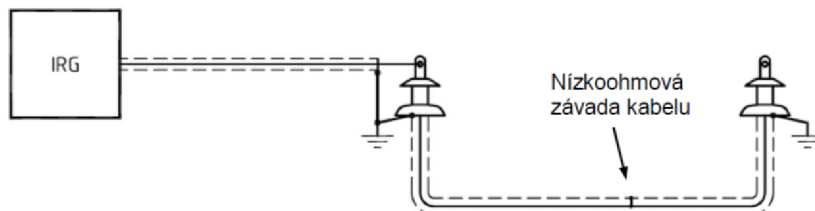
4.2.1 Impulzně-odrazová metoda (TDR impulzní reflektometrie)

Metoda je založena na vyslání nízkonapěťového impulzu (max. 160 V) pomocí impulzního reflektometru IRG (impulzně-odrazového generátoru) do zkoušeného kabelu a měření času, který signál potřebuje k dosažení místa změny impedance a návratu odrazu impulzu, včetně určení jeho charakteru. Vzdálenost hledaného místa je následně určena ze známé rychlosti šíření signálu v daném prostředí. Jedná se o nejrozšířeněji používanou metodu k určení celkové délky kabelu, lokalizaci nízko-ohmových závad kabelu, lokalizaci přerušení kabelu a lokalizaci spojů podél kabelu.

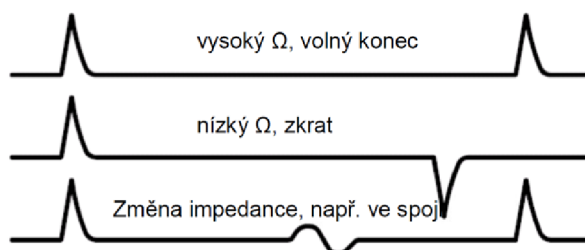
Pro provedení této metody je potřeba umožnit impulzu průchod kabelem a vytvoření odrazového grafu. Tato podmínka je splněna v případě vedení dvou rovnoběžných vodičů, kde změna impedance mezi nimi způsobí vznik odrazu impulzu. Odraz je charakterizován **činitelem odrazu** r , který je dán impedancí kabelu k poruše Z_1 a impedancí v místě poruchy Z_2 . Činitel odrazu r se vypočte jako:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.2)$$

Přičemž se uvažuje, že u volného konce je: $Z_1 \ll$, tzn. $r = 1$, zatímco u zkratu platí: $Z_1 \gg$, tzn. $r = -1$. V kabelu tedy dochází k **pozitivnímu** odrazu vyslaného impulzu buď na jeho konci nebo v místě jakémkoliv přerušení kabelu. K **negativnímu** odrazu dochází v místě zkratu. V případě změny impedance kabelu (např. spoje) jsou zobrazeny jako ležaté S . Vzdálenosti jsou vypočítány z doby mezi vysláním impulzu a příchodu jeho odrazu, vzdálenost je možné odečíst z grafu IRG pomocí kurzorů.

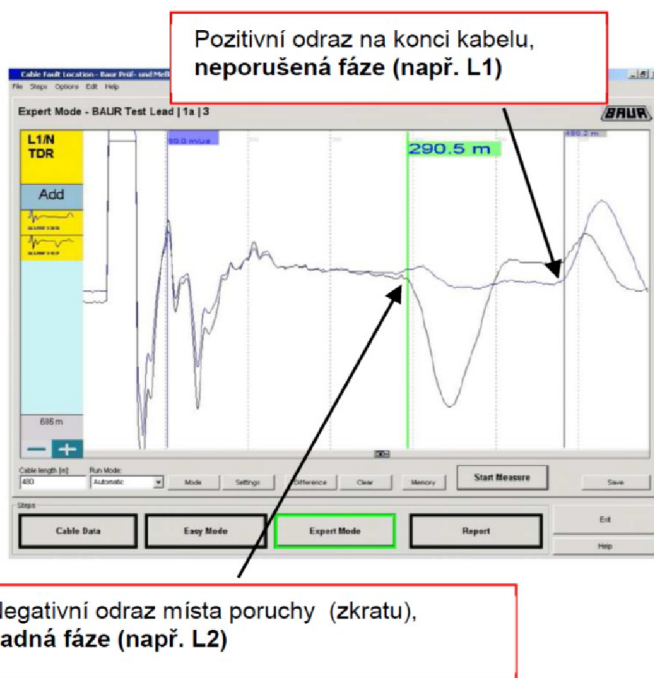


Obr. 4-1 Blokové schéma zapojení IRG (impulzní reflektometr) [1]



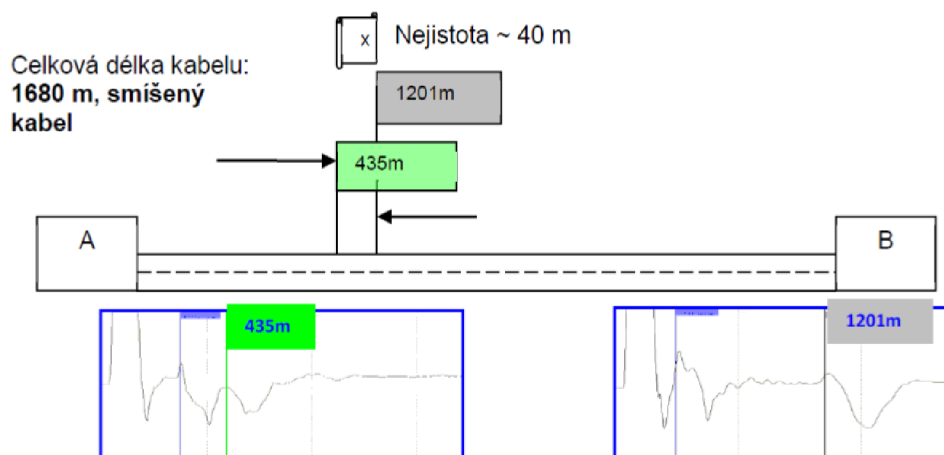
Obr. 4-2 Grafy odrazu TDR [1]

Na obrázku č.4-3 je možné vidět, že v případě vadné fáze L2 (zkrat) a nepostižené fáze L1, je poloha poruchy dohledatelná podle místa, kde se od sebe grafy fází viditelně liší. Nastavení kurzoru impulsního reflektometru umožňuje velice přesný odečet vzdálenosti místa poruchy.



Obr. 4-3 Příklad grafu TDR: srovnání vadné a neporušené fáze [1]

Mohou nastat situace, kdy není známá celková délka kabelu nebo je kabel složen z kabelů různého typu s rozdílnou impulzní rychlostí $v/2$. V praxi se provádí měření z obou konců kabelu, kdy v ideální situaci by se součet změřených vzdáleností rovnal celkové délce kabelu, ovšem při praktických měřeních často vzniká odchylka vlivem použité impulzní rychlosti. V takovém případě jsou na jedno vedení vynesena místa změřené poruchy, přičemž se uvažuje, že reálné místo poruchy je mezi těmito polohami (viz. obr 4-4).



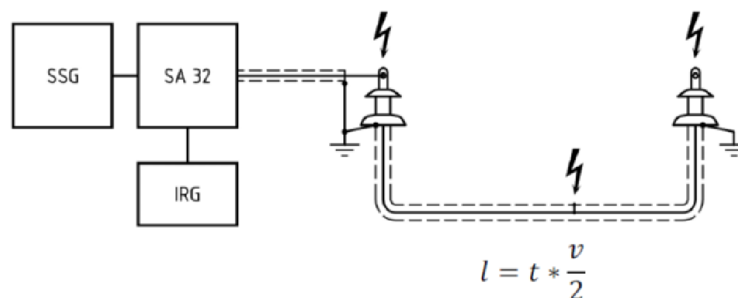
Obr. 4-4 Graf TDR: neznámá rychlost $v/2$, měření na obou koncích kabelu (A, B) [1]

Nevýhodou metody TDR je, že dochází k přirozenému tlumení signálu a u velmi dlouhých kabelů může dojít k úplnému utlumení impulsu TDR před jeho návratem do impulzního reflektometru. Navíc je metoda TDR nevyhovující pro vysoko-ohmové poruchy a přerušované závady, protože rozdíl snížené impedance v místě poruchy vůči impedanci izolace neporušené části kabelu nebude dostatečný.

4.2.2 Metoda několikanásobného impulsu SIM/MIM

Vysoko-ohmové poruchy nevytvářejí při vyslání impulsu do kabelu žádný odraz na reflektometru. V principu rázový generátor generuje vysokonapěťový impuls, který krátkodobě změni charakter poruchy z vysoko-ohmové poruchy na nízko-ohmovou poruchu (zkrat). Během krátkodobé změny jsou vyslány sekundární impulsy, které musí poruchu zaznamenat. Detekci během této krátké doby zajistí buď jeden sekundární impuls TDR (SIM=sekundárně-impulzní metoda) nebo několikanásobné sekundární impulsy (MIM).

Pokročilá sekundárně-impulzní metoda (SIM-MIM) je založena na vyslání prvního impulsu, který nezaznamená poruchu, ale zaznamená kladným odraz od konce kabelu. Druhý se vyšle vysokonapěťový impuls, který způsobí zapálení v místě poruchy a v momentu hoření oblouku v místě poruchy, bude vyslán sled nízkonapěťových měřících impulsů, které se odrazí od poruchy se zápornou polaritou. Každý měřící impuls se zaznamená samostatně a charakteristika poruchy je vytvořena jako skupina snímků (např. IRG 3000 odesílá 5 nízkonapěťových impulsů a využívá 200 MHz).

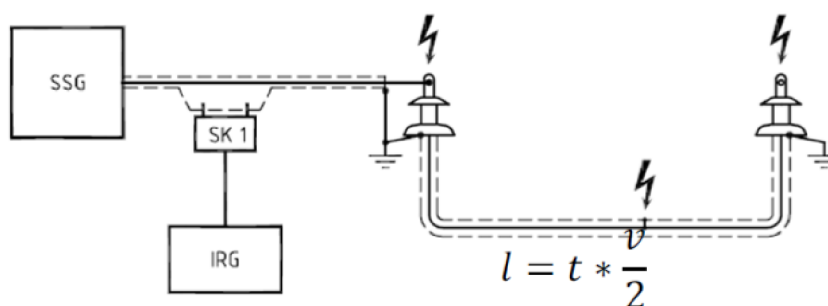


Obr. 4-5 Blokové schéma zapojení SIM/MIM (SSG-rázový generátor, SA32-vazební jednotka, IRG-impulzní reflektometr) [1]

Metoda několikanásobného impulsu DC, MIM DC. Intenzita průrazu v místě poruchy je určena energií vysokonapětového impulsu. V některých případech, jako je například výskyt vody ve spoji kabelu, jsou výsledky z klasické metody SIM/MIM špatně čitelné, proto je potřeba případnou vlhkost vypařit. K vypaření lze použít rázový generátor v rázovém režimu. Vyšší rázové energie je možno dosáhnout použitím rázového generátoru ve stejnosměrném režimu, kdy je jeho kondenzátor v paralelním uspořádání s kabelem a jejich kapacity jsou tedy využívány současně.

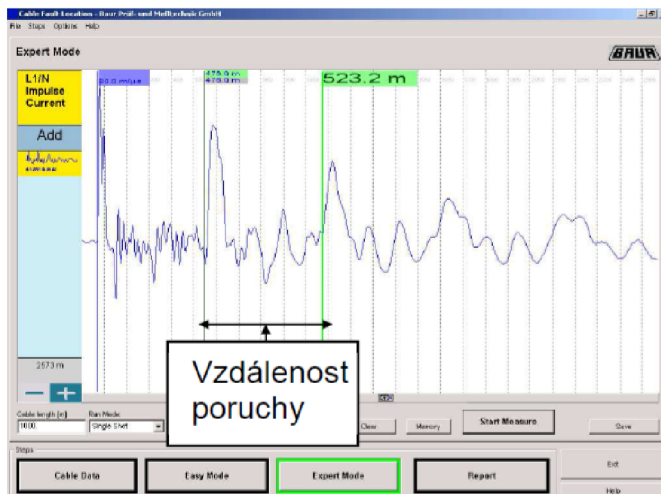
4.2.3 Rázová-proudová metoda ICM

Metoda impulsního proudu (ICM) je založena na generaci VN impulsu rázovým generátorem, který v místě poruchy vytvoří průraz. Mezi místem poruchy a rázovým generátorem začne procházet přechodná proudová vlna. Vzdálenost poruchy udává interval opakování proudového impulsu. Metoda ICM detekuje proudové rázy procházející pláštěm kabelu během vytvořeného průrazu. Tato metoda je velice vhodná pro dlouhá vedení, kde se přechodné impulsy vzájemně neovlivňují a vzdálenost je určena s vysokou přesností.



Obr. 4-6 Blokové schéma zapojení ICM (indukční vazební člen SK1) [1]

Impulzní reflektometr IRG uvažuje vzdálenost mezi 2. a 3. nebo 3. a 4. impulzem, výpočet provádí na základě známé rychlosti impulsu $v/2$ a periodické doby odrazu. Na reflektografu jsou impulzy viditelné jako pravidelné kladné vrcholy vln. První průraz není ve výpočtu uvažován, jelikož je ovlivněn zápalom v místě průrazu. Impulz prochází mezi místem oblouku a rázovým generátorem SSG, dokud není vyveden do země, nebo není utlumen přirozenými tlumícími účinky kabelu.

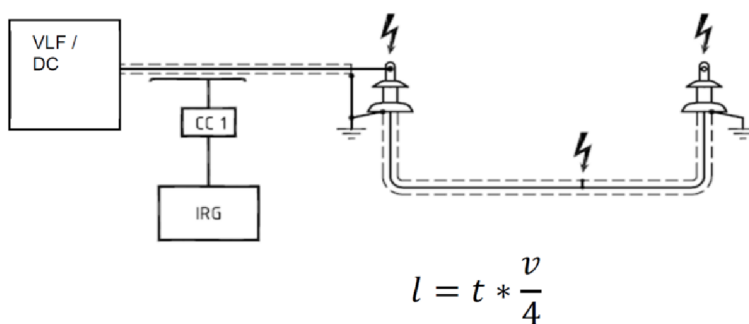


Obr. 4-7 Graf měření IRG 3000, ICM [1]

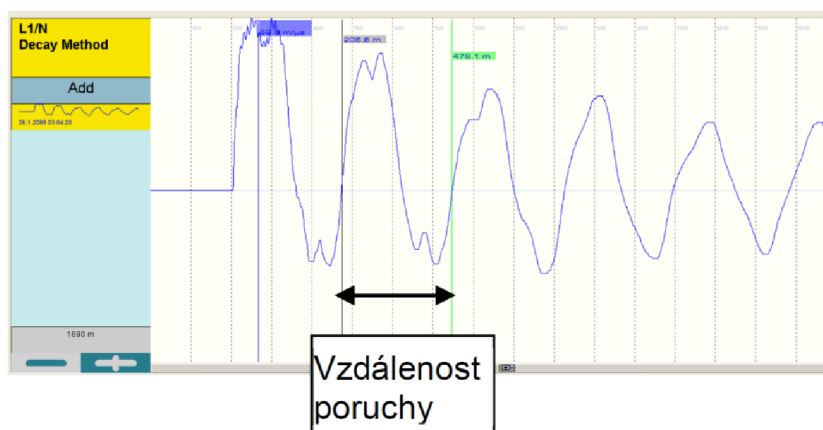
4.2.4 Dokmitávací metoda

Dříve zmíněné vysokonapěťové metody předběžné lokalizace poruch byly založeny na rázovém generátoru SSG, s nímž je možné pracovat do průrazného napětí 32 kV. V případě, že je potřeba vyšší průrazné napětí používá se metoda dokmitávání.

Tato metoda využívá zdroj DC nebo VLF (very low frequency), který nabíjí vadný kabel až do dosažení průrazného napětí a vzniku průrazu. Mezi místem poruchy a zdrojem začne procházet přechodná vlna vygenerovaná průrazem, kterou zaznamená impulzní reflektometr IRG přes kapacitní dělič napětí CC1.



Obr. 4-8 Blokové schéma dokmitávací metoda (kapacitní dělič napětí CC1) [1]



Obr. 4-9 Graf měření IRG 3000, dokmitávací metoda [1]

Vzdálenost poruchy u dokmitávací metody je vypočtena s ohledem na to, že doba jednoho cyklu impulsu je čtyřnásobkem impulzem prošlé vzdálenosti.

4.2.5 Propalovací metoda

Porucha je lokalizována pomocí VN propalovacího zařízení (například transformátoru), který způsobí generováním vysokých proudů zuhelnatění materiálu izolace (v případě kabelů PILC se jednalo o impregnovaný papír). Zuhelnatění způsobí uhlíkové spojení, které vede ke změně charakteru poruchy na nízko-ohmovou, čímž je umožněno použití metody TDR k předběžné lokalizaci poruchy.

Propalovací metoda se využívá zejména u vysoko-ohmových poruch na kabelech typu PILC. Vzhledem k rozvoji a používání izolačních materiálů pro které je tato metoda nevhodná (samozhášecí plastové materiály, tavné materiály), je v současnosti tato metoda na ústupu a nahrazována metodou rázovo-proudovou a metodou několikanásobného impulsu.

4.2.6 Můstkové metody

Můstkové metody jsou využívány k předběžné lokalizaci místa poruchy v případě, že v kabelu nejsou ani dva paralelní vodiče, čímž je znemožněno využití všech předchozích metod založených na impulzní reflektometrii. Jedná se zejména o poruchy mezi jádrem a vnějším pláštěm kabelu. Dalším případem jsou kabely, u kterých se plášť nechová jako kovové uzemnění, tzn. zejména kabely bez stínění.

V případě, že je porucha pouze na vnějším plášti, není výkon stíněného kabelu přímo ovlivněn, ale ze střednědobého hlediska působí negativními účinky. Například může docházet k pronikání vody do kabelu a postupnému vytváření vodních stromečků, které nakonec způsobí selhání kabelu.

4.2.6.1 Wheatstoneův obvod

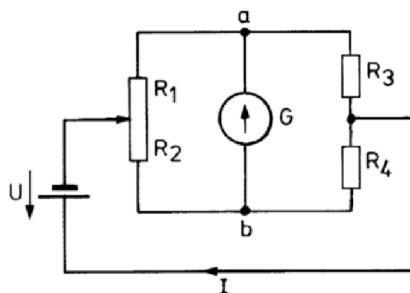
Tato můstková metoda pracuje s použitím stejnosměrného proudu na principu vyvážení můstku. Pro vyvážení můstku musí být stejný potenciál v uzlových bodech (**a**, **b**). Vyvážený stav je rozeznatelný tím, že galvanometr ukazuje nulu.

Pro stejný potenciál v bodech **a** a **b** musí platit:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (\Omega) \quad (4.3)$$

Hledaný odpor $R_x = R_4$:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \quad (\Omega) \quad (4.4)$$

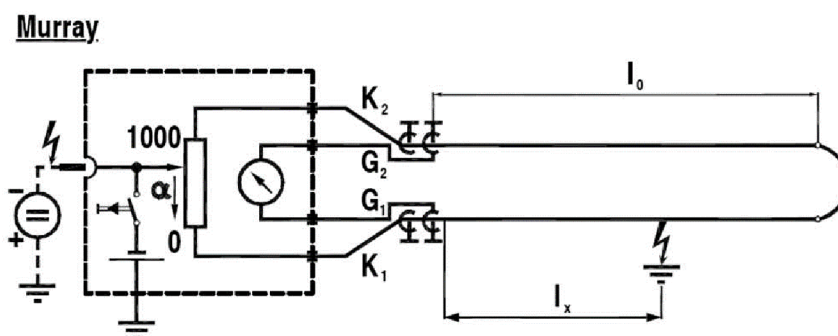


Obr. 4-10 Wheatstoneův obvod [1]

Modifikacemi této metody jsou například Glaserův měřicí obvod nebo Murrayův měřicí obvod.

