

LOKALIZÁCIA ZEMNÝCH SPOJENÍ V SIETI 22 KV POMOCOU RUČNÉHO MERACIEHO PRÍSTROJA

Problematika vyhľadávania miesta zemného spojenia bola v posledných rokoch spracovaná v mnohých prácach, avšak funkčnosť navrhovaných pevne inštalovaných systémov v prevádzke je prinajmenšom polemická a výsledky z reálnej prevádzky nie sú takmer vôbec publikované. Alternatívou k pevne inštalovaným systémom predstavuje ručný merací prístroj, ktorý pracovníkovi v teréne umožňuje určiť polohu poruchy vzhľadom na miesto merania. Obsahom príspevku je opis funkcie a možností ručného meracieho prístroja, ako aj výsledky namerané pri „lokalizovaní“ pokusných zemných spojení v sieti 22 kV.

Vyhľadávanie porúch v sieťach 22 kV

V rokoch 2009 – 2016 sa v spoločnosti Západoslovenská distribučná, a. s., nasadili dva systémy na vyhľadávanie porúch v sieťach 22 kV. V prvom rade ide o inteligentné diaľkovo ovládané úsekové odpínače. Ochrany, ktoré sú súčasťou týchto odpínačov, určia úsek vedenia, v ktorom sa nachádza porucha. Dispečer následne odpojí postihnutý úsek vedenia a obnoví dodávku v časti vedenia bez poruchy. Úseky, ktoré sú oddelené týmito odpínačmi, majú väčšinou dĺžku do cca 5 km. Ochrany sú schopné určiť miesto skratu aj zemného spojenia, avšak len s presnosťou na dĺžku úseku, t. j. cca 5 km.

V prípade medzifázového skratu má dispečer k dispozícii ďalší nástroj a tým sú lokátory porúch. Všetky digitálne ochrany vývodov 22 kV v okamihu vypnutia medzifázovej poruchy posielajú prostredníctvom SCADA hodnotu reaktancie medzi napájacou rozvodňou a miestom poruchy. Dispečer následne túto hodnotu zadá do aplikácie, ktorá je súčasťou systému GIS. Táto aplikácia vyznačí vypočítané miesto poruchy vrátane tolerancie graficky do mapových podkladov a dispečer posielá pracovníkov v teréne priamo na miesto poruchy. Z dlhodobej analýzy funkčnosti a presnosti tejto metódy je dokázané, že maximálna odchýlka je 0,2 Ω alebo 5 %. To znamená, že porucha vo vzdialenosti 10 km od napájacej rozvodne je určená s presnosťou cca ± 500 m a porucha vo vzdialenosti 20 km od napájacej rozvodne je určená s presnosťou cca $\pm 1\,000$ m. Táto presnosť je plne vyhovujúca, pretože skutočné miesto poruchy sa vo veľkej väčšine prípadov nachádza na dohľad od vypočítaného miesta poruchy.

V prípade zemných porúch je situácia zložitejšia. V rôznych príspevkoch a literatúre sa opisuje množstvo metód na vyhľadávanie presného miesta zemnej poruchy. Použitelnosť týchto metód je však veľmi polemická ako z pohľadu dosiahnuteľnej presnosti, tak z pohľadu extrémnej investičnej náročnosti. Informácie o praktických skúsenostiach, prípadne hromadnom nasadení v distribučných spoločnostiach a jeho reálnych výsledkoch nie sú publikované takmer vôbec. Preto bolo v Západoslovenskej distribučnej, a. s., prijaté rozhodnutie, že pri vyhľadávaní presného miesta zemnej poruchy sa pôjde cestou prenosných prístrojov. Prototyp tohto prístroja bol vyvinutý v spolupráci s firmou Elvac, ktorá v najbližšom období spustí sériovú výrobu.

Ak budú prenosné prístroje pridelené všetkým pracovníkom sieťového servisu, budú títo pracovníci pomocou celkového počtu cca 100 kusov prístrojov schopní na každom mieste siete 22 kV určiť relatívnu polohu miesta poruchy vzhľadom na miesto merania. Investičná náročnosť tohto riešenia predstavuje zlomok ceny, ktorú by vyžadovalo vybudovanie pevného systému na presné vyhľadávanie

zemných porúch. V prospech prenosného prístroja hovorí aj fakt, že pracovníci sieťového servisu sú pri vyhľadávaní miesta poruchy nenahraditeľní, miesto poruchy musia fyzicky určiť v teréne a poruchové miesto úsekovým odpínačom odčleniť od zdravého zvyšku siete. V podstate len cestou na miesto poruchy navyše vykonajú niekoľko meraní, a to zväčša na miestach ľahko prístupných vozidlom.