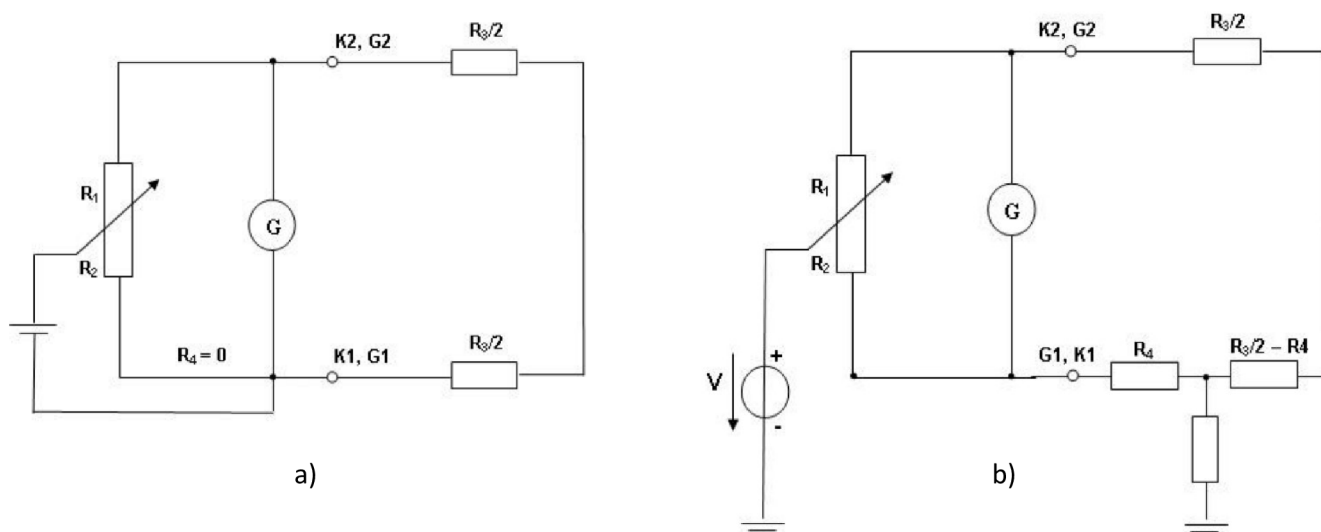
4.2.6.2 Murrayův měřicí obvod

Jedná se o modifikaci Wheatstenova obvodu pro soustavy, kde je poblíž poškozeného kabelu alespoň jeden kabel nepoškozený. Vytvoří se vnitřní můstek: svorky G – připojení galvanometru, svorky K – připojení ke kabelu.



Obr. 4-11 Murrayův měřicí obvod [1]

Při měření pomocí Murrayova měřicího obvodu je potřeba začít vyvážením můstku. K tomu bude využit nízkonapěťový DC zdroj v zapojení, kdy není spojen se zemí a hledaný odpor bude roven nule, $R_4 = 0$.



Obr. 4-12 Murray – a) vyrovnávací obvod, b) měřicí obvod [1]

DC zdroj se spojí se zemí a proud se začne vracet zpět do zdroje a způsobí výchylku galvanometru. Tato výchylka udává nejen hledaný odpor R_x , ale je s její pomocí možné určit vzdálenost poruchy, kde l_x je vzdálenost místa poruchy, α je hodnota výchylky (hodnota odvozená od 100 % galvanometru) a l je délka kabelu.

$$l_x = \frac{\alpha}{100} \times 2 \cdot l \quad (\text{m}) \quad (4.5)$$

Při nespojitosti průměru kabelu je možné použít **shirla**, která nabízí funkci více průřezů. Jsou uvažovány parametry více úseků a nedochází tak ke zkreslení hledané vzdálenosti, kvůli různým vzájemným poměrům. Postup spočívá v převedení odporů na fiktivní délky l' , výpočtu fiktivní délky smyčky l'_{ges} a následném vyčíslení skutečné délky buď v metrech nebo v procentech z celkové délky kabelu.

$$R_L = \frac{\rho_C \cdot l}{A_C} = \frac{\rho_S \cdot l}{A_S} \rightarrow l' = \frac{\rho_C \cdot A_S}{\rho_S \cdot A_C} \cdot l \quad (4.6)$$

$$l'_{ges} = l + l' = \left(1 + \frac{\rho_C \cdot A_S}{\rho_S \cdot A_C} \right) \cdot l \quad (4.7)$$

Měrný odpor vodiče pomocného vedení ρ_C a průřez pomocného vodiče A_C . Měrný odpor pláště kabelu ρ_S a průřez pláště kabelu A_S .

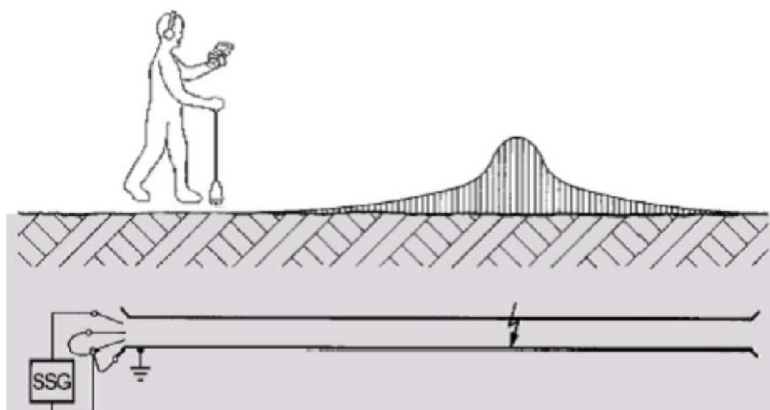
4.3 Způsob zaměřování kabelové trasy

Kabelová vedení jsou velice často ukládána v zemi, zatímco pro normální provozní stav tento typ uložení skýtá mnoho výhod oproti venkovním vedením, při dohledávání poruch je postup složitější o nejistotu přesného umístění kabelu. Pro přesné určení trasy kabelu se provádí zaměřování kabelové trasy.

Zaměřování kabelové trasy se provádí pomocí audiofrekvenčního signálu. Jedná se o aktivní zaměřování trasy kabelu, kdy se odpojí vodič a do kabelu je zavedena zvuková frekvence. Využitím audiofrekvenčního generátoru a detekční cívky je možné měřit nad zemí elektromagnetický signál přenášený podél kabelové trasy.

4.4 Zaměření poruchy kabelu

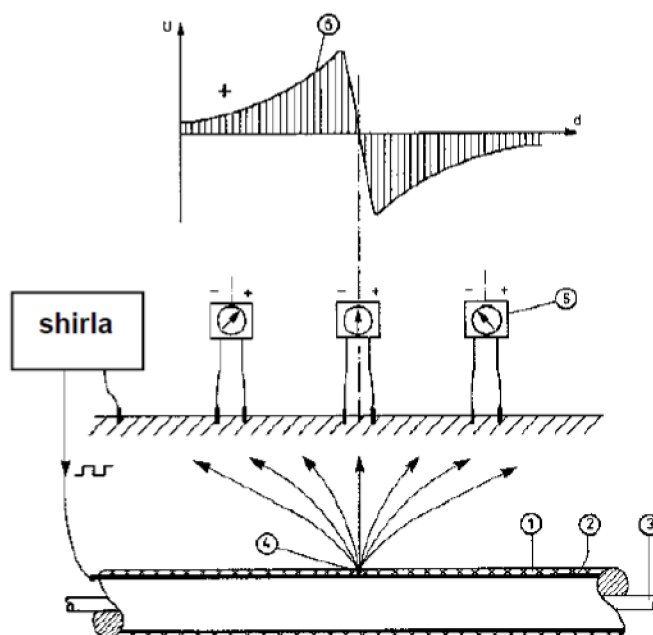
Přesné zaměření poruchy je realizováno pomocí **akustické metody**. Pro správné provedení je potřeba rázový generátor (SSG), půdní mikrofon, přijímač a sluchátka. Princip je založen na vytvoření sekvence vysokonapěťových impulzů rázovým generátorem SSG, které způsobí průraz v místě poruchy. Tento průraz způsobí vysoký akustický signál, který bude zachycen půdním mikrofonem. Amplituda zvuku průrazu bude nejvyšší v místě poruchy a bude se zmenšovat v závislosti na vzdálenosti od poruchy (viz. obrázek 4-13).



Obr. 4-13 Akustická lokalizace poruchy, schéma zapojení a tvar akustického signálu [1]

Nejnovější sady určené pro akustickou lokalizaci poruch mají integrovanou funkci zaměřování založenou na magnetické indikaci. Vysokonapěťové impulzy procházející kabelem vytváří po celé jeho délce až do místa poruchy elektromagnetický signál, který je měřen půdním mikrofonem. Nejvyšší hodnota signálu je změřitelná přímo nad kabelem. Průraz v tomto případě aktivuje prvně elektromagnetické sepnutí, které spustí časovač, jež měří čas do příchodu zpožděného akustického sepnutí. Časová vzdálenost poruchy je následně vyhodnocena pomocí digitálního indikátoru přijímače, na základě rozdílné rychlosti šíření těchto dvou typů signálů.

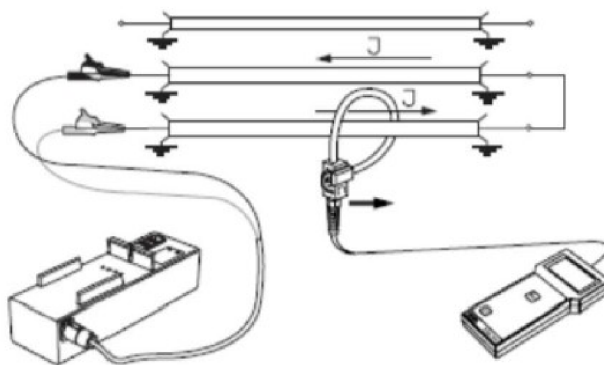
Metoda krokového napětí se používá k zaměření nízko-ohmových poruch ve styku se zemí a poruch pláště kabelů. Principem metody je vyslání sekvence VN impulzů do kabelu. Tyto impulzy se vybijí do okolní půdy přes místo poruchy, tím vzniká v místě poruchy únik napětí do půdy, který vede ke vzniku napěťového gradientu (tvarově připomínající trychtýř). Na povrchu vzniká krokové napětí, které je detekováno s pomocí symetricky umístěných zemních hrotů. Nad poruchou dochází k nulové poloze a změně polaritě krokových napětí (viz. obr. 4-14).



Obr. 4-14 Metoda krokového napětí – pokles napětí ve tvaru gradientu [1]

4.5 Identifikace kabelu

Identifikace správného kabelu je zásadní zejména s ohledem na bezpečnost, kdy se může jednat o kabel ve svazku provozovaných kabelů. Identifikace je prováděna pomocí vysílače a přijímače, který zaznamená směr průtoku proudového impulsu a jeho amplitudu, jež závisí na odporu smyčky. Správný kabel je možno určit podle směru průtoku proudu, kdy ve správném kabelu je stejný směr signálu, ale ostatní kabely nepřenášejí žádný signál nebo slouží jako zpětné vodiče.



Obr. 4-15 Připojení jednožilových kabelů [1]

V tomto kroku lokalizace poruchy je kladen velký důraz na bezpečnost, proto musí přístroj používaný k identifikaci eliminovat možnost lidského pochybení. Mezi tato opatření patří například automatická kalibrace a nastavení parametrů použitého vysílače.

5 POPIS JEDNOTLIVÝCH PORUCH

Kabelová vedení na napěťové hladině 22 kV nepatří mezi hlavní skupinu využívající funkci lokátorů. Způsoby uzemnění těchto linek a jejich topologie zhoršují využitelnost lokátorů, a to především v případě jednofázových zemních spojení. Ve společnosti E.ON se lokátory na kabelových linkách 22 kV uplatňují pro lokalizaci mezifázových poruch, v případě jednofázových zemních spojení nejsou jimi poskytnuté údaje považovány za relevantní. Pro nastínění průběhu dohledávání poruch bylo vybráno několik reálných poruch, především zemních spojení a jedna mezifázová porucha na kabelovém vedení 22 kV. Jednotlivé poruchy budou blíže specifikovány dále v této kapitole.

5.1 Nejvyužívanější metody fyzické lokalizace

V praxi se pro zaměření poruch využívá především několikanásobná impulzní metoda SIM/MIM, která spadá mezi metody vysokonapěťové a dohledává se s ní až 80 % všech poruch (blíže popsána v kapitole 4.2.2). V případě nízko-ohmových poruch je využit echolokátor. Poruchy, jejichž hodnoty se výrazně mění, jsou dohledávány metodou dokmitávání (4.2.4).

Dále se pro upřesnění místa poruchy využívá půdní mikrofon, jehož princip je založen na vytvoření vysokonapěťových impulsů, které způsobí průraz, který vytvoří mikrofonem zachytitelný akustický signál (4.4).

U poruch, kde jsou tyto metody neúčinné, se využívá metoda zkrutu. Jedná se zejména o poruchy, kdy je zachován vysoký izolační stav jak vůči zemi, tak mezi žilami kabelu. Těmito vlastnostmi se vyznačují například přetržené žíly v neporušené izolaci.

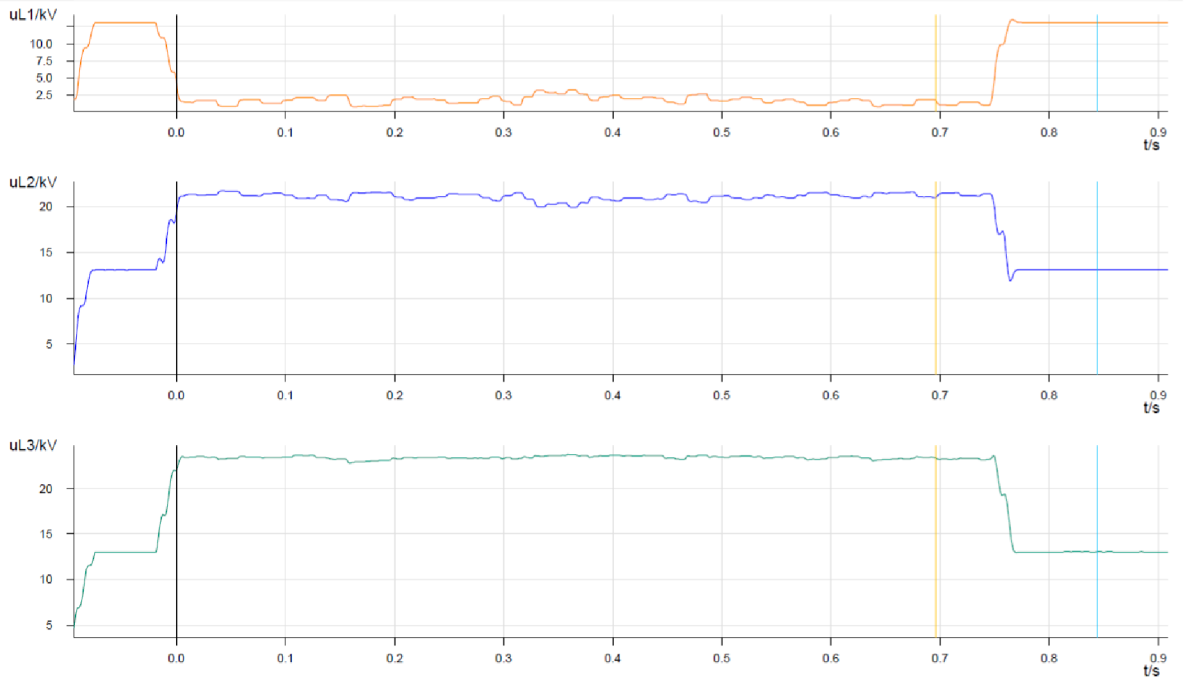
5.2 Lokalizace poruchy

Přibližná lokalizace poruchy dispečerem za pomoci ochran a inteligentních dálkově ovladatelných prvků sítě byla popsána v kapitole (3.1.3). V okamžiku, kdy ochrana zjistí poruchu na chráněném úseku, vedení začne zaznamenávat dvojice hodnot – napětí a proudů. Podle postižených fází určí typ poruchy a v případě, že má ochrana implementovanou funkci lokátoru, vypočítává z těchto dvojic hodnot reaktanci pomocí algoritmu příslušného typu poruchy. Hodnoty jsou dále převedeny ze sekundárních na primární a ze zjištěné reaktance je určena vzdálenost místa poruchy. Současně se v RIS v intervalu 15 minut od vzniku poruchy s řezu po 1 minutě vypočítává vzdálenost poruchy až do ustálení její hodnoty, která bude zobrazena dispečerovi.

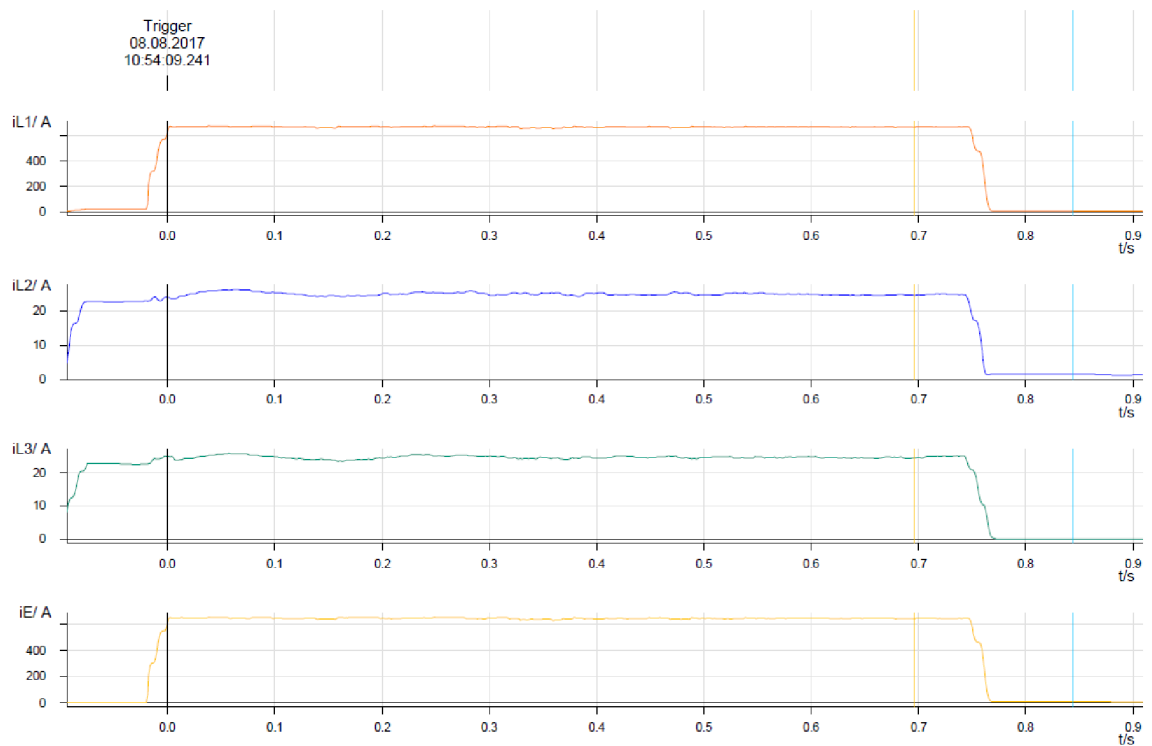
5.3 Porucha číslo 1 – VN 240

První porucha vznikla dne 8.8.2017 na lince VN 240 v místě mezi TS 2511, Olomoucká most a TS 2581, Masná 9 Mrazírny. Poškozená část kabelu byla kabel typu ANKTOYPV. Poškození kabelu vzniklo během výkopových prací a bylo způsobeno krumpáčem pracovníka dodavatelské firmy. Vzhledem k nahlášení poruchy dodavatelskou firmou nebylo potřeba poruchu dohledávat pomocí upřesňujících zařízení.

Porucha byla indikována multifunkční ochranou SIPROTEC 7SJ63 umístěnou na vývodu z rozvodny BNT (Brno Teplárna). Ochranou byla porucha zaznamenána a vyhodnocena na základě změřených napětí fáze L1 vůči zemi E (obr.5-1) a proudů fází L1 a zemí E (obr.5-2) jako spojení jedné fáze se zemí: L1-E. Grafy jsou vykresleny v efektivních hodnotách. Poruchové záznamy jsou dále zpracovány (tab.5-1).



Obr. 5-1 Porucha č.1: VN 240, poruchový záznam fázových napětí, porucha L1-E, SIGRA



Obr. 5-2 Porucha č.1: VN 240, poruchový záznam proudů, porucha L1-E, SIGRA

Tab. 5-1 Porucha č.1: ukázka – primární hodnoty, porucha typu LI-E, SIGRA

Measuring Signal	Value	Phase	Extremum	DC	2Hamon.	3Hamon.	5Hamon.
iL1	660,91 A	-112,8°	944,18 A	0,5%	22%	3,7%	1,8%
iL2	24,466 A	119,3°	-34,307 A	1,2%	0,3%	3,6%	2,9%
iL3	24,704 A	-9,5°	-36,544 A	2,3%	3,2%	2,1%	1,9%
iE	640,34 A	68,4°	-916,59 A	0,7%	2,0%	3,6%	1,8%
uL1	1,5401 kV	-68,9°	-1,1711 kV	18,9%	23,7%	30,0%	12,7%
uL2	20,976 kV	75,5°	-30,157 kV	1,3%	3,3%	3,2%	0,3%
uL3	23,380 kV	15,0°	-32,558 kV	1,4%	1,8%	1,8%	0,7%
uL12	22,247 kV	-102,1°	31,182 kV	0,1%	1,5%	0,9%	0,6%
uL23	22,454 kV	140,6°	-31,943 kV	0,3%	1,6%	1,3%	0,9%
uL31	23,268 kV	18,8°	-33,026 kV	0,2%	0,7%	0,7%	0,9%

Ochrana měří napětí a proudy pomocí měřících transformátorů, proto je potřeba počítat s jejich použitými převody. Z naměřených veličin se prvně určí sekundární reaktance X_{sec} , která je následně přepočtena na primární reaktanci X_{prim} . V lokátoru je nastaven parametr vedení, kterým je měrná reaktance X' . Vzdálenost k poruše je vypočtena z primární reaktance X_{prim} a parametru vedení nastaveného v lokátoru X' . Pro kabelová vedení se používá $X' = 0,13 \Omega/\text{km}$. Výpočet místa poruchy tímto způsobem je ukázán níže (tab.5-2).

Tab. 5-2 Porucha č.1: hodnoty pro určení místa poruchy

X_{sec}	U_{prim}	U_{sec}	I_{prim}	I_{sec}	X'	X_{prim}	$l_{p-ochrana}$
(Ω)	(kV)	(kV)	(A)	(A)	(Ω/km)	(Ω)	(km)
1,03	22	0,1	300	1	0,13	0,755	5,8

Využije se modifikace vzorce pro přepočet mezi primárními a sekundárními veličinami z [3]:

$$Z_{sec} = \frac{I_{prim}/I_{sec}}{U_{prim}/U_{sec}} \cdot Z_{prim} \quad (5.1)$$

Vypočte se primární reaktance

$$X_{prim} = \frac{X_{sec}}{\frac{I_{prim}/I_{sec}}{U_{prim}/U_{sec}}} = \frac{1,03}{\frac{300/1}{22/0,1}} = 0,755 \Omega$$

a následně se dosazením do vzorce (3.39) zjistí předpokládané místo poruchy

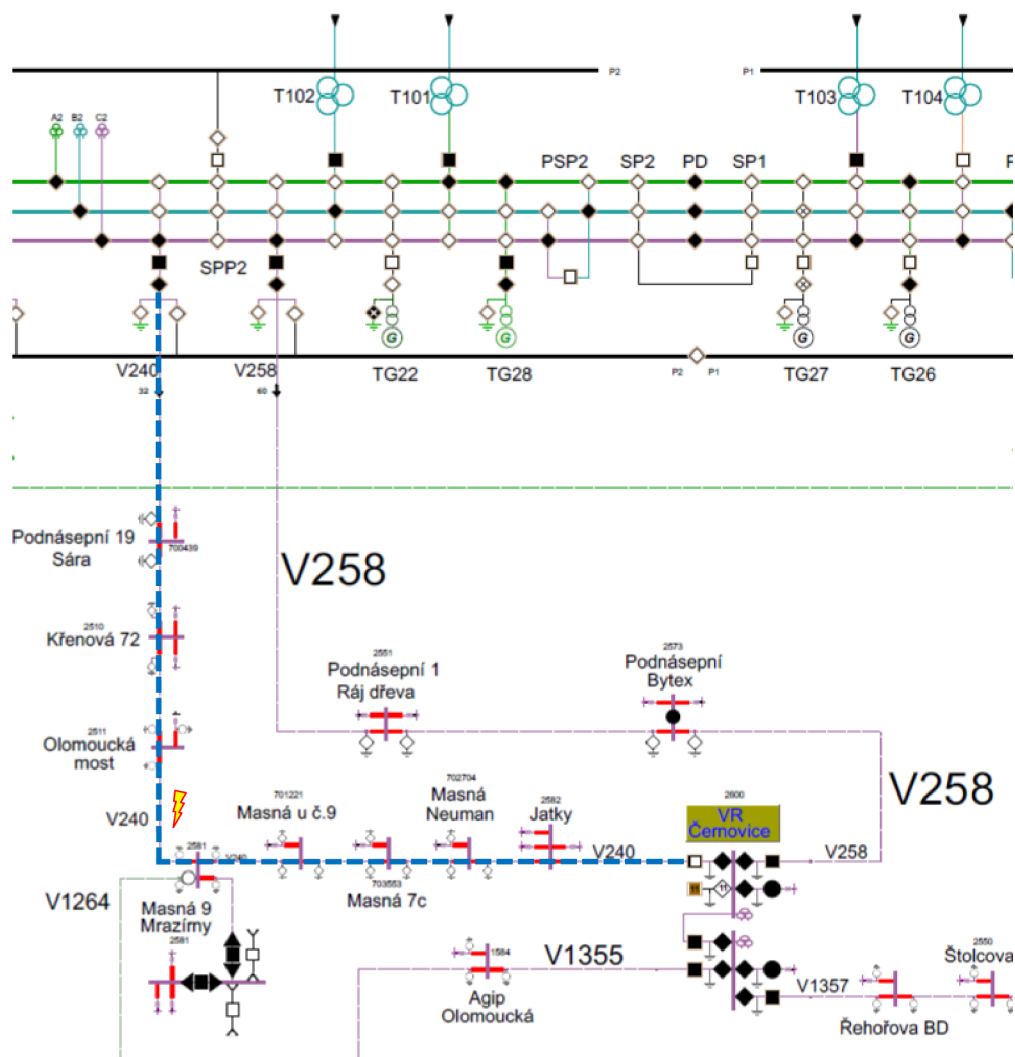
$$l_{p-ochrana} = \frac{X_{prim}}{X'} = \frac{0,755}{0,13} = 5,8 \text{ km}.$$

Po vzniku poruchy se tento přepočet provede v minutových řezech během 15minutového intervalu, který je zaznamenáván v RIS. Záznam poruchy č.1 je v tabulce 5-3. První nenulový výsledek byl během čtvrtého řezu, kdy byla vzdálenost vyhodnocena na 5,4 km. Tato hodnota byla s příchodem dalších informací z ochran během další minuty navýšena na 5,8 km. Tento údaj zůstal po zbytek intervalu neměnný a zaznamenanou ustálenou vzdáleností místa poruchy $l_{p-ochrana}$ bylo 5,8 km.

Tab. 5-3 Porucha č.1: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS

8.8.2017												
Čas*	10:55	10:56	10:57	10:58	10:59	11:00	11:01	11:02	11:03	11:04	11:05	11:06
l (km)	5,4	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
* čas, kdy byl pořízen záznam Začátek 10:52 , první nenulový záznam 10:55												

Ustálená vzdálenost poruchy bude promítnuta k příslušnému vedení do RISu. Dané vedení bude zvýrazněno pro snadnější orientaci – využívá se barevné přerušované čáry vykreslené přes běžně zobrazované vedení. Samotná porucha bude zakreslena příslušným symbolem u úseku vybraného na základě ustálené hodnoty vzdálenosti poruchy $l_{p\text{-ochrana}}$.



Obr. 5-3 Porucha č.1: místo poruchy na lince VN 240 naznačeno v RIS

Funkce lokátoru poruch byla implementována do ochran, aby se snížil čas potřebný k dohledání poruchy. Pro jeho správnou funkci je zásadní, aby byl vhodně nastaven. V případě jednofázového zemního spojení, ke kterému došlo v tomto případě, je důležité správně nastavit zemní poměr k_E , jenž se nastavuje prostřednictvím své reálné a imaginární části (k_{RE} , k_{XE}).

Vhodným nastavením lokátoru se docílí velice přesného určení místa poruchy. Pracovníci poruchové služby, kteří poruchu vyhledávají v terénu, se pak mohou rovnou zaměřit na úsek vedení s poruchou. To vede k rychlejšímu dohledání a řešení poruchy.

Důležitým údajem vypovídajícím o vhodném nastavení lokátoru je tzv. *chyba lokátoru*, která se určí porovnáním ochrannou určeného místa poruchy $l_{p\text{-ochrana}}$ a reálného místa poruchy $l_{p\text{-skutečná}}$.

V tabulce 5-4 jsou uvedeny informace o které vedení se jednalo, typ poruchy, fáze v poruše, celková délka daného vedení, lokátorem hlášená vzdálenost místa poruchy, skutečné místo poruchy a chyba lokátoru.

Tab. 5-4 Porucha č.1: místo poruchy

Porucha č.	Vedení	typ poruchy	$l_{\text{celková}}$ (km)	RIS			$l_{p\text{-ochrana}}$ (km)	$l_{p\text{-skutečná}}$ (km)	Chyba lokátoru (km)
				1. řez (km)	4. řez (km)	15. řez (km)			
1	VN240	L1-E	6,730	0	5,4	5,8	5,800	2,657	3,143

Dříve bylo zmíněno, že vzdálenost poruchy $l_{p\text{-ochrana}}$ je lokátorem určována na základě zjištěné reaktance X_{prim} . Reaktance poruchové smyčky je v případě zemního spojení dána jak reaktancí kabelu, kterým prochází poruchový proud, tak zpětnou cestou poruchového proudu. Zpětná cesta poruchového proudu není pevně daná a nelze předem určit její reaktanci. Při výpočtu impedance poruchy (3.16) a jednotlivých složek impedance (viz. rovnice (3.27) a (3.28)) z naměřených hodnot napětí a proudů se proto zavádí zemní poměr.

Reaktanci kabelového vedení možné určit je. Z informací o složení kabelové trasy lze vypočítat impedanci celého vedení, součtem impedancí jednotlivých úseků vedení (rozdílné v závislosti na typu použitého kabelu a jeho délce) anebo obecně z průměru měrných hodnot používaných typů kabelů vztahených na příslušnou délku vedení.

Vzhledem k zanedbání skutečné teploty kabelu v době poruchy, nehomogenit, nezohlednění parametrů kabelových souborů a zaokrouhlování, se pro výpočet nejvíce osvědčil průměr vytvořený z měrných hodnot jednotlivých typů kabelů. Průměrná hodnota měrné reaktance byla využita pro nastavení měrné reaktance lokátoru X' . Využívané měrné parametry impedance vedení jsou $\underline{Z}_{\text{Lk}} = (R_{\text{Lk}} + jX_{\text{Lk}}) = (0,14 + j0,13)$.

V tabulce 5-5 jsou uvedeny hodnoty vypočtených impedancí vztahené jak na celkovou délku kabelu \underline{Z}_{L} , tak k místu poruchy $\underline{Z}_{\text{sc}}$. Poměr sousledné a nulové složky byl udán firmou.

Tab. 5-5 Porucha č.1: hodnoty impedance kabelového vedení VN 240

VN 240	délka	$\underline{Z}^{(1)}$		$\underline{Z}^{(0)}$		\underline{Z}_{E}	
	l	R	X	R	X	R	X
	(km)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
celý kabel \underline{Z}_{L}	6,526	0,914	0,848	3,655	3,393	0,914	0,848
porucha $\underline{Z}_{\text{sc}}$	2,657	0,372	0,3454	1,488	1,382	0,372	0,345

Výpočet bude prezentován na posledním řádku tabulky. Sousledná složka impedance poškozeného kabelu podle vzorce (3.1)

$$Z_{sc}^{(1)} = (R_k + jX_k) \cdot I_{p-skutečná} = (0,13 + j0,14) \cdot 2,657 = (0,372 + j0,3454) \Omega.$$

Nulová složka impedance kabelu v poruše

$$Z_{sc}^{(0)} = 4 \cdot Z_{sc}^{(1)} = 4 \cdot (0,372 + j0,345) = (1,488 + j1,382) \Omega.$$

Zemní impedance podle (3.2)

$$Z_{scE} = \frac{1}{3} \cdot (Z_{sc}^{(0)} - Z_{sc}^{(1)}) = \frac{1}{3} \cdot ((1,488 + j1,382) - (0,372 + j0,345)) = (0,372 + j0,345) \Omega.$$

Z hodnot impedancí chráněného vedení bylo vypočteno nastavení parametrů zemního poměru v lokátoru, které odpovídá skutečnému stavu, podle (3.19), (3.20) a (3.21)

$$k_{RE} = \frac{R_L^{(0)} - R_L^{(1)}}{3 \cdot R_L^{(1)}} = \frac{3,655 - 0,914}{3 \cdot 0,914} = 1,$$

$$k_{XE} = \frac{X_L^{(0)} - X_L^{(1)}}{3 \cdot X_L^{(1)}} = \frac{3,393 - 0,848}{3 \cdot 0,848} = 1,$$

$$k_E = \frac{(k_{RE} \cdot R_L + jX_L \cdot k_{XE}) \cdot (R_L - jX_L)}{R_L^2 + X_L^2} = \frac{(1 \cdot 0,914 + j0,848 \cdot 1) \cdot (0,914 - j0,848)}{0,914^2 + 0,848^2} = 1.$$

Vzhledem k velikosti chyby lokátoru v tabulce 5-4 se může toto nastavení označit za nevhodné. Provede se výpočet vhodnějšího nastavení lokátoru, při němž by byla tato porucha lokalizována přesně.

Tab. 5-6 Porucha č.1: nastavení lokátoru – zemní poměr

VN 240		Nastavení		Vhodnější nastavení			$Z_{LE,vyp}$		
$I_{celková}$	$I_{p-skutečná}$	k_{RE}	k_{XE}	k_E		k_{RE}	k_{XE}	R	X
(km)	(km)	(-)	(-)	(-)	(°)	(-)	(-)	(Ω)	(Ω)
6,526	2,657	1	1	3,706	0,105	3,700	3,714	1,376	1,283

Zemní poměr určen podle rovnice (3.16) pro poruchu č.1

$$k_{E,vyp} = \frac{I_{L1} - \frac{U_{L1-E}}{Z_{sc}}}{I_E} = \frac{660,91 \angle -112,8^\circ - \frac{1540,1 \angle -68,9^\circ}{0,5074 \angle 42,8^\circ}}{640,34 \angle 68,4^\circ} = 3,706 \angle 0,105^\circ$$

a ze zjištěného vhodného zemního poměru se určí zemní impedance podle (3.15)

$$Z_{LE,vyp} = k_{E,vyp} \cdot Z_{sc}^{(1)} = (3,7061 + j0,0068) \cdot (0,372 + j0,3454) = (1,376 + j1,283) \Omega.$$

Nyní je možné určit jaké by bylo vhodné nastavení parametrů zemního poměru v ochraně pro tuto poruchu z (3.19) a (3.20)

$$k_{RE,vyp} = \frac{R_{scE,vyp}}{R_{sc}^{(1)}} = \frac{1,376}{0,372} = 3,7,$$

$$k_{XE,vyp} = \frac{X_{scE,vyp}}{X_{sc}^{(1)}} = \frac{1,283}{0,3454} = 3,714.$$

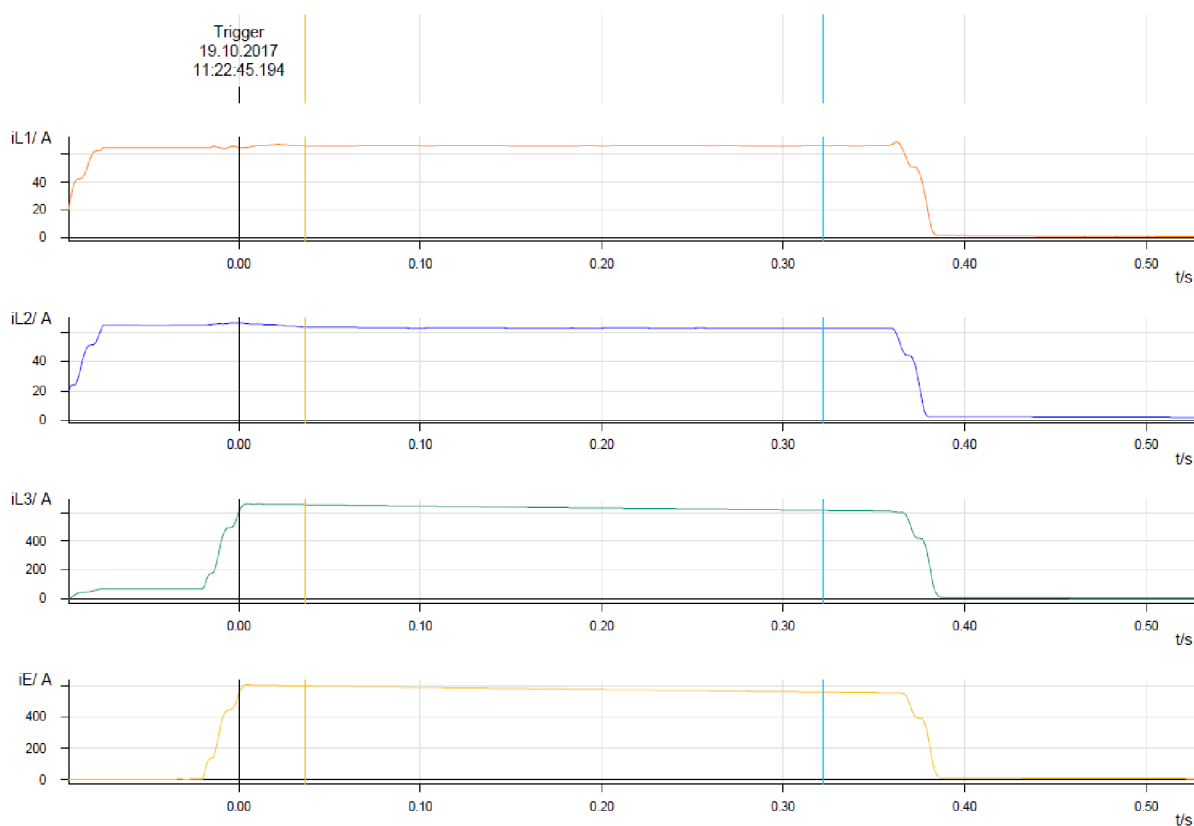
5.4 Porucha číslo 2 – VN 1210

Druhá porucha vznikla na vedení VN 1210 dne 19.10.2017. Kabel byl poškozen během výkopových prací v rámci izolace domu v úseku mezi rozvodnou BNP 9 a trafostanicí TS 1985, Sukova ČNB. Poškozený kabel byl typu AXEKCEY. Poškozené místo nebylo potřeba dohledávat.