Merací prístroj LF7

Opis meracieho prístroja

Prístroj umožňuje na konkrétnom mieste merania určiť relatívnu polohu zemného spojenia, t. j. či sa meracie miesto nachádza v trase od napájacej rozvodne po miesto poruchy alebo mimo tejto trasy. Postupným meraním možno pomerne rýchlo zistiť miesto poruchy.

Zariadenie pracuje na princípe snímania elektrického a magnetického poľa pod vedením. Elektrické pole sa sníma pomocou kapacitnej väzby medzi meraným vedením a snímačom v prístroji, pričom



Obr. 1 Prístroj ELF7

druhý pól snímacieho zariadenia vyžaduje galvanické spojenie s telom obsluhy. Na to je na čelnom paneli prístroja konektor určený na pripojenie kontaktného náramku. Magnetické pole je merané pomocou indukčnej väzby a nevyžaduje žiadne špeciálne opatrenia. Základom meracieho prístroja je odolná plastová škatuľka s rozmermi cca 184 x 93 x 35,4 mm. Na hornej strane sú v plastovej ochrannnej fólii zabudované štyri hlavné veľké LED, jediné ovládacie tlačidlo, kontrolná LED nabíjania a štvorité LED zobrazovač stavu akumulátora. Na prednej strane je umiestnený komunikačný port USB a konektor na pripojenie kontaktného náramku.

Štyri hlavné LED diódy slúžia na signalizovanie aktuálneho stavu prístroja a výsledku merania. Jednotlivé LED (zľava) majú nasledujúci význam:

- zelená LED READY – prístroj je zapnutý, vedenie nad prístrojom je bez napätia alebo je v bezporuchovom stave,
- modrá LED RUN – došlo k zaznamenaniu zemného spojenia v meranej sieti a prebieha vyhodnocovanie jeho polohy,
- červená LED RESULT – bolo ukončené vyhodnocovanie polohy zemného spojenia, zemné spojenie sa nachádza za miestom merania (miesto merania je v trase medzi napájacou rozvodňou a miestom poruchy),
- žltá LED RESULT – bolo ukončené vyhodnocovanie polohy zemného spojenia, zemné spojenie sa nachádza pred miestom merania (miesto merania nie je v trase medzi napájacou rozvodňou a miestom poruchy).

Cez USB port možno prístroj pripojiť k PC s cieľom nastavenia parametrov algoritmu merania a sťahovania poruchových záznamov. Počas komunikácie s počítačom zelená LED READY bliká.

Opis merania na jednom mieste

V tejto časti je opísaný spôsob merania v sieťach 22 kV, v ktorých sa zemné spojenie dlhodobo neprevádzkuje. Teda meria sa na postihnutom úseku, odpojenom diaľkovo ovládaným odpínačom alebo vypínačom vývodu 22 kV od napájania. Prístroj možno využiť aj v sieťach, kde sa zemné spojenie dlhodobo prevádzkuje, týmto okolnostiam treba však prispôsobiť nastavenie prístroja.

Obsluha sa postaví do osi vedenia 22 kV na určenom mieste merania, najlepšie do stredy rozpätia vedenia. Výhodné je voliť miesta s jednoduchým prístupom. Do predného panelu meracieho prístroja sa do určenej zdievky pripojí kontaktný náramok. Ten si obsluha navlečie na ruku tak, aby bolo zabezpečené priame spojenie náramku s pokožkou (nie cez rukavice alebo oblečenie). Následne sa prístroj zapne dlhým stlačením tlačidla, pričom sa rozsvieti zelená LED READY. Prístroj sa uchopí do ruky (obr. 2) tak, aby jeho pozdĺžna os bola rovnobežná s osou vedenia a prístroj sa nachádzal približne vo výške očí. Nie je podstatné, či sa pozeráme smerom k napájacej rozvodni alebo od nej.