Obr. 5-4 Porucha č.2: VN 1210, výkopové práce, Sukova

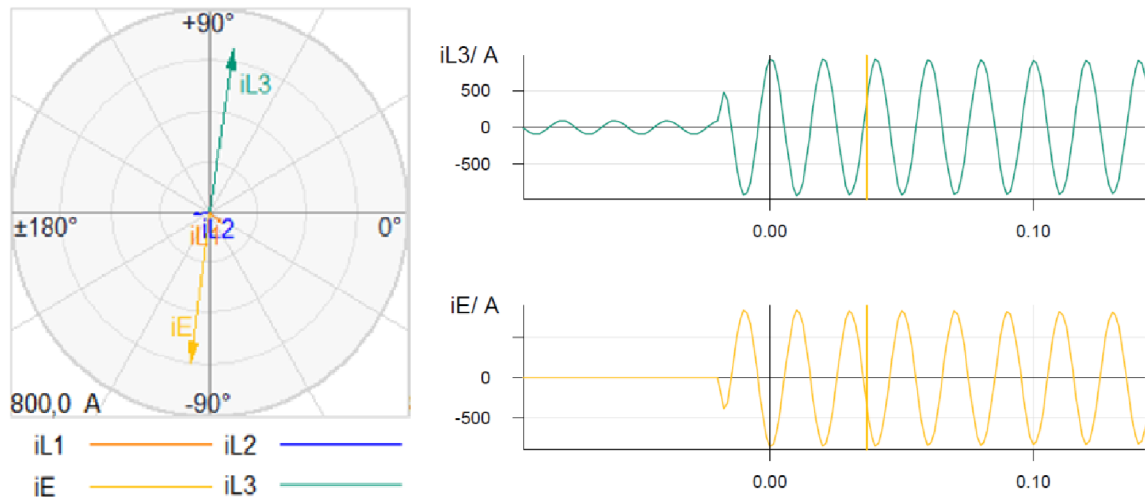
Vývod linky VN 1210 je opatřen multifunkční ochranou SIPROTEC 7SJ632. Ta v době poruchy zaznamenala jednofázové zemní spojení fáze L3. Po vzniku poruchy došlo k nárůstu proudu poškozenou fází L3 a zemí E (viz. obr. 5-5). Hodnoty poruchového proudu se pohybovaly nad 0,6 kA, tedy již v oblasti zkratových proudů.



Obr. 5-5 Porucha č.2: poruchový záznam fázových proudů, porucha L3-E, SIGRA

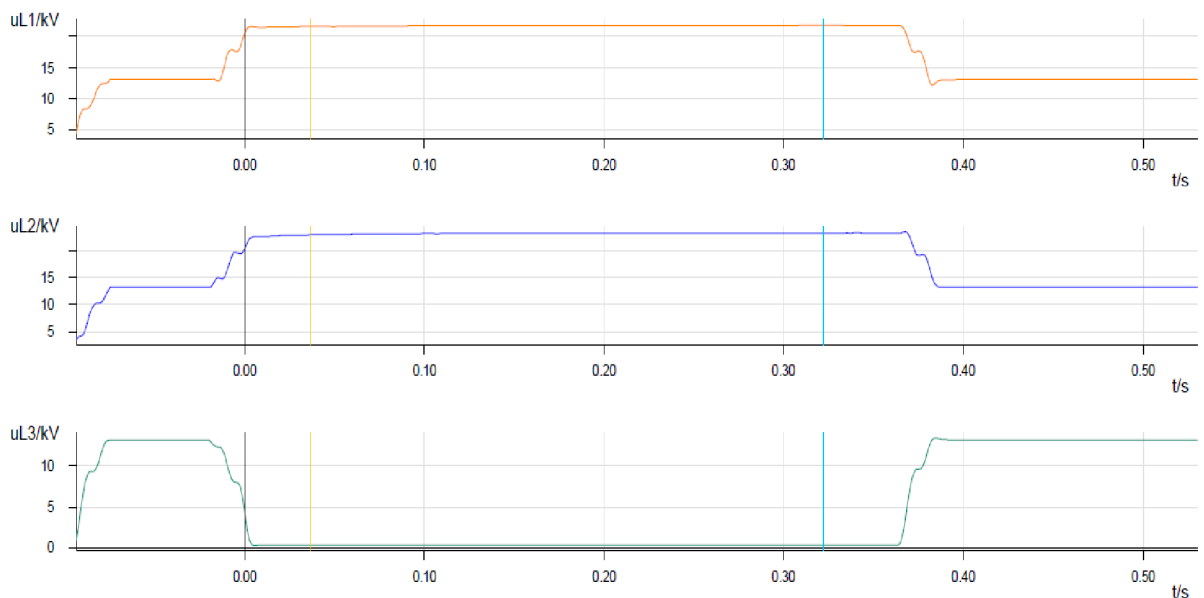
Na předchozí poruše byla ilustrována především programová část řešení poruchy. U poruchy č.2, kdy jde opět o spojení jedné fáze se zemí, lze zdůraznit platící teoretické předpoklady.

Vedení VN 1210 je provozováno jako neúčinně uzemněné přes uzlové odporů. Při vzniku jednofázového spojení se zemí se vlivem uzemnění navýší poruchový proud na hodnoty jednofázového zkratu. Proud fází L3 vzrostl na hodnotu 0,66 kA a byl v proti-fázi s proudem zemí, jež dosáhl hodnoty 0,6 kA (obr.5-6).



Obr. 5-6 Porucha č.2: kruhový diagram a sinusový průběh proudů, porucha L3-E, SIGRA

Na obrázku 5-7 je vidět pro tyto poruchy charakteristický pokles napětí poškozené fáze L3 vůči zemi k nule a vzrůst napětí zdravých fází L2 a L3 na sdruženou hodnotu napětí 22 kV. Tato skutečnost je zřetelná i z hodnot napětí uvedených v tabulce 5-7.



Obr. 5-7 Porucha č.2: poruchový záznam fázových napětí, porucha L3-E, SIGRA

Tab. 5-7 Porucha č.2: primární hodnoty, porucha typu L3-E, VN 1210

Fázová napětí						Poruchové proudy			
\underline{U}_{L1}		\underline{U}_{L2}		\underline{U}_{L3}		\underline{I}_{L3}		\underline{I}_E	
(V)	(°)	(V)	(°)	(V)	(°)	(A)	(°)	(A)	(°)
21636	-73,6	22997	-134,2	327,3	118,9	655,72	81,6	598,1	-97,5

Vyhodnocení místa poruchy ochranou, probíhalo jako v případě poruchy č.1. Záznam 15minutového intervalu, během kterého probíhala lokalizace poruchy na základě vypočtených reaktancí z měřených hodnot, je v tabulce 5-8.

Tab. 5-8 Porucha č.2: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS

19.10.2017												
Čas*	11:22	11:23	11:24	11:25	11:26	11:27	11:28	11:29	11:30	11:31	11:32	11:33
l (km)	0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
* čas, kdy byl pořízen záznam Začátek 11:20, první nenulový záznam 11:23												

První nenulový záznam vznikl ve třetí minutě intervalu, tzn. správně, minutu po vzniku poruchy. Porucha byla ochranou lokalizována 1,2 km od rozvodny. Záznam nebyl považován za relevantní. Poruchová služba byla vyslána na místo nahlášené pracovníky, kteří poruchu zavinili (tab.5-9).

Tab. 5-9 Porucha č.2: místo poruchy

Porucha č.	Vedení	typ poruchy	$l_{\text{celková}}$ (km)	RIS			$l_{\text{p-ochrana}}$ (km)	$l_{\text{p-skutečná}}$ (km)	Chyba lokátoru (km)
				1. řez (km)	4. řez (km)	15. řez (km)			
2	VN 1210	L3-E	4,27	0	1,2	1,2	1,2	0,201	0,999

Porucha vznikla v blízkosti trafostanice, ovšem místo poruchy bylo lokátorem určeno o kilometr dál.

Následně se vypočtou všechny impedance potřebné pro výpočet zemního poměru. Jsou zaznamenány v následující tabulce 5-10.

Tab. 5-10 Porucha č.2: Hodnoty impedance kabelového vedení VN 1210

VN 1210	délka	$\underline{Z}^{(1)}$		$\underline{Z}^{(0)}$		\underline{Z}_E	
	l	R	X	R	X	R	X
	(km)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
celý kabel \underline{Z}_L	4,273	0,598	0,555	2,393	2,222	0,598	0,555
porucha \underline{Z}_{sc}	0,201	0,028	0,026	0,112	0,104	0,028	0,026

Výpočet bude prezentován na posledním řádku tabulky. Sousledná složka impedance poškozeného kabelu podle vzorce (3.1)

$$Z_{sc}^{(1)} = (R_k + jX_k) \cdot I_{\text{p-skutečná}} = (0,13 + j0,14) \cdot 0,201 = (0,028 + j0,026) \Omega$$

Nulová složka impedance kabelu v poruše

$$Z_{sc}^{(0)} = 4 \cdot Z_{sc}^{(1)} = 4 \cdot (0,028 + j0,026) = (0,112 + j0,104) \Omega.$$

Zemní impedance podle (3.2)

$$Z_{scE} = \frac{1}{3} \cdot (Z_{sc}^{(0)} - Z_{sc}^{(1)}) = \frac{1}{3} \cdot ((0,112 + j0,104) - (0,028 + j0,026)) = (0,028 + j0,026) \Omega.$$

Z hodnot impedancí celého vedení bylo vypočteno nastavení parametrů zemního poměru v lokátoru, které odpovídá skutečnému stavu, podle (3.19), (3.20) a (3.21)

$$k_{RE} = \frac{R_L^{(0)} - R_L^{(1)}}{3 \cdot R_L^{(1)}} = \frac{2,393 - 0,598}{3 \cdot 0,598} = 1,$$

$$k_{XE} = \frac{X_L^{(0)} - X_L^{(1)}}{3 \cdot X_L^{(1)}} = \frac{2,222 - 0,555}{3 \cdot 0,555} = 1,$$

$$k_E = \frac{(k_{RE} \cdot R_L + jX_L \cdot k_{XE}) \cdot (R_L - jX_L)}{R_L^2 + X_L^2} = \frac{(1 \cdot 0,598 + j0,555 \cdot 1) \cdot (0,598 - j0,555)}{0,598^2 + 0,555^2} = 1.$$

Zjistí se vhodnějšího nastavení lokátoru, při němž by byla tato porucha lokalizována přesně. Je potřeba zdůraznit, že při výpočtu se neuvažuje reálný způsob provozu sítě ani odpor poruchy. Zatímco odpor poruchy nepůsobí na velikost reaktance, způsob uzemnění ano. Ovšem vzhledem k neznalosti skutečně protékajícího kapacitního nabíjecího proudu v momentě poruchy ho zanedbáváme a výpočet provádíme jako při přímo uzemněném uzlu distribučního transformátoru.

Tab. 5-11 Porucha č.2: Nastavení lokátoru – zemní poměr

VN 240		Nastavení		Vhodnější nastavení			$Z_{LE,vyp}$		
$I_{celková}$	$I_{p-skutečná}$	k_{RE}	k_{XE}	k_E		k_{RE}	k_{XE}	R	X
(km)	(km)	(-)	(-)	(-)	(°)	(-)	(-)	(Ω)	(Ω)
4,273	0,201	1	1	13,160	-6,943	14,540	11,350	0,409	0,297

Zemní poměr určen podle rovnice (3.16) pro poruchu č.2

$$k_{E,vyp} = \frac{I_{L3} - \frac{U_{L3-E}}{Z_{sc}}}{I_E} = \frac{655,72 \angle 81,6^\circ - \frac{327,3 \angle 118,9^\circ}{0,0384 \angle 42,88^\circ}}{598,1 \angle -97,5^\circ} = 13,16 \angle -6,943^\circ$$

a ze zjištěného vhodného zemního poměru se určí zemní impedance podle (3.15)

$$Z_{LE,vyp} = k_{E,vyp} \cdot Z_{sc}^{(1)} = (13,16 - j1,598) \cdot (0,0281 + j0,0261) = (0,409 + j0,297) \Omega.$$

Nyní je možné určit jaké by bylo vhodné nastavení parametrů zemního poměru v ochraně pro tuto poruchu z (3.19) a (3.20)

$$k_{RE,vyp} = \frac{R_{scE,vyp}}{R_{sc}^{(1)}} = \frac{0,409}{0,0281} = 14,54,$$

$$k_{XE,vyp} = \frac{X_{scE,vyp}}{X_{sc}^{(1)}} = \frac{0,297}{0,0261} = 11,35.$$

Ochrana SIPROTEC dovoluje nastavení parametru zemního poměru do hodnoty $k_{XE} = 11$.

Místo poruchy určené z reálně nastavitelné imaginární části zemního poměru se zjistí z (3.28).

Při nastavení $\left(\frac{X_E}{X_L}\right)_{\text{set}} = 11$, bude reaktance zjištěná lokátorem

$$X_{L3-E} = \frac{X_{sc} \cdot \left(\underline{I}_{L3} + \frac{X_{scE}}{X_{sc}} \cdot \underline{I}_E \right)}{\underline{I}_{L3} + \left(\frac{X_E}{X_L} \right)_{\text{set}} \cdot \underline{I}_E} = \frac{0,0261 \cdot (655,72 \angle 81,6^\circ + 11,35 \cdot 598,1 \angle -97,5^\circ)}{655,72 \angle 81,6^\circ + 11 \cdot 598,1 \angle -97,5^\circ} = 0,0269 \Omega$$

a vzdálenost místa poruchy od rozvodny podle (3.39) bude

$$l_{\text{p-ochrana,vyp}} = \frac{X_{L3-E}}{X'} = \frac{0,0269}{0,13} = 0,207 \text{ km.}$$

Chyba lokátoru by byla

$$\Delta_l = |l_{\text{p-ochrana}} - l_{\text{p-skutečná}}| = |0,207 - 0,201| = 0,006 \text{ km.}$$

Relativní chyba (3.40)

$$\delta_{\%} = \frac{|l_{\text{p-ochrana}} - l_{\text{p-skutečná}}|}{l_{\text{p-skutečná}}} \cdot 100 = \frac{|0,207 - 0,201|}{0,201} \cdot 100 = 2,89 \%$$

Nepřesnost lokalizace poruchy by byla pouhých 6 metrů. To je zcela dostačující přesnost vyhledání poruchy a výrazné zlepšení proti předchozímu stavu.

5.5 Porucha číslo 3 – VN 219

Dne 6.6.2018 vznikla porucha na vedení VN 219 mezi rozvodnou BNS 9 (Brno-Sever) a rozvodnou HUV 9 (Brno-Husovice). Vedení VN 219 bylo poškozeno společně s linkou VN 1386. Porucha vznikla cizím zaviněním – navrtáním. Viníci z místa utekli a poškození nenahlásili, místo poruchy bylo nutno dohledat.

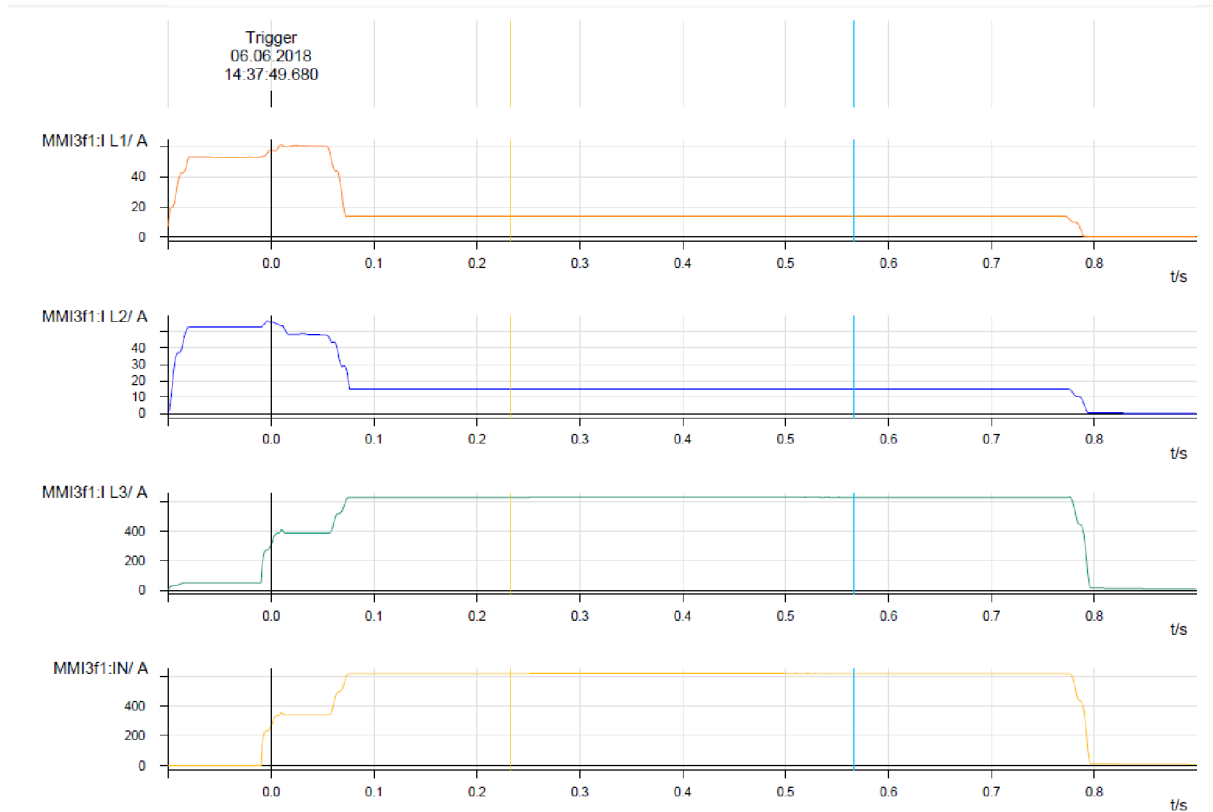


Obr. 5-8 Porucha č.3: místo poruchy VN 219, vrtací souprava

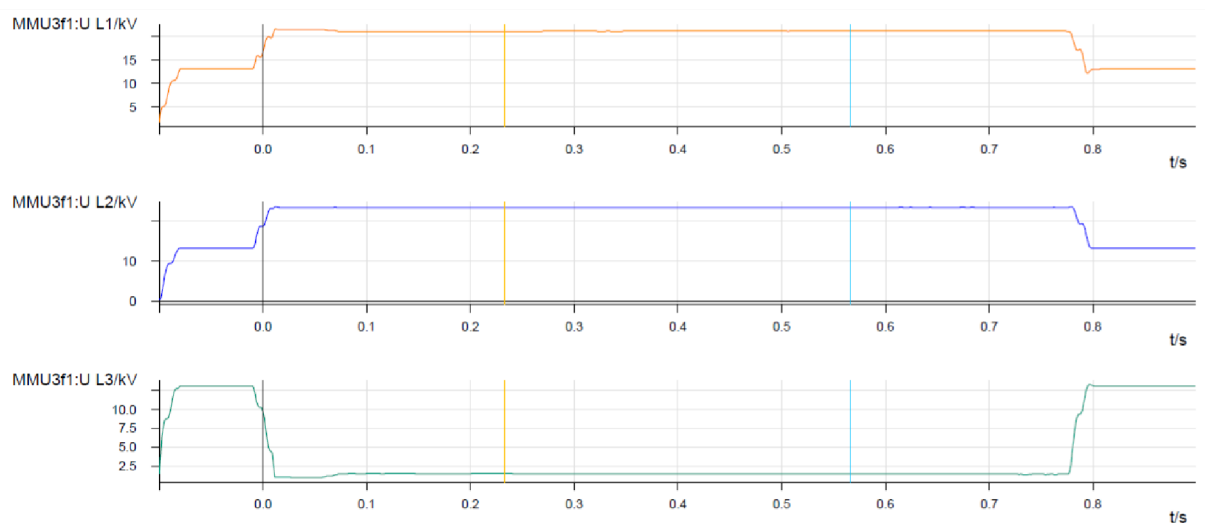
Předběžná lokalizace byla provedena několikanásobnou impulzní metodou SIM/MIM, kdy pomocí několika vyslaných vysokonapěťových impulzů byla za pomoci reflektometru určena přibližná poloha místa poruchy. Přesné místo poruchy bylo dohledáno pomocí rázové metody. Porucha byla dohledána v chodníku na kabelu typu ANKTOYPV, bez potřeby využití půdního mikrofonu.

Linka VN 219 je jištěna nadproudovou ochranou SIPROTEC 7SJ85. Vzniklá porucha byla prvně identifikována jako spojení jedné fáze se zemí L3-E.

Stejně jako vedení v předchozích případech, i v případě poruchy č. 3, se jedná o soustavu uzemněnou přes uzlové odporníky. Proudy porušené fáze a země jsou během zemního spojení navýšeny vlivem odporníků na zkratové hodnoty nad 0,6 kA (viz. obr 5-9), zatímco napětí poškozené fáze L3 se blíží nule (obr.5-10).

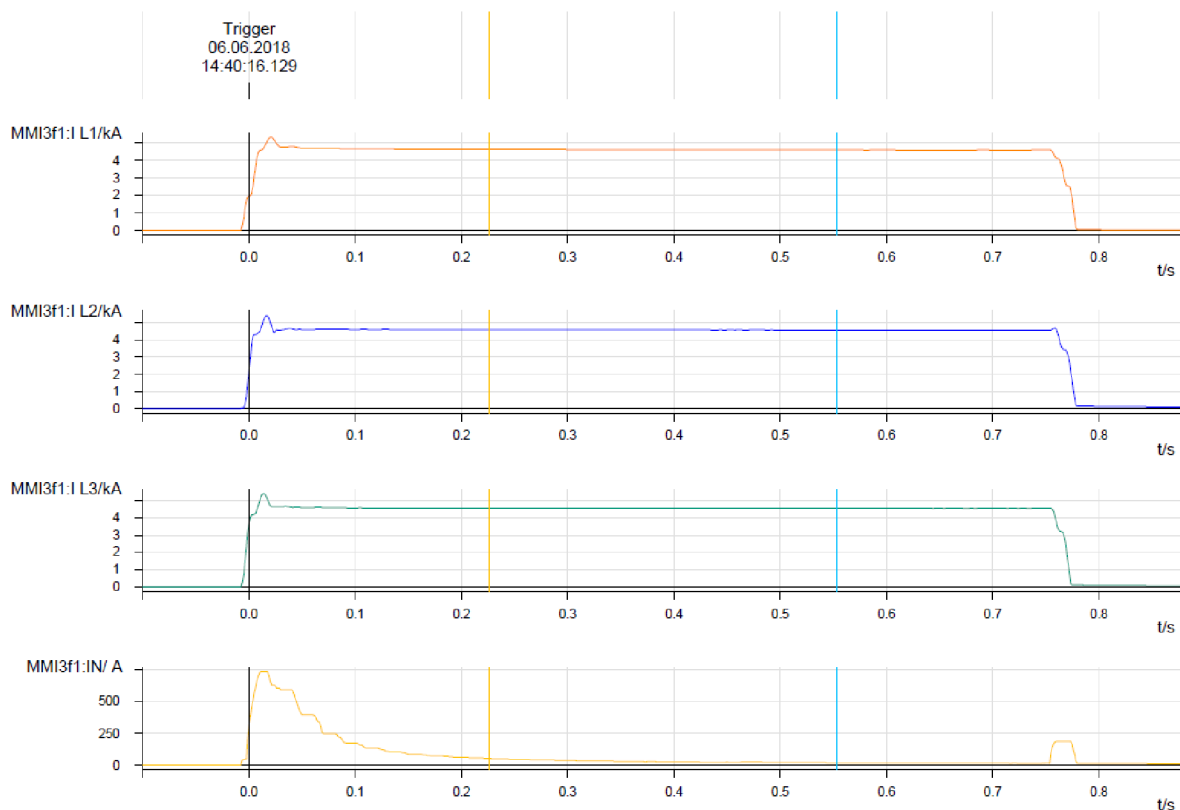


Obr. 5-9 Porucha č.3: 1. poruchový záznam efektivních hodnot proudů, porucha L3-E, SIGRA

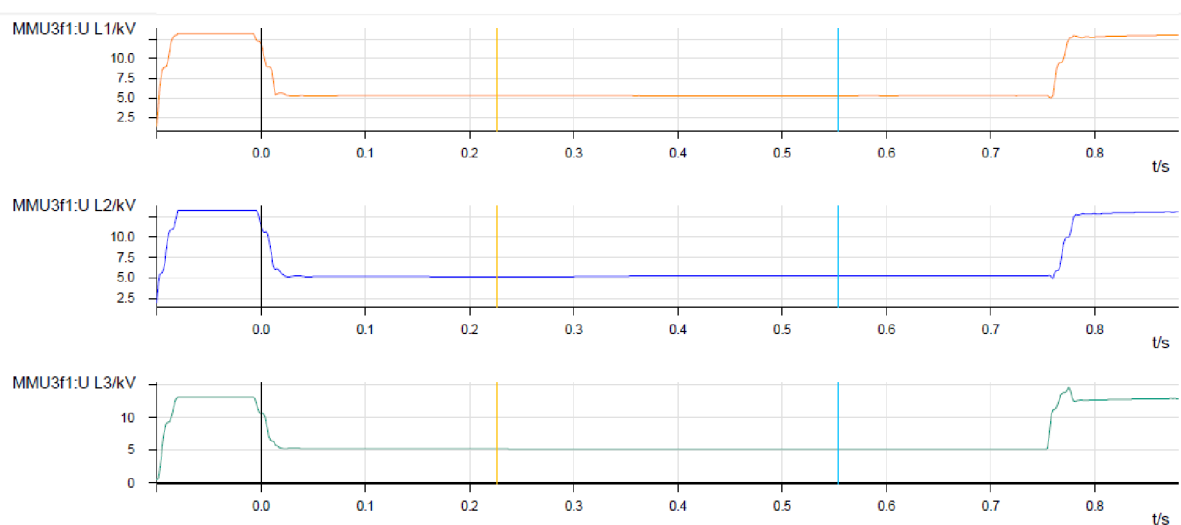


Obr. 5-10 Porucha č.3: 1. poruchový záznam efektivních hodnot napětí, porucha L3-E, SIGRA

Porucha během několika minut přešla z jednofázového zemního spojení L3-E do třífázové poruchy L1-L2-L3. Na obr. 5-11 lze sledovat prudký nárůst všech fázových proudů. Hodnoty zkratových proudů dosahovaly až 5 kA.



Obr. 5-11 Porucha č.3: 2. poruchový záznam proudů, porucha L1-L2-L3, SIGRA



Obr. 5-12 Porucha č.3: 2. poruchový záznam napětí, porucha L1-L2-L3, SIGRA

Výpočet reaktance poruchové smyčky se se vznikem mezifázové poruchy zpřesnil. V tab.5-12 je vidět, že v případě jednofázového spojení se zemí je odchylka od reálného místa poruchy téměř 2 km, zatímco pro třífázovou poruchu je rozdíl mezi určeným a skutečným místem poruchy necelých 200 metrů.

Tab. 5-12 Porucha č.3: místo poruchy

Porucha č.	Vedení	typ poruchy	$I_{\text{celková}}$ (km)	RIS			$I_{\text{p-ochrana}}$ (km)	$I_{\text{p-skutečná}}$ (km)	Chyba lokátoru (km)
				1. řez	4. řez	15. řez			
				(km)	(km)	(km)			
3	VN 219	L3-E	6,547	0	4,1	5,9	4,1	6,082	1,982
		L1-L2-L3							0,182

Porucha přešla v třífázovou ve 14:40 (obr.5-11), přesto v záznamu RIS (tab.5-13) je změna určené vzdálenosti až k času 14:41. Je to dáno tím, že každý řez je tvořen z dvojic naměřených hodnot dané minuty.

Tab. 5-13 Porucha č.3: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS

6.6.2018												
Čas*	14:37	14:38	14:39	14:40	14:41	14:42	14:43	14:44	14:45	14:46	14:47	14:48
I (km)	0	4,1	4,1	4,1	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
* čas, kdy byl pořízen záznam Začátek 14:35, první nenulový záznam 14:38												

Poruchu č.3 využijeme pro nalezení vhodnějšího nastavení parametrů zemního poměru v lokátoru na vedení VN 219. Postup bude stejný jako v předchozích případech. Použity budou hodnoty získané z poruchových záznamů ochrany (tab.5-14) a vypočtené impedancí vedení (tab.5-15).

Tab. 5-14 Porucha č.3: primární hodnoty, porucha typu L3-E, VN 219

Fázová napětí						Poruchové proudy			
\underline{U}_{L1}		\underline{U}_{L2}		\underline{U}_{L3}		\underline{I}_{L3}		\underline{I}_E	
(V)	(°)	(V)	(°)	(V)	(°)	(A)	(°)	(A)	(°)
20959	78,5	23185	16,3	1523	-82,8	623,91	-107,8	616,56	69,8

Tab. 5-15 Porucha č.3: Hodnoty impedance kabelového vedení VN 219

VN 219	délka	$\underline{Z}^{(1)}$		$\underline{Z}^{(0)}$		\underline{Z}_E	
	l	R	X	R	X	R	X
	(km)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
celý kabel \underline{Z}_L	6,546	0,916	0,851	3,666	3,404	0,916	0,851
porucha \underline{Z}_{sc}	6,082	0,851	0,791	3,406	3,163	0,851	0,791

Výpočet bude prezentován na prvním řádku tabulky. Sousedná složka impedance poškozeného kabelu podle vzorce (3.1)

$$Z_L^{(1)} = (R_k + jX_k) \cdot I_{\text{p-celková}} = (0,13 + j0,14) \cdot 6,546 = (0,916 + j0,851) \Omega.$$

Nulová složka impedance kabelu v poruše

$$Z_L^{(0)} = 4 \cdot Z_L^{(1)} = 4 \cdot (0,916 + j0,851) = (3,666 + j3,404) \Omega.$$

Zemní impedance podle (3.2)

$$\underline{Z}_{LE} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{Z}_L^{(0)} - \underline{Z}_L^{(1)}) = \frac{1}{3} \cdot ((3,666 + j3,404) - (0,916 + j0,851)) = (0,916 + j0,851) \Omega.$$

Z hodnot impedancí celého vedení bylo vypočteno nastavení parametrů zemního poměru v lokátoru, které odpovídá skutečnému stavu, podle (3.19), (3.20) a (3.21)

$$k_{RE} = \frac{R_L^{(0)} - R_L^{(1)}}{3 \cdot R_L^{(1)}} = \frac{3,666 - 0,916}{3 \cdot 0,916} = 1,$$

$$k_{XE} = \frac{X_L^{(0)} - X_L^{(1)}}{3 \cdot X_L^{(1)}} = \frac{3,404 - 0,851}{3 \cdot 0,851} = 1,$$

$$\underline{k}_E = \frac{(k_{RE} \cdot R_L + jX_L \cdot k_{XE}) \cdot (R_L - jX_L)}{R_L^2 + X_L^2} = \frac{(1 \cdot 0,916 + j0,851 \cdot 1) \cdot (0,916 - j0,851)}{0,916^2 + 0,851^2} = 1.$$

Tab. 5-16 Porucha č.3: Nastavení lokátoru – zemní poměr

VN 240		Nastavení		Vhodnější nastavení			$\underline{Z}_{LE,vyp}$		
$I_{celková}$	$I_{p-skutečná}$	k_{RE}	k_{XE}	\underline{k}_E		k_{RE}	k_{XE}	R	X
(km)	(km)	(-)	(-)	(-)	(°)	(-)	(-)	(Ω)	(Ω)
6,546	6,082	1	1	1,204	-30,437	1,604	0,381	1,366	0,301

Zemní poměr určen podle rovnice (3.16) pro poruchu č.3

$$\underline{k}_{E,vyp} = \frac{I_{L3} - \frac{U_{L3-E}}{Z_{sc}}}{I_E} = \frac{623,9 \angle -107,8^\circ - \frac{1523 \angle -82,8^\circ}{1,25 \angle 42,89^\circ}}{616,56 \angle 69,8^\circ} = 1,204 \angle -30,437^\circ$$

a ze zjištěného vhodného zemního poměru se určí zemní impedance podle (3.15)

$$\underline{Z}_{LE,vyp} = \underline{k}_{E,vyp} \cdot \underline{Z}_{sc}^{(1)} = (1,038 - j0,610) \cdot (0,851 + j0,791) = (1,366 + j0,301) \Omega.$$

Vhodnější nastavení parametrů zemního poměru v ochraně pro tuto poruchu z (3.19) a (3.20)

$$k_{RE,vyp} = \frac{R_{scE,vyp}}{R_{sc}^{(1)}} = \frac{1,366}{0,851} = 1,604,$$

$$k_{XE,vyp} = \frac{X_{scE,vyp}}{X_{sc}^{(1)}} = \frac{0,301}{0,791} = 0,381.$$

Na rozdíl od poruchy, kdy dojde ke spojení fáze se zemí a výpočet impedance poruchové smyčky je ovlivněn zadávaným zemním poměrem \underline{k}_E , je impedance pro mezifázové poruchy stanovena čistě z měřených hodnot napětí a proudu.

Tab. 5-17 Porucha č.3: primární hodnoty, porucha typu L1-L2-L3, VN 219

Vedení	Typ poruchy	Fázová napětí		Fázové proudy	
VN 219	L1-L2-L3	\underline{U}_{ph-E}		\underline{I}_{ph}	
Fáze		(V)	(°)	(V)	(°)
L1		5324,8	19,5	4627,6	-22,3
L2		5166	-100,2	5495,6	-142,8
L3		5232,6	138,5	4549,1	97,8

Pro případ, kdy je porucha třífázová (typ L1-L2-L3), existují tři poruchové smyčky: L1-L2, L2-L3 a L3-L1.

Tab. 5-18 Porucha č.3: porucha typu L1-L2-L3, vypočtené hodnoty poruchové smyčky

VN 219	\underline{Z}_{ph-ph}			Chyba lokátoru	
Poruchová smyčka	R	X	$l_{p-ochrana}$	Δ_1	$\delta_{\%}$
	(Ω)	(Ω)	(km)	(km)	(%)
L1-L2	0,8444	0,7553	5,81	0,27	4,16
L2-L3	0,8528	0,7685	5,91	0,17	2,60
L3-L1	0,8600	0,7545	5,80	0,28	4,25

Příklad výpočtu bude předveden na poruchové smyčce L1-L2 podle (3.8)

$$\underline{Z}_{L1-L2} = \frac{\underline{U}_{L1} - \underline{U}_{L2}}{\underline{I}_{L1} - \underline{I}_{L2}} = \frac{(5324,8 \angle 19,5^\circ) - (5166 \angle -100,2^\circ)}{(4627,6 \angle -22,3^\circ) - (5495,6 \angle -142,8^\circ)}$$

$$\underline{Z}_{L1-L2} = (0,844 + j0,755) \Omega,$$

reaktance poruchové smyčky je imaginární částí impedance poruchové smyčky

$$X_{L1-L2} = \text{im} \{ \underline{Z}_{L1-L2} \} = 0,755 \Omega.$$

Místo poruchy je následně určeno podle vzorce (3.39):

$$l_{p-ochrana,L1-L2} = \frac{X_{L1-L2}}{X'} = \frac{0,755}{0,13} = 5,81 \text{ km}.$$

Chyba lokátoru byla

$$\Delta_{l,L1-L2} = |l_{p-ochrana,L1-L2} - l_{p-skutečná}| = |5,81 - 6,082| = 0,27 \text{ km}.$$

Relativní chyba (3.40)

$$\delta_{\%,L1-L2} = \frac{|l_{p-ochrana,L1-L2} - l_{p-skutečná}|}{l_{p-skutečná}} \cdot 100 = \frac{|5,81 - 6,082|}{6,082} \cdot 100 = 4,16 \%.$$

Stejným způsobem byl proveden výpočet pro zbylé dvě poruchové smyčky L2-L3 a L3-L1.

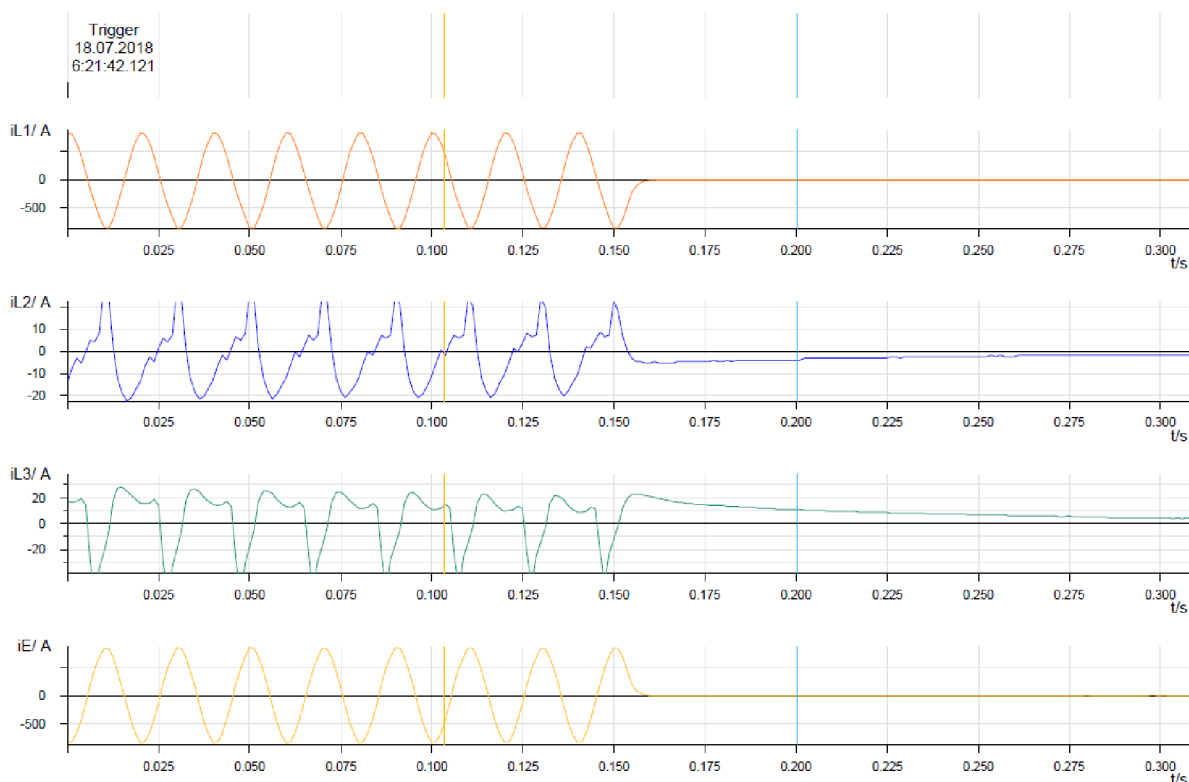
5.6 Porucha číslo 4 – VN 231

Čtvrtá porucha vznikla dne 18.7.2018 na kabelovém vedení VN 231 v místě mezi TS 704316, Dornych 39 Lidl, a TS 2583, Kovářská UXA. Na rozdíl od předchozích poruch se nejedná o poruchu způsobenou fyzicky třetí osobou během výkopových prací.