Obr. 2 Poloha prístroja ELF7 počas merania

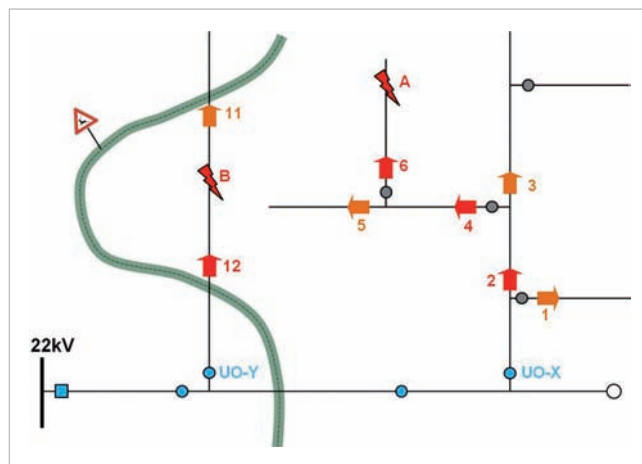
V tejto chvíli je prístroj pripravený zachytiť a vyhodnotiť zemné spojenie. Trvanie meracej procedúry možno v konfigurácii prístroja zmeniť a zabezpečiť jeho správne pôsobenie aj pri inom časovaní pripínania sekundárneho odporníka. Počas meracej procedúry prístroj sníma elektrické a magnetické pole pod vedením. Na základe hodnôt intenzity elektrického poľa a indukcie magnetického poľa sa vyhodnotí zodpovedajúca hodnota napätia U_0 a prúdu I_0 na danom mieste merania. Po ukončení meracej procedúry prístroj vyhodnotí relatívnu polohu miesta zemného spojenia.

Po ukončení meracej procedúry je uložený poruchový záznam, ktorý možno následne analyzovať.

Postup vyhľadávania zemného spojenia

Celkový postup vyhľadávania miesta zemného spojenia je vysvetlený na obr. 3. Predpokladáme vedenie 22 kV s niekoľkými odbočkami. Diaľkovo ovládané úsekové odpínače vybavené ochranou sú znázornené modrým krúžkom, bežné odpínače sú znázornené sivým krúžkom. V prípade poruchy na mieste A na rozvetvenej odbočke je dispečerovi signalizované zemné spojenie za úsekovým odpínačom UO-X. Tento úsekový odpínač dispečer vypne a posle pracovníkov sieťového servisu do terénu. Pracovníci sieťového servisu získavajú postupným meraním na miestach 1 – 6 informáciu o relatívnej polohe vzhľadom na miesto zemného spojenia. Červená šípka znamená, že výsledkom merania je rozsvietenie červenej LED RESULT na prístroji ELF7. Žltá šípka znamená, že výsledkom merania je rozsvietenie žltej LED RESULT na prístroji ELF7. Pri každom meraní sa na nevyhnutný krátky čas zapína úsekový odpínač UV-X. Pokiaľ sú obaja pracovníci, „dvojčky“ sieťového servisu vybavení prístrojom ELF7, je miesto zemného spojenia v tomto prípade nájdene pri troch zapínaníach úsekového odpínača UV-X, pretože vždy dve merania sa vykonávajú v rovnakom čase.

V prípade poruchy na mieste B na dlhom úseku v neprístupnom teréne vykonávajú pracovníci sieťového servisu meranie s prístrojom ELF7 na miestach s jednoduchším prístupom, napríklad na mieste križovania vedenia z cestou. Na základe signalizácie prístroja je určený len relatívne krátky úsek, na ktorom sa nachádza porucha, čím sa dosiahne výrazné zníženie nutnosti prekonávať ťažký terén.



Obr. 3 Príklad postupu vyhľadávania poruchy

Teória určenia miesta poruchy

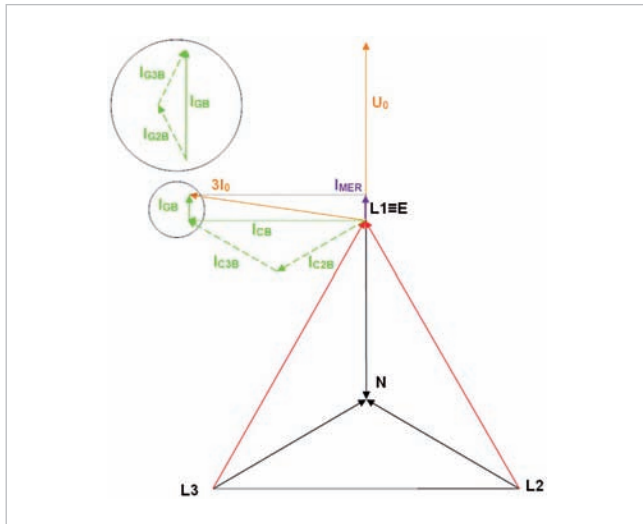
Aby sme pochopili možnosti lokalizovania miesta zemného spojenia pomocou prístroja založeného na snímaní elektrického a magnetického poľa, treba v prvom rade podrobne preskúmať napäťové a prúdové pomery na jednotlivých miestach siete 22 kV. Je dôležité poznať, aké je rozloženie a veľkosť nulovej zložky napätia, z akých zložiek sa skladá netočivá zložka prúdu na miestach medzi napájacou rozvodňou a miestom zemného spojenia a z akých zložiek sa skladá netočivá zložka prúdu na miestach, ktoré sa nenachádzajú medzi napájacou rozvodňou a miestom zemného spojenia. Následne treba preskúmať, akým spôsobom sa napäťová nesymetria, ktorá vznikne v sieti 22 kV pri zemnom spojení, prejaví na deformácii elektrického poľa a na jeho časovom priebehu, pretože

prístroj si z merania veľkosti elektrického poľa vytvára určitý obraz o netočivej zložke napätia v sieti.