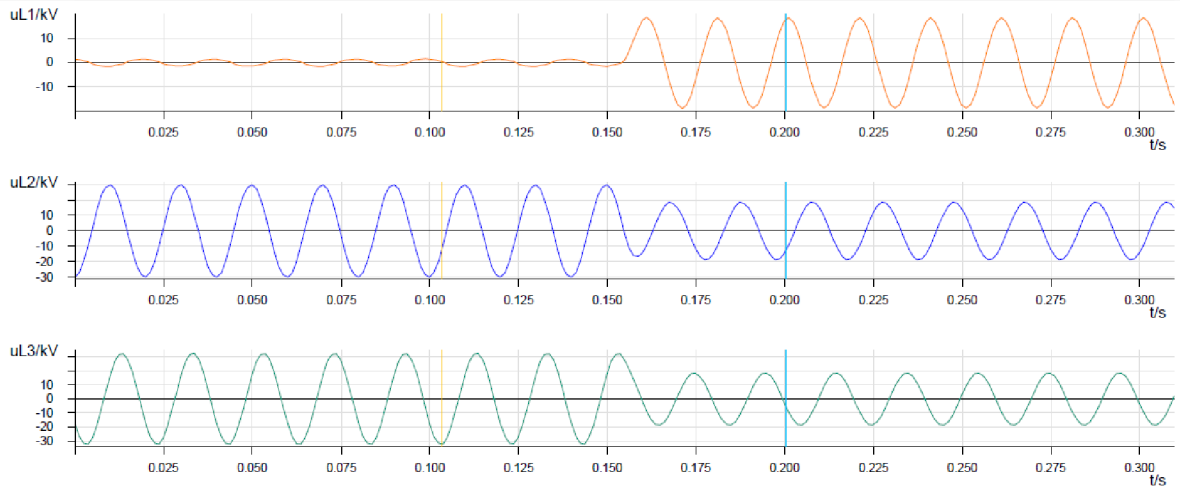
Při dohledávání poruchy bylo potřeba použít několikanásobnou impulzní metodu SIM/MIM pro předběžnou lokalizaci poruchy. Byl vyslán vysokonapěťový impuls do kabelu a krátkodobě změnil poruchu na zkrat (nízko-ohmovou poruchu). Následně vyslané sekundární impulzy způsobily v místě poruchy odraz, který se zaznamenal na reflektometru.

Pro zpřesnění lokalizace byla dále použita rázová metoda. Vysokonapěťovým impulsem se vytvořil v místě poruchy průraz. Vznikla proudová vlna mezi poruchou a rázovým generátorem, z periodické doby odrazu této vlny a průměrné rychlosti šíření impulsu by se zpřesnila lokalizace poruchy. Kromě rázové metody byla využita i metoda akustická, založena na půdním mikrofonu. Mikrofon zachytil vysoký akustický signál způsobený uměle vyvolaným průrazem v místě poruchy, přičemž amplituda zvuku byla nejvyšší v místě poruchy. Porucha byla nalezena na spojkce kabelu ANKTOYPV nedaleko TS 704316, Dornych 39 Lidl v travnaté části vedle parkoviště.

Vedení VN 231 je osazeno multifunkční ochranou SIPROTEC 7SJ63. Pomocí softwaru SIGRA byly vykresleny průběhy okamžitých hodnot v čase. Na obr.5-14 je možné pozorovat již známý úbytek napětí na postiženém vedení a zvýšení napětí na hodnotu sruženého napětí na zdravých fázích (L2, L3). Proud poškozené fáze L1 je v proti-fázi s proudem zemním a oba dosahují hodnoty zkratového proudu okolo 1 kA. Na proudy fází L2 a L3 je průběh zkruslený vlivem použití rázové metody.



Obr. 5-13 Porucha č.4: poruchový záznam proudů, porucha L1-E, SIGRA



Obr. 5-14 Porucha č.4: poruchový záznam napětí, porucha L1-E, SIGRA

Hodnoty proudů a napětí poruchy jsou v tabulce 5-19 a záznam v RIS je v tab. 5-21.

Tab. 5-19 Porucha č.4: primární hodnoty, porucha typu L1-E, VN 231

Fázová napětí						Poruchové proudy			
\underline{U}_{L1}		\underline{U}_{L2}		\underline{U}_{L3}		\underline{I}_{L1}		\underline{I}_E	
(V)	(°)	(V)	(°)	(V)	(°)	(A)	(°)	(A)	(°)
1074,4	107,5	21319	-84,6	22973	-146,3	588,09	80,8	590,24	-98,3

Tab. 5-20 Porucha č.4: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS

18.7.2018												
Čas*	6:19	6:20	6:21	6:22	6:23	6:25	6:25	6:26	6:27	6:28	6:29	6:30
l (km)	2,9	2,9	2,9	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
* čas, kdy byl pořízen záznam Konec 6:33, záznam zůstal neměnný												

Tab. 5-21 Porucha č.4: místo poruchy

Porucha č.	Vedení	typ poruchy	$l_{\text{celková}}$ (km)	RIS			$l_{\text{p-ochrana}}$ (km)	$l_{\text{p-skutečná}}$ (km)	Chyba lokátoru (km)
				1. řez	4. řez	15. řez			
				(km)	(km)	(km)			
4	VN 231	L1-E	5,196	2,9	3,1	3,1	3,1	2,829	0,271

Porucha č.4 je řešena stejným způsobem jako předešlá jednofázová zemní spojení. Proveďte se výpočet vhodnějšího nastavení zemního poměru. Vzhledem k velikost chyby lokátoru nebude příliš rozdílné od momentálního nastavení.

Tab. 5-22 Porucha č.4: Hodnoty impedance kabelového vedení VN 231

VN 231	délka	$\underline{Z}^{(1)}$		$\underline{Z}^{(0)}$		\underline{Z}_E	
	l	R	X	R	X	R	X
	(km)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
celý kabel \underline{Z}_L	5,195	0,727	0,675	2,909	2,701	0,727	0,675
porucha \underline{Z}_{sc}	2,829	0,396	0,368	1,584	1,471	0,396	0,368

Výpočet bude prezentován na prvním řádku tabulky. Sousedná složka impedance poškozeného kabelu podle vzorce (3.1)

$$Z_L^{(1)} = (R_k + jX_k) \cdot I_{p\text{-celková}} = (0,13 + j0,14) \cdot 5,195 = (0,727 + j0,675) \Omega.$$

Nulová složka impedance kabelu v poruše

$$Z_L^{(0)} = 4 \cdot Z_L^{(1)} = 4 \cdot (0,727 + j0,675) = (2,909 + j2,701) \Omega.$$

Zemní impedance podle (3.2)

$$\underline{Z}_{LE} = \frac{1}{3} \cdot (Z_L^{(0)} - Z_L^{(1)}) = \frac{1}{3} \cdot ((2,909 + j2,701) - (0,727 + j0,675)) = (0,727 + j0,675) \Omega.$$

Z hodnot impedancí celého vedení bylo vypočteno nastavení parametrů zemního poměru v lokátoru, které odpovídá skutečnému stavu, podle (3.19), (3.20) a (3.21)

$$k_{RE} = \frac{R_L^{(0)} - R_L^{(1)}}{3 \cdot R_L^{(1)}} = \frac{2,909 - 0,727}{3 \cdot 0,727} = 1,$$

$$k_{XE} = \frac{X_L^{(0)} - X_L^{(1)}}{3 \cdot X_L^{(1)}} = \frac{2,701 - 0,675}{3 \cdot 0,675} = 1,$$

$$\underline{k}_E = \frac{(k_{RE} \cdot R_L + jX_L \cdot k_{XE}) \cdot (R_L - jX_L)}{R_L^2 + X_L^2} = \frac{(1 \cdot 0,727 + j0,675 \cdot 1) \cdot (0,727 - j0,675)}{0,727^2 + 0,675^2} = 1.$$

Tab. 5-23 Porucha č.4: Nastavení lokátoru – zemní poměr

VN 231		Nastavení		Vhodnější nastavení			$\underline{Z}_{LE,vyp}$		
$I_{celková}$	$I_{p\text{-skutečná}}$	k_{RE}	k_{XE}	\underline{k}_E		k_{RE}	k_{XE}	R	X
(km)	(km)	(-)	(-)	(-)	(°)	(-)	(-)	(Ω)	(Ω)
5,195	2,829	1	1	2,427	-23,648	3,127	1,175	1,239	0,432

Zemní poměr určen podle rovnice (3.16) pro poruchu č.3

$$\underline{k}_{E,vyp} = \frac{I_{L1} - \frac{U_{LI-E}}{Z_{sc}}}{I_E} = \frac{588,09 \angle 80,8^\circ - \frac{1074,4 \angle 107,5^\circ}{0,541 \angle 42,90^\circ}}{590,24 \angle -98,3^\circ} = 2,427 \angle -23,65^\circ$$

a ze zjištěného vhodného zemního poměru se určí zemní impedance podle (3.15)

$$\underline{Z}_{LE,vyp} = \underline{k}_{E,vyp} \cdot Z_{sc}^{(1)} = (2,223 - j0,974) \cdot (0,396 + j0,368) = (1,239 + j0,432) \Omega.$$

Vhodnější nastavení parametrů zemního poměru v ochraně pro tuto poruchu z (3.19) a (3.20)

$$k_{RE,vyp} = \frac{R_{scE,vyp}}{R_{sc}^{(1)}} = \frac{1,239}{0,396} = 3,127,$$

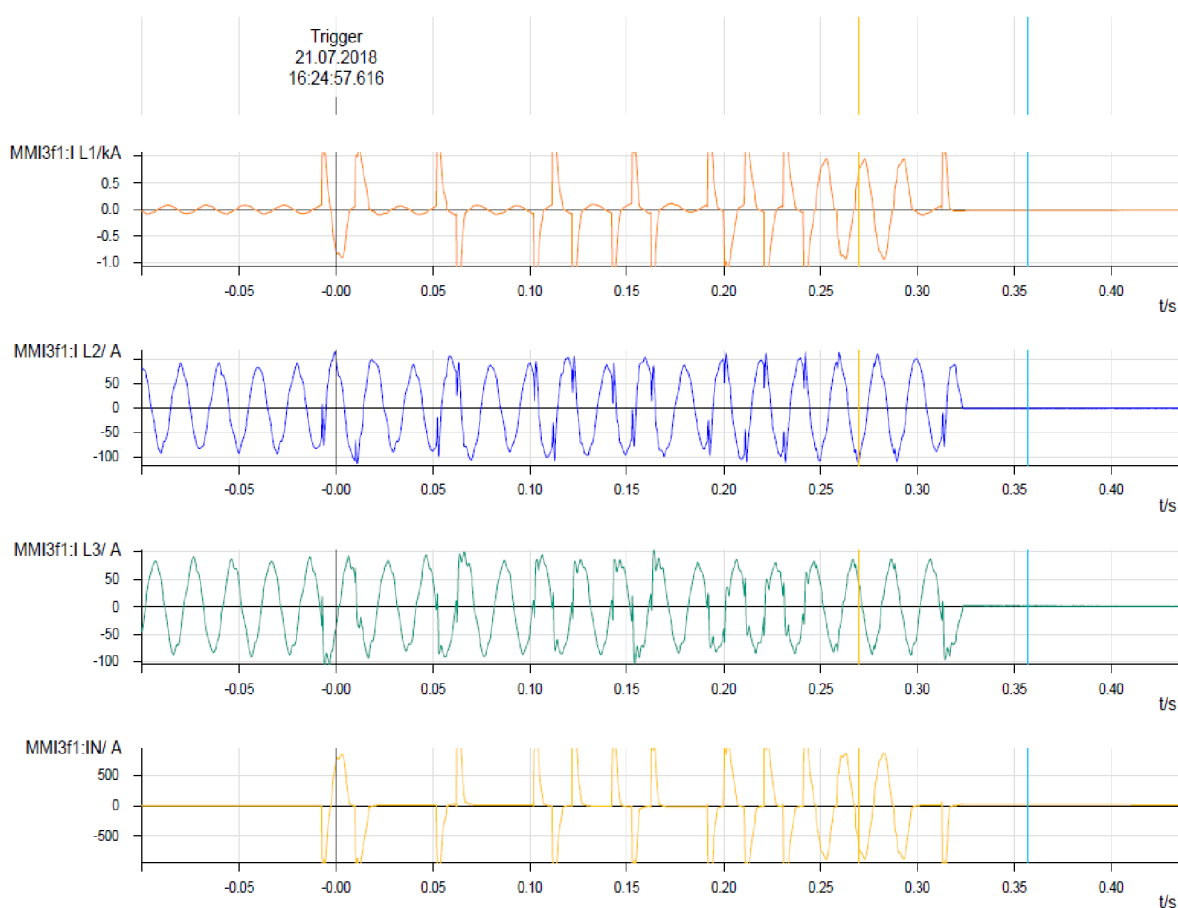
$$k_{XE,vyp} = \frac{X_{scE,vyp}}{X_{sc}^{(1)}} = \frac{0,432}{0,368} = 1,175.$$

5.7 Porucha číslo 5 -VN 1374

Na kabelové lince VN 1374 byl dne 21.7.2018, v místech mezi TS 701103, Sportovní kluziště a TS 703636, Hotel BOBY, indikován vznik poruchy.

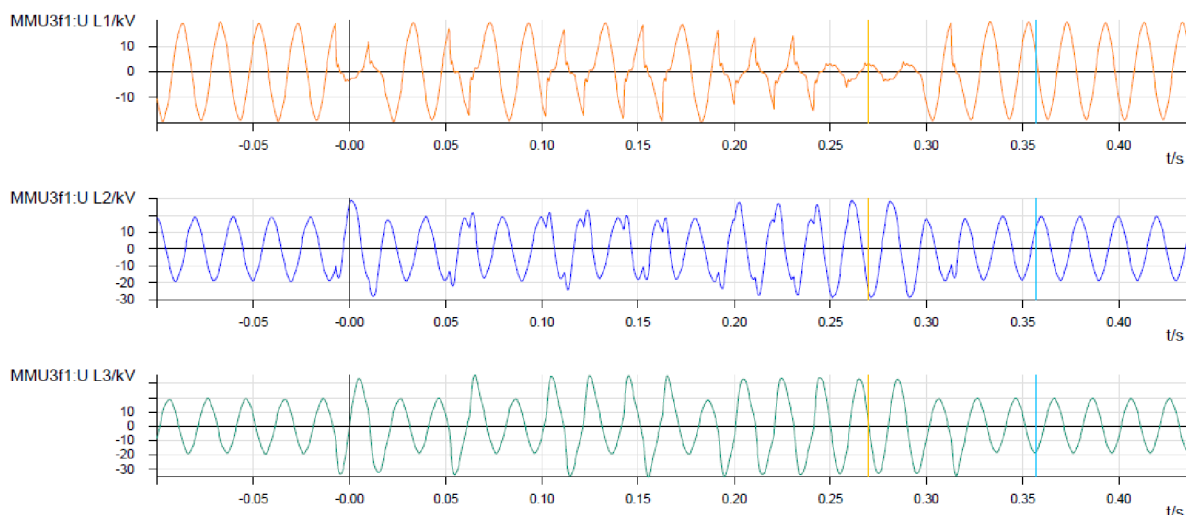
Při dohledávání této poruchy byla pro předběžné dohledání využita opět metoda několikanásobná impulzní metoda SIM/MIM. Pro přesné dohledání byla realizována rázová metoda a proběhlo dohledání akusticky pomocí půdňiho mikrofону. Porucha byla nalezena v asfaltované části parkoviště, přibližně 45 metrů od TS 701103, Sportovní kluziště. Poškozený kabel byl typu AXEKVCEY.

Vedení VN 1374 je chráněno multifunkční ochranou SIPROTEC 7SJ63. Ta v první chvíli vzniku poruchy zaznamenala přerušovanou poruchu, která po necelé půl minutě přerostla v jednofázové zemní spojení.



Obr. 5-15 Porucha č.5: Poruchový záznam proudů, porucha L1-E, SIGRA

Na záznamu napětí obr.5-16 je viditelný 5sekundový pokles fázového napětí a nárůst napětí zdravých fází, než došlo k ustálení na fázové hodnotě.



Obr. 5-16 Porucha č.5: Poruchový záznam napětí, porucha L1-E, SIGRA

Hodnoty proudů a napětí poruchy jsou v tabulce 5-24 a záznam v RIS je v tab. 5-25.

Tab. 5-24 Porucha č.5: primární hodnoty, porucha typu L1-E, VN 1374

Fázová napětí						Poruchové proudy			
\underline{U}_{L1}		\underline{U}_{L2}		\underline{U}_{L3}		\underline{I}_{L1}		\underline{I}_E	
(V)	(°)	(V)	(°)	(V)	(°)	(A)	(°)	(A)	(°)
2415,7	-90,1	20411	61,7	23382	-0,8	661	-128,7	609,73	51,0

Tab. 5-25 Porucha č.5: záznam vzdálenosti místa poruchy v 15minutovém intervalu, RIS

21.7.2018												
Čas*	16:24	16:25	16:26	16:27	16:28	16:29	16:30	16:31	16:32	16:33	16:34	16:35
l (km)	0	7,8	7,8	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4

* čas, kdy byl pořízen záznam
Začátek 16:22, první nenulový záznam 16:25

Tab. 5-26 Porucha č.5: místo poruchy

Porucha č.	Vedení	typ poruchy	$l_{\text{celková}}$ (km)	RIS			$l_{\text{p-ochrana}}$ (km)	$l_{\text{p-skutečná}}$ (km)	Chyba lokátoru (km)
				1. řez (km)	4. řez (km)	15. řez (km)			
5	VN 1374	L1-E	11,174	0	7,8	12,4	12,4	8,488	3,912

Porucha č.5 je řešena stejným způsobem jako předešlé poruchy. Proveďte se výpočet vhodnějšího nastavení zemního poměru. Chyba lokátoru byla víc jak třetina daného vedení.

Tab. 5-27 Porucha č.5: Hodnoty impedance kabelového vedení VN 1374

VN 1374	délka	$\underline{Z}^{(1)}$		$\underline{Z}^{(0)}$		\underline{Z}_E	
	l	R	X	R	X	R	X
	(km)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
celý kabel \underline{Z}_L	11,174	1,564	1,453	6,257	5,810	1,564	1,453
porucha \underline{Z}_{sc}	8,488	1,188	1,103	4,753	4,414	1,188	1,103

Výpočet bude prezentován na prvním řádku tabulky. Sousedná složka impedance poškozeného kabelu podle vzorce (3.1)

$$Z_L^{(1)} = (R_k + jX_k) \cdot I_{p\text{-celková}} = (0,13 + j0,14) \cdot 11,174 = (1,564 + j1,453) \Omega.$$

Nulová složka impedance kabelu v poruše

$$Z_L^{(0)} = 4 \cdot Z_L^{(1)} = 4 \cdot (1,564 + j1,453) = (6,257 + j5,810) \Omega.$$

Zemní impedance podle (3.2)

$$\underline{Z}_{LE} = \frac{1}{3} \cdot (Z_L^{(0)} - Z_L^{(1)}) = \frac{1}{3} \cdot ((6,257 + j5,810) - (1,564 + j1,453)) = (1,564 + j1,453) \Omega.$$

Nastavení parametrů zemního poměru v lokátoru, které odpovídá skutečnému stavu, podle (3.19), (3.20) a (3.21)

$$k_{RE} = \frac{R_L^{(0)} - R_L^{(1)}}{3 \cdot R_L^{(1)}} = \frac{6,257 - 1,564}{3 \cdot 1,564} = 1,$$

$$k_{XE} = \frac{X_L^{(0)} - X_L^{(1)}}{3 \cdot X_L^{(1)}} = \frac{5,810 - 1,453}{3 \cdot 1,453} = 1,$$

$$\underline{k}_E = \frac{(k_{RE} \cdot R_L + jX_L \cdot k_{XE}) \cdot (R_L - jX_L)}{R_L^2 + X_L^2} = \frac{(1 \cdot 0,727 + j0,675 \cdot 1) \cdot (0,727 - j0,675)}{0,727^2 + 0,675^2} = 1.$$

Tab. 5-28 Porucha č.4: Nastavení lokátoru – zemní poměr

VN 231		Nastavení		Vhodnější nastavení			$\underline{Z}_{LE,vyp}$		
$I_{celková}$	$I_{p\text{-skutečná}}$	k_{RE}	k_{XE}	\underline{k}_E		k_{RE}	k_{XE}	R	X
(km)	(km)	(-)	(-)	(-)	(°)	(-)	(-)	(Ω)	(Ω)
11,174	8,488	1	1	1,365	-7,377	1,516	1,165	1,801	1,285

Zemní poměr určen podle rovnice (3.16) pro poruchu č.3

$$\underline{k}_{E,vyp} = \frac{I_{L1} - \frac{U_{L1-E}}{Z_{sc}}}{I_E} = \frac{661 \angle -128,7^\circ - \frac{2415,7 \angle -90,1^\circ}{1,621 \angle 42,88^\circ}}{609,73 \angle 51^\circ} = 1,365 \angle -7,377^\circ$$

a ze zjištěného vhodného zemního poměru se určí zemní impedance podle (3.15)

$$\underline{Z}_{LE,vyp} = \underline{k}_{E,vyp} \cdot \underline{Z}_{sc}^{(1)} = (1,354 - j0,175) \cdot (1,188 + j1,103) = (1,801 + j1,285) \Omega.$$

Vhodnější nastavení parametrů zemního poměru v ochraně pro tuto poruchu z (3.19) a (3.20)

$$k_{RE,vyp} = \frac{R_{scE,vyp}}{R_{sc}^{(1)}} = \frac{1,801}{1,188} = 1,516,$$

$$k_{XE,vyp} = \frac{X_{scE,vyp}}{X_{sc}^{(1)}} = \frac{1,285}{1,103} = 1,165.$$

5.8 Shrnutí všech zkoumaných poruch

Souhrnný soupis chyby lokátoru pro všechny zkoumané poruchy je v tabulce 5-29, kde jsou uvedeny jednotlivé vzdálenosti:

- Celková délka kabelového vedení $l_{\text{celková}}$
- Systémem vygenerované místo poruchy $l_{\text{p-ochrana}}$
- Skutečné místo poruchy dohledáno odbornými pracovníky $l_{\text{p-skutečná}}$

Tab. 5-29 Chyba lokalizace

VEDENÍ	Typ poruchy	$l_{\text{celková}}$	$l_{\text{p-ochrana}}$	$l_{\text{p-skutečná}}$	Δ_1	$\delta_{\%}$	$\delta_{\% \text{celý kabel}}$
		(km)	(km)	(km)	(km)	(%)	(%)
VN 240	L1-E	6,526	5,8	2,657	3,14	118,18	46,66
VN 1210	L3-E	4,273	1,2	0,201	1,00	497,51	23,40
VN 219	L1-L2-L3	6,547	5,9	6,082	0,18	2,96	2,75
	L3-E		4,1		1,98	32,56	30,24
VN 231	L1-E	5,196	3,1	2,829	0,27	2,47	1,35
VN 1374	L1-E	11,174	12,4	8,488	3,91	46,07	34,99

Chyba lokátoru by byla

$$\Delta_1 = |l_{\text{p-ochrana}} - l_{\text{p-skutečná}}| = |5,8 - 2,657| = 3,14 \text{ km}.$$

Relativní chyba (3.40)

$$\delta_{\%} = \frac{|l_{\text{p-ochrana}} - l_{\text{p-skutečná}}|}{l_{\text{p-skutečná}}} \cdot 100 = \frac{|5,8 - 2,657|}{2,657} \cdot 100 = 118,18 \%$$

Chyba s ohledem na celou délku kabelu

$$\delta_{\% \text{celý kabel}} = \frac{|l_{\text{p-ochrana}} - l_{\text{p-skutečná}}|}{l_{\text{celková}}} \cdot 100 = \frac{|5,8 - 2,657|}{6,526} \cdot 100 = 44,66 \%$$

Tab. 5-30 Vypočtené vhodnější nastavení parametrů zemního poměru

Vedení	délka			Nastavení		Vhodnější nastavení			
	$l_{\text{celková}}$	$l_{\text{p-ochrana}}$	$l_{\text{p-skutečná}}$	k_{RE}	k_{XE}	\underline{k}_{E}		k_{RE}	k_{XE}
	(km)	(km)	(km)	(-)	(-)	(-)	(°)	(-)	(-)
VN 240	6,526	5,8	2,657	1	1	3,706	0,105	3,700	3,714
VN 1210	4,273	1,2	0,201	1	1	13,160	-6,943	14,540	11,350
VN 219	6,546	4,1	6,082	1	1	1,204	-30,437	1,604	0,381
VN 231	5,195	2,8	3,100	1	1	2,427	-23,648	3,127	1,175
VN 1374	11,174	12,4	8,488	1	1	1,365	-7,377	1,516	1,165

U vedení VN 231 (porucha č.4) je nově určená imaginární část zemního poměru k_{XE} velice blízká původně nastavené hodnotě. Souhlasně s tímto se jedná o lokátorem nejpřesněji určené místo poruchy s odchylkou pouhých 271 metrů.

V následující tabulce je uvedeno kolik kilometrů délky vybraných vedení tvoří jednotlivé typy kabelů (všechny s průřezem 240 mm²). Vzhledem k zastavení výroby a pokládky kabelů PILC (kabelů s izolací napuštěným papírem) a jejich nahrazování kabely s izolací zesíťovanými polymery se projevuje ubývajícím množstvím úseků kabelů PILC.

Tab. 5-31 Kabelová vedení – složení

Typ kabelu	VN 240	VN 1210	VN 219	VN 231	VN 1374
	délka	délka	délka	délka	délka
	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)
NA2XS2Y	2,133	0,299	0,002	0,560	1,496
NA2XS(F)2Y	0,549	0,015	2,575	1,612	4,064
AMKTOYPV	0,335	0	0	1,743	2,120
AMKTOYPVs	0	0	1,095	0	0
ANKTOYPV	0	0	0	0	0,589
ANKTOYPVs	1,632	0	0	0	0
AXEKCY	0,400	1,834	0	0	0
AXEKCEY	0,467	0,496	0	0,016	0,071
AXEKVCEY	1,009	1,629	2,874	1,264	2,833
$l_{\text{celková}}$ (km)	6,526	4,273	6,546	5,196	11,174
Počet kabelových úseků	49	57	25	54	73

Pro porovnání, jaký rozdíl vzniká počítáním impedance s uvažováním parametrů jednotlivých typů kabelů oproti výpočtu z celkové délky vedení a průměrných měrných hodnot, byla vytvořena tabulka 5-32.

Tab. 5-32 Impedance vedení

	$Z_{\text{přesná}}^{(1)}$		$Z_{\text{průměrná}}^{(1)}$		$Z_{\text{průměrná}}^{(1)} - Z_{\text{přesná}}^{(1)}$	
	R	X	R	X	R	X
	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
VN 240	0,916	0,855	0,914	0,848	-0,002	-0,007
VN 1210	0,546	0,820	0,598	0,555	0,052	-0,265
VN 219	0,862	0,953	0,916	0,851	0,054	-0,102
VN 231	0,709	0,644	0,727	0,675	0,018	0,031
VN 1374	1,492	1,431	1,564	1,453	0,072	0,022

Největší rozdíl vznikl v případě vedení VN 1210 (porucha č.2). Důvodem je, že vedení neobsahuje žádné úseky s kabely typu PILC, které mají nižší reaktanci než kabely typu AXE. Právě u poruchy na tomto kabelovém vedení vznikla i největší odchylka při určování místa poruchy lokátorem.

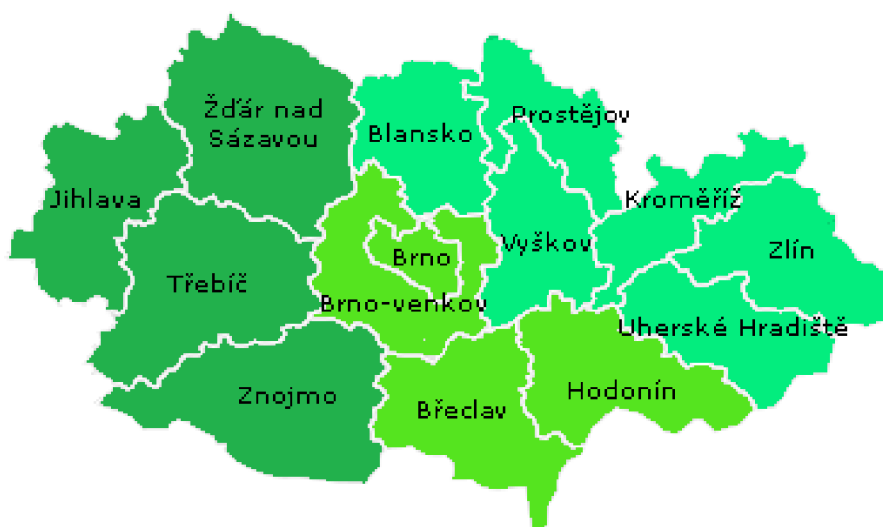
6 PORUCHOVOST NA VEDENÍCH 22 KV

Poruchy na distribučních sítích sebou přinášejí problémy. Kromě bezproudí, které je viditelné pro běžného spotřebitele, jsou s poruchami spojené nemalé finanční výdaje pro provozovatele. Může se například jednat o ztrátu zisku za nedodanou energii, výdaje na opravu poškozených prvků sítě, zdržení plánovaných prací, omezení provozu, pokuty v případě nedodržení časových termínů na odstranění poruchy a v neposlední řadě finanční náhrady podnikům, kterým vzniká při bezproudí finanční ztráta. Tyto nemalé finanční náklady nutí distributory nejen k co nejrychlejšímu řešení jednotlivých poruch, ale i k předcházení jejich vzniku. Není reálné zajistit zcela bezporuchový provoz distribučních sítí, ale je možné dosáhnout snížení množství poruch na nevyhnutelné minimum. Pro dosažení tohoto cíle je sledování poruchovosti značným přínosem.

Dlouhodobým sledováním poruchovosti je možné odhalit nejen nejčastěji se vyskytující typy poruch, ale i nejproblémovější prvky sítí, jejich přibližnou životnost a případně i zvýšenou poruchovost jednotlivých prvků konkrétních dodavatelů. Další možností využití informací z dlouhodobé statistiky je posuzování příčin nárůstu nebo snížení množství poruch v určitém časovém období a zda došlo ke zlepšení nebo zhoršení oproti předchozímu časovému období. Dlouhodobé sledování vývoje poruchovosti je tedy důležitou součástí při vytváření investičních plánů a umožňuje vybrat vhodné využití finančních prostředků na zřízení potřebných opatření. Jedním z cílů vedení statistik je zajistit, aby se poruchovější technologie a prvky nahradili vhodnějšími řešeními, které do budoucna zajistí bezpečnější a plynulejší provoz sítě.

6.1 Poruchovost na hladině 22 kV v období 1.1.2017-1.1.2019

Tato kapitola se věnuje poruchám vzniklým ve dvouletém období na území společnosti E.ON na Jižní Moravě (viz. obr.6-1). Celé území je rozděleno na tři dvojice pracovních oblastí: Třebíč a Čebín, Brno a Břeclav, Prostějov a Otrokovice. Celé území je spravováno během pracovních dní šesti dispečery, kteří řídí jednu z dvojice oblastí, na kterou jsou vyškoleni. Během nočních směn, víkendů a svátků, kdy nejsou dlouhodobě plánované práce je na každé území nanejvýš jeden dispečer.



Obr. 6-1 Distribuční území společnosti E.ON – Jižní Morava

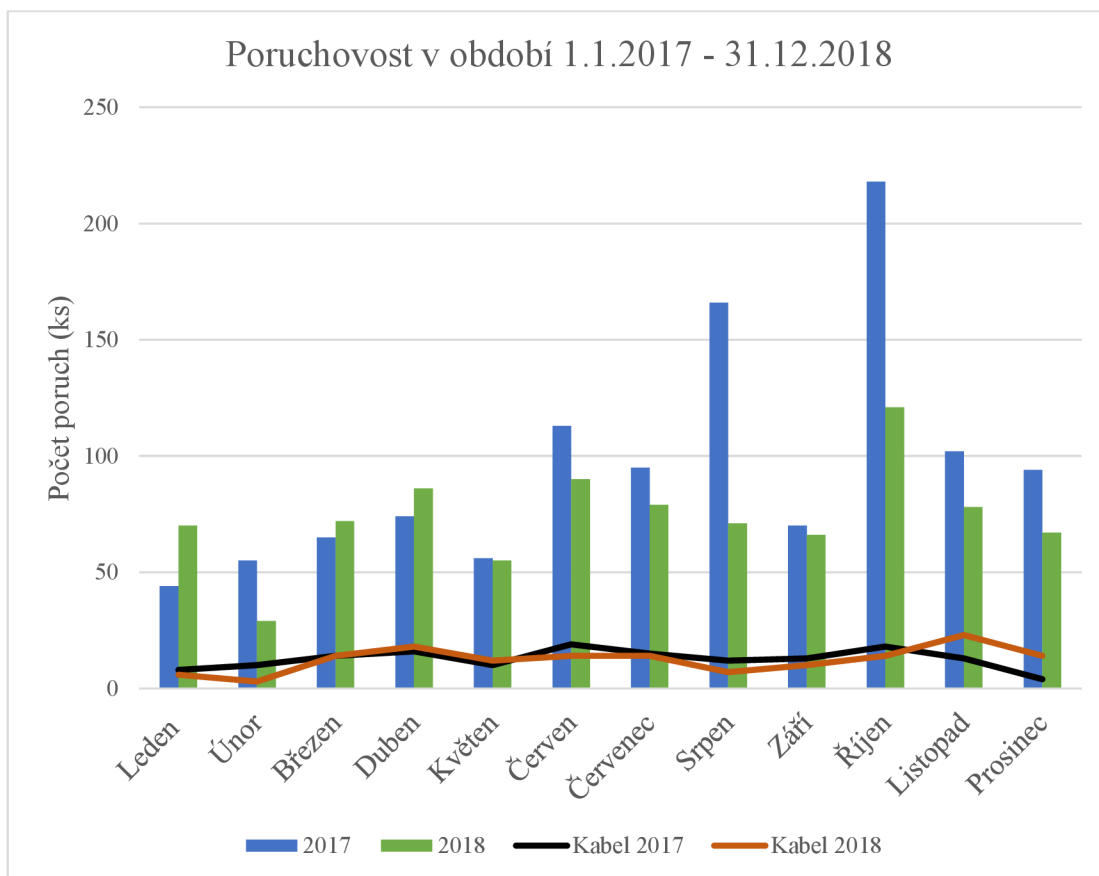
Přehled všech poruch vzniklých na hladině 22 kV za sledované období od 1.1.2017 do 1.1.2019 je uvedeno v tabulce 6-1 a vykresleno v obr.6-2. Poruchy na kabelových vedeních jsou uvedeny samostatně.

Tab. 6-1 Poruchovost v období 1.1.2017 – 31.12.2018 pro jednotlivé měsíce

	všechny poruchy		Poruchy kabelových vedení	
	2017	2018	2017	2018
Leden	44	70	8	6
Únor	55	29	10	3
Březen	65	72	14	14
Duben	74	86	16	18
Květen	56	55	10	12
Červen	113	90	19	14
Červenec	95	79	15	14
Srpen	166	71	12	7
Září	70	66	13	10
Říjen	218	121	18	14
Listopad	102	78	13	23
Prosinec	94	67	4	14
celkem	1152	884	152	149
	2036		301	

Přes výrazný rozdíl v poruchovosti v jednotlivých letech, kdy množství poruch kleslo v roce 2018 o 268 poruch oproti roku 2017, se tento pokles nijak neprojevil v poruchovosti kabelových vedení.

Příčinami vyššího počtu poruch v roce 2017 jsou především silné bouřky a vichřice, které ten rok způsobily nejen pády mnoha stromů a větví, ale v některých oblastech i sesuvy půdy. Velice kritickým byl v obou letech říjen, kdy bylo množství poruch nejvyšší pro daný rok – 218 poruch v roce 2017 a 121 poruch v roce 2018. Poruchovost na kabelových vedeních se oba roky pohybovala okolo 150 poruch za rok. Nižší množství poruch na kabelech přes zimní měsíce jsou způsobeny především neprováděním stavebních a výkopových prací, které jsou častou příčinou poškození kabelů.