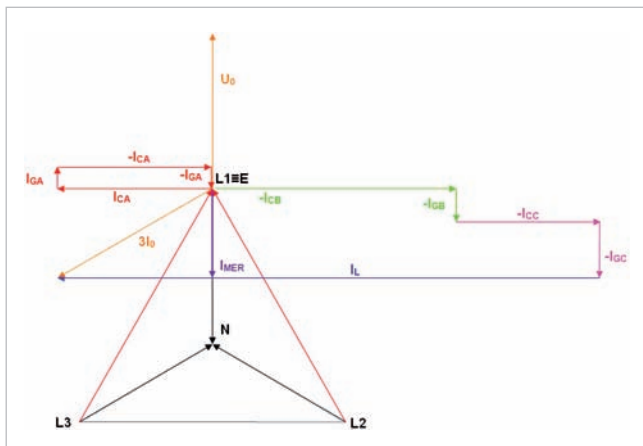
Tiež treba preskúmať, aké magnetické pole vytvárajú jednotlivé fázy vedenia 22 kV, ktorými tečie určitý definovaný prúd, pretože prístroj si z merania veľkosti magnetického poľa vytvára určitý obraz o netočivej zložke prúdu na danom mieste siete.

Napäťové a prúdové pomery pri zemnom spojení

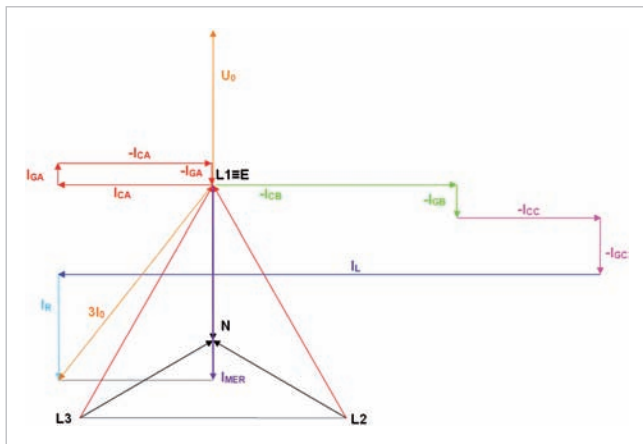
Napäťové a prúdové pomery na jednotlivých miestach siete 22 kV pri zemnom spojení sú podrobne opísané v rôznej literatúre, napríklad [1]. Merací prístroj ELF7 vyhodnocuje len zložku prúdu, ktorá je rovnobežná s netočivou zložkou napätia U_0 . Túto zložku prúdu



Obr. 4 Prúd meraný prístrojom na mieste neležiacom medzi rozvodňou a poruchou



Obr. 5 Prúd meraný prístrojom na mieste ležiacom medzi rozvodňou a poruchou



Obr. 6 Prúd meraný prístrojom na mieste ležiacom medzi rozvodňou a poruchou + odporník

označíme I_{MER} . Predpokladáme zemné spojenie vo fáze L1. Veľkosť netočivej zložky prúdu na miestach, ktoré sa nenachádzajú medzi napájacou rozvodňou a miestom poruchy, je odvodená na obr. 4. Zdravými fázami L2 a L3 dokopy tečie kapacitný a konduktančný prúd časti vedenia od miesta merania ďalej smerom od napájacej rozvodne, označený I_{CB} a I_{GB} . Postihnutou fázou L1 prúd netečie (uvažujeme nezaťažený vývod a vykompenzovanú sieť). Kapacitný prúd je kolmý na napätie U_0 a prístroj ho teda neberie do úvahy. Výsledný prúd meraný prístrojom I_{MER} bude v tomto prípade rovný konduktančnému prúdu I_{GB} časti vedenia od miesta merania ďalej smerom od napájacej rozvodne.