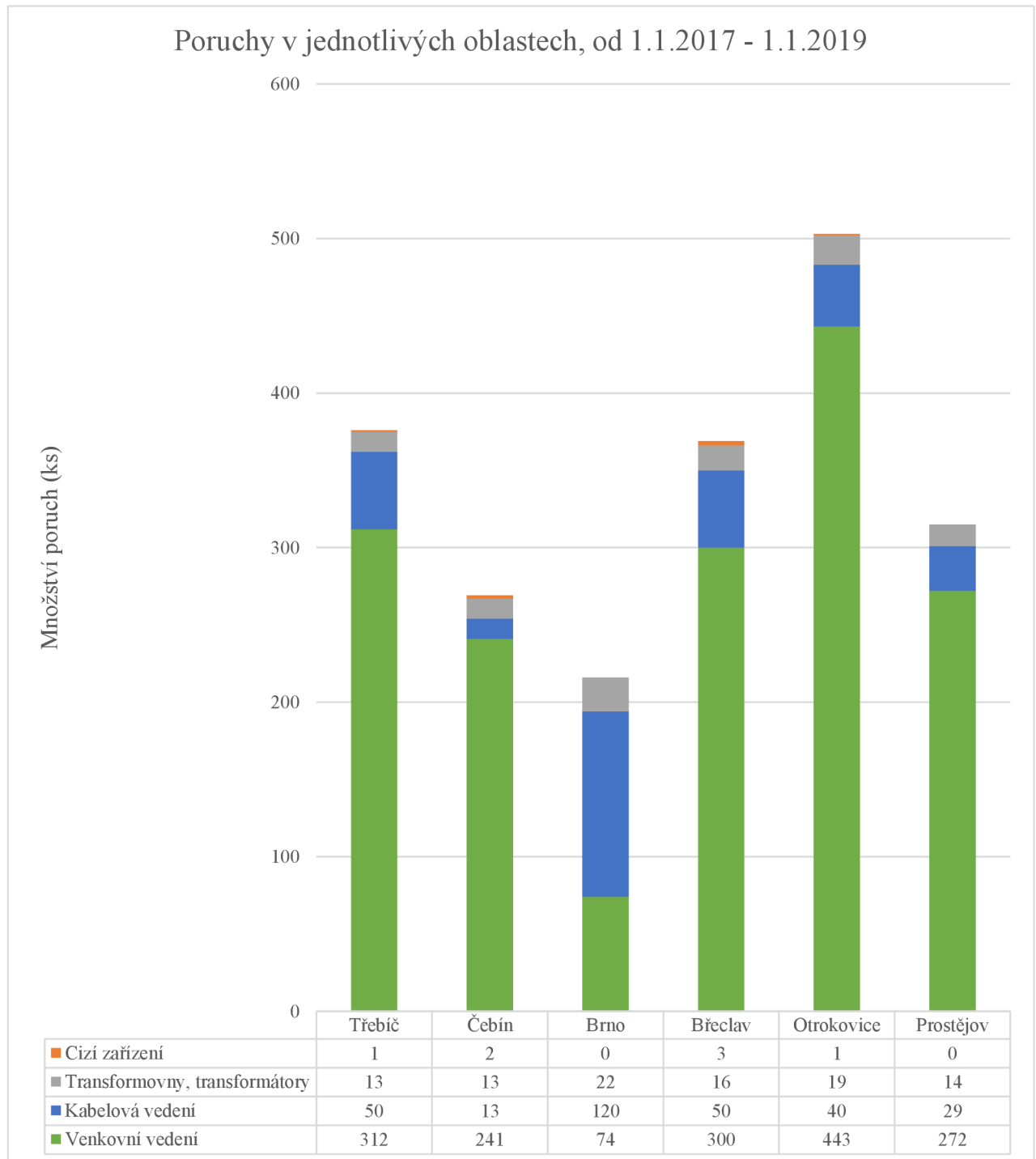
Obr. 6-2 Graf: Poruchovost linek 22 kV v období 1.1.2017-31.12.2018

Poruchovost z pohledu oblasti výskytu jsou zaznamenány v tabulce 6-2. Poruchy na kabelových vedeních tvoří přibližně 10 % z celkového množství poruch. To je dáno tím, že většinu zdejších distribučních sítí 22 kV tvoří venkovní vedení. Jediným místem, kde je vyšší výskyt použití kabelových vedení je město Brno, proto není zvlášť překvapivé, že má nejvyšší počet poruch na kabelových vedeních právě oblast Brna. V celkovém hodnocení ovšem má nejnižší poruchovost z posuzovaných šesti oblastí za roky 2017 a 2018.

Oblast s nejvyšším počtem poruch je oblast Otrokovic s 503 poruchami, zde je vhodné zmínit, že 183 z těchto poruch bylo způsobeno vichřicemi a pády stromů a větví do vedení.

Tab. 6-2 Poruchovost oblasti Jižní Morava v období 1.1.2017 – 1.1.2019

Kraj - Jižní Morava	Venkovní vedení	Kabelová vedení	Transformovny, transformátory	Cizí zařízení	Poruch celkem
Třebíč	312	50	13	1	376
Čebín	241	13	13	2	269
Brno	74	120	22	0	216
Břeclav	300	50	16	3	369
Otrokovice	443	40	19	1	503
Prostějov	272	29	14	0	315
Celkem	1642	302	97	7	2048
Celkem (%)	80,2	14,8	4,7	0,3	100



Obr. 6-3 Graf: Poruchovost linek 22 kV v období 1.1.2017-1.1.2019 v jednotlivých oblastech

6.1.1 Poruchovost kabelových vedení v období 1.1.2017 – 1.1.2019

V tabulce 6-3 a obrázku 6-4 jsou poruchy kabelových vedení rozděleny podle příčin vzniku poruch.

Tab. 6-3 Poruchovost kabelových vedení v období 1.1.2017 – 1.1.2019

Kabel	Kabelová koncovka	Odpojovač, odpínač, vypínač	Cizí potrubí, voda*	Jiné	Cizí	Celkem
139	20	34	31	70	8	302

Kabel shrnuje poruchy, kde příčinami vzniku byly navrtané či nakopnuté kabely, porušené pláště kabelů, vadné kabely, které nevyhověly při zkoušce.

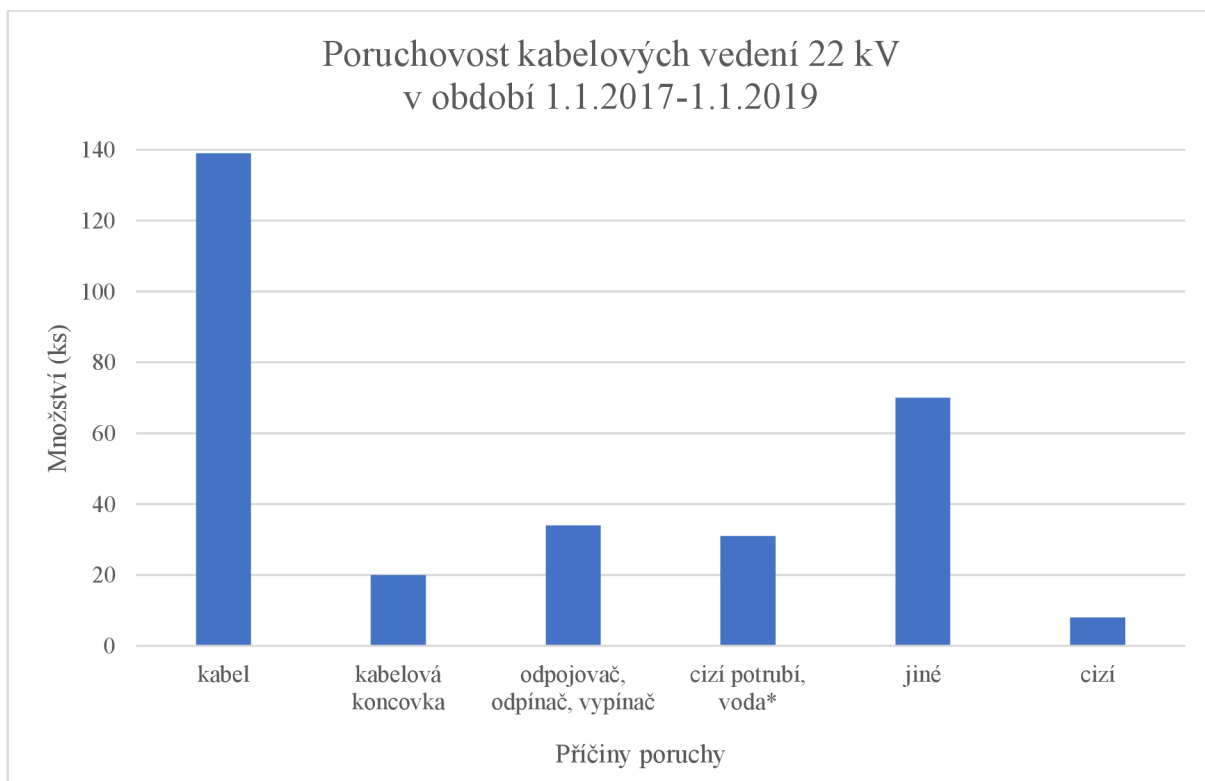
V případě *kabelových koncovek* se jednalo především o vyhořelé a upálené koncovky.

U *odpojovačů, odpínačů a vypínačů* šlo o mechanické závady, které pokud nebyly odstraněny servisem, končily výměnou přístroje.

*Cizí potrubí, voda** shrnuje nutná vypnutí, která byla uskutečněna buď z důvodů prací na blízkých kanalizacích, vodovodních řádech, parovodech a plynovodech anebo byla způsobena vnikem vody do zařízení.

Jiné je nejpestřejší skupinou zahrnující vše od vadných měničů, chybné manipulace, poškozených zařízení trafostanic a disfunkčního měřicího transformátoru napětí, až po neobjasněné příčiny, které se po manipulaci a opětovném zavedení vedení do provozu, nepodařilo dohledat.

Cizí zařízení je shrnutí několika poruch, které vznikly na zařízení některého z odběratelů.



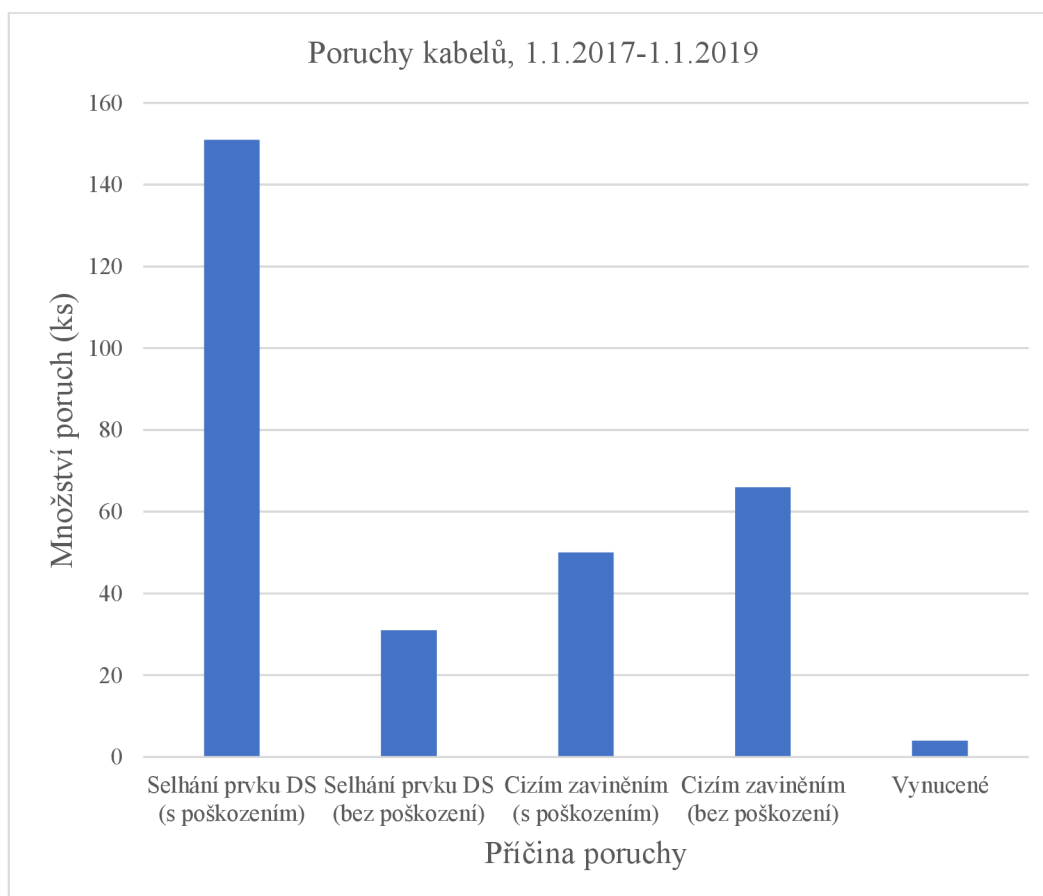
Obr. 6-4 Graf: Poruchovost kabelových vedení 22 kV v období 1.1.2017-1.1.2019

Všechny tyto poruchy se člení podle toho, jestli byl některý z prvků poškozen a zda šlo o cizí zavinění (nakopnuté kabely, poruchy způsobené klimatickými vlivy, poruchy u odběratele atd.) nebo selhání prvku distribuční soustavy (upálené koncovky, mechanické závady, degradace izolace atd.).

Ve sledovaném období byly dvě třetiny poruch, v tomto případě přes 200 poruch, s poškozením a postihnutý prvek musel být opraven nebo vyměněn. Přehled je uveden v tabulce 6-4 a grafu 6-5.

Tab. 6-4 Množství poruch s poškozením

Selhání prvku DS (s poškozením)	151
Selhání prvku DS (bez poškození)	31
Cizím zaviněním (s poškozením)	50
Cizím zaviněním (bez poškození)	66
Vynucené	4
Celkem	302
Celkem s poškozením	201
Celkem bez poškození	97



Obr. 6-5 Graf: Poruchovost kabelů v období 1.1.2017-1.1.2019

7 ZÁVĚR

Předmětem diplomové práce bylo seznámení s problematikou provozování kabelových sítí VN a způsoby vyhledávání na nich vzniklých poruch jak pomocí ochran, tak odbornými pracovníky a následné porovnání přesnosti metod vyhledávání na vybrané skupině skutečných poruch.

První část práce byla věnována kabelům, kabelovým souborům a způsobu provozu vedení na napěťové hladině 22 kV. Zmíněné bylo především jednofázové spojení se zemí, které se vyskytuje nejčastěji a zhoršuje schopnost dohledávání místa poruchy kompenzační poruchového kapacitního proudu, který následkem toho nebude závislý na místě poruchy.

Následující část práce se věnovala funkci lokátorů ochran a způsobu výpočtu jednotlivých veličin poruchy na základě naměřených hodnot. Prezentován byl případ mezifázové poruchy a následně jednofázového spojení se zemí. Součástí této kapitoly byl i popis dohledání přibližného poruchového úseku dispečerem.

Třetí část práce vysvětlovala principy jednotlivých dohledávacích metod používaných vyškolenými pracovníky. Následně i postup, který je potřeba dodržet pro rychlé dohledání poruchy s vhodnou volbou metod podle informací o kabelovém vedení a poruše.

Ve čtvrté části práce byly analyzovány konkrétní poruchy vzniklé na kabelových vedeních společnosti E.ON. Převážně se jednalo o jednofázová spojení se zemí.

Pro jednotlivé poruchy jsme porovnali lokátorem určenou vzdálenost místa poruchy se skutečnými vzdálenostmi. Byly vypočteny impedance kabelových vedení, impedance porušené části vedení pro případ s přesnými parametry jednotlivých kabelových úseků a pak pro případ zadané měrné impedance na kilometr délky. Při zkoumání nejméně přesného určení (porucha č.2) bylo zjištěno, že se jedná o jediné vedení, které neobsahuje žádné úseky kabelů PILC a používaná přepočtová konstanta měrné reaktance nastavené v lokátoru je pro něj nízká. Naopak nejpřesněji určené místo zemního spojení vzniklo na kabelovém vedení, které poměrem délky úseků kabelů PILC vůči úsekům kabelů ostatních typů odpovídalo nejpřesněji množstevnímu poměru typů kabelů používaných na kabelových vedeních 22 kV. Stávající nastavení ochran při použití původního továrního nastavení nezajišťuje dostatečně přesnou lokalizaci poruchy typu jednofázové zemní spojení. Byly spočteny vhodnější nastavení parametrů zemních poměrů lokátoru v případě daných poruch. To je krokem ke zpřesnění funkce lokátorů na kabelových vedeních distribuční sítě, které povede k přesnější a tím i rychlejší lokalizaci poruch.

Pro možnost porovnání funkce lokátoru v případě zemního spojení a mezifázové poruchy byla vybrána porucha č.3, kde porucha přešla z jednofázové zemní poruchy do třífázového zkratu. Bylo možné sledovat zlepšení určení místa poruchy, kde z původní nepřesnosti 2 km bylo nově určeno místo pouze necelých 200 m od reálného místa poruchy (viz. ukázka tabulky 5-12).

Porucha č.	Vedení	typ poruchy	$I_{\text{celková}}$ (km)	RIS			$I_{\text{p-ochrana}}$ (km)	$I_{\text{p-skutečná}}$ (km)	Chyba lokátoru (km)
				1. řez	4. řez	15. řez			
				(km)	(km)	(km)			
3	VN 219	L3-E	6,547	0	4,1	5,9	4,1	6,082	1,982
		L1-L2-L3							0,182

Pro zajištění přesnější lokalizace poruchy by bylo nutno nastavení pro jednotlivá vedení průběžně aktualizovat na základě vyhodnocení jednotlivých poruch na těchto vedeních.

Poslední část práce byla vytvoření statistiky poruchovosti v oblasti Jižní Moravy z období dvou let (1.1.2017-1.1.2019). Z množství poruch v jednotlivých letech bylo zřejmé, že klimatické podmínky (především silné bouřky) v roce 2017 zvýšily množství poruch o polovinu vůči následujícímu roku 2018. Jednalo se především o poruchy způsobené stromy a popadanými větvemi. Z celkového počtu poruch tvořily kabelová vedení necelých 9,5 %. Při zkoumání poruchovosti konkrétně kabelových vedeních bylo zjištěno, že jejich poruchovost je stejná v obou letech, přibližně 150 poruch na rok.

Na kabelových vedeních byl nejčastěji poškozeným zařízením samotný kabel, kdy se ve většině případů jednalo o cizí zavinění, především při stavebních a výkopových pracích. Přibližně dvě třetiny všech kabelových poruch byly s poškozením.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] NIESER, T. *Lokalizace poruch kabelů v NN, SN a VN podzemních kabelových sítích*. BAUR ensuring the flow, 2013, 65 stran
- [2] ORSÁGOVÁ, J. *Rozvodná zařízení*. Brno, 2015, 179 stran
- [3] ZIEGLER, G. *Numerical distance protection: principles and application*. Gerhard Ziegler ; [editor, Siemens AG]. Munich: Publicis MCD, c1999. ISBN 38-957-8142-8.
- [4] *SIPROTEC 5 Overcurrent Protection 7SJ82/7SJ85: Manual* [online]. 5 ed. SIEMENS, 2018 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109742384/siprotec-5-7sj82-7sj85-overcurrent-protection-manual?dti=0&lc=en-WW>
- [5] *SIPROTEC Multi-Functional Protective Relay with Local Control 7SJ63: Instruction Manual* [online]. 4.2 ed., SIEMENS [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109743377/siprotec-4-7sj63-multi-functional-protective-relay-with-local-control?dti=0&lc=en-WW>
- [6] *SIPROTEC Fault Record Analysis SIGRA 4: Manual* [online]. 2 ed. Siemens, 2011 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: http://www.quad-industry.com/titan_img/ecatalog/SIGRA_MANUAL_A6_V0450_EN.pdf
- [7] HORÁK, Martin. *VYUŽITIE LOKÁTOROV PORÚCH IMPLEMENTOVANÝCH V DIGITÁLNYCH OCHRANÁCH VEDENÍ 22 kV* [usb]. In: . Tábor: Konferencie ČK CIRED 2014, s. 10 [cit. 2019-05-10].
- [8] *Silové kabelové soubory* [online]. TE Energy: TE Connectivity family of companies, 2015 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.te.com/content/dam/te-com/documents/energy/global/productdocuments/Miscellaneous%20Locations/energy-ep0500-SiloveKabeloveSoubory-czech.pdf>
- [9] Teplem smrštiteľné kabelové spojky. *ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku* [online]. FCC Public, 2002 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/teplem-smrstitelne-kabelove-spojky--14882>
- [10] PNE 34 1050. *Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky*. 2 ed., 2016.
- [11] *Energetické kabely: Medium Voltage Cables* [online]. nkt cables s.r.o., 2013 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Energeticke_kabely_CZ-EN_2013.pdf
- [12] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.