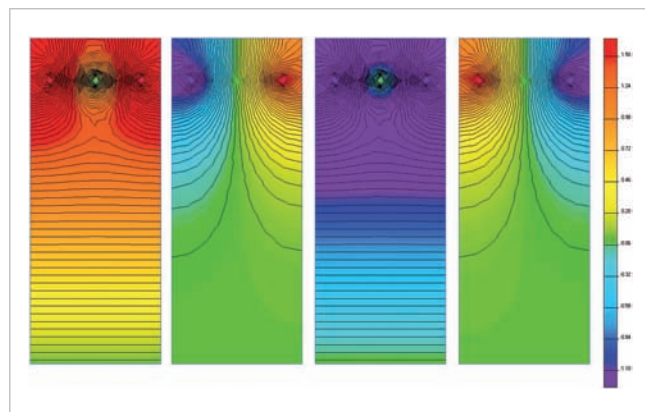
Veľkosť netočivej zložky prúdu na miestach, ktoré sa nachádzajú medzi napájacou rozvodňou a miestom poruchy, je odvodená na obr. 5. Zdravými fázami L2 a L3 dokopy tečie kapacitný a konduktančný prúd časti vedenia od miesta merania ďalej smerom od napájacej rozvodne, označený I_{CA} a I_{GA} . Postihnutou fázou L1 tečie súčet kapacitných prúdov celej siete, súčet konduktančných prúdov celej siete a kompenzačný prúd tlmivky. Všetky kapacitné prúdy a kompenzačný prúd sú kolmé na napätie U_0 , preto prístroj tieto prúdy neberie do úvahy. Výsledný prúd meraný prístrojom I_{MER} bude v tomto prípade rovný konduktančnému prúdu celej siete I_G a zmenšený o konduktančný prúd časti vedenia od miesta merania ďalej smerom od napájacej rozvodne I_{GA} . V čase pripnutia odporníka začne navyše postihnutou fázou L1 tiecť prúd vnútený sekundárnym odporníkom I_R , ktorý je rovnobežný s napätím U_0 . Výsledný prúd meraný prístrojom I_{MER} sa po pripnutí odporníka zväčší o prúd vnútený sekundárnym odporníkom I_R . Situáciu v tomto prípade dokumentuje obr. 6.

Konduktančný prúd jednotlivých úsekov siete dosahuje rádovo jednotky ampérov. Celkový konduktančný prúd siete dosahuje v sieťach 22 kV prevádzkovaných Západoslovenskou distribučnou, a. s., približne 2 – 3 % celkového kapacitného prúdu danej siete. Hodnoty odporu sekundárných odporníkov sú nastavené tak, aby prúd odporníka dosahoval cca 37 A. Porovnaním jednotlivých situácií je zrejmé, že prúd meraný prístrojom I_{MER} na miestach medzi napájacou rozvodňou a miestom zemného spojenia bude minimálne o jeden rád väčší oproti meraniu na miestach, ktoré sa nenachádzajú medzi napájacou rozvodňou a miestom zemného spojenia. Spoľahlivosť danej metódy určovania miesta zemného spojenia je preto dostatočne vysoká aj napriek faktu, že vyhodnocovanie jednotlivých elektrických veličín sa vykonáva meraním elektrického a magnetického poľa pod vedením.

Elektrické pole v okolí vedenia 22 kV

Výpočet intenzity elektrického poľa pod vedením 22 kV je pomocou analytických metód relatívne zložitý a neumožňuje vytvoriť celkový vizuálny obraz o jeho priestorovom rozložení. Preto bolo elektrické pole analyzované pomocou výpočtového softvéru QuickField Student Edition 6.0. Vyhodnocovala sa najmä vertikálna zložka intenzity elektrického poľa v osi vedenia v priestore medzi zemou a umiestnením napäťovej sondy (cca 1,5 m).

Príklad výpočtu elektrického poľa v okolí vedenia 22 kV je na obr. 7. Jednotlivé stavy zobrazujú elektrické pole v štyroch rôznych



Obr. 7 Jednoduché vedenie 22 kV – postihnutá fáza v prostrednej pozícii

časových rezoch pri otočení fázového diagramu napätí o 0°, 90°, 180° a 270°. Zobrazené sú ekvipotenciály s krokom 500 V, farebná škála zobrazuje napätie v 10⁴ V.

Prepočítalo sa množstvo typov vedení a kombinácií usporiadania vodičov. Výsledky výpočtov dávajú prehľad o rozptyle hodnôt amplitúd a časovom priebehu intenzity elektrického poľa. Na základe týchto výsledkov boli nastavené zosilnenia a softvérové parametre merania elektrického poľa tak, aby bol prístroj ELF7 schopný za každých okolností správne vyhodnotiť miesto zemného spojenia pri všetkých bežne používaných typoch vedení. Vypočítané údaje sa porovnávali aj s výsledkami meraní pri experimentálnych zemných spojeniach, čím bola overená správnosť výpočtového postupu.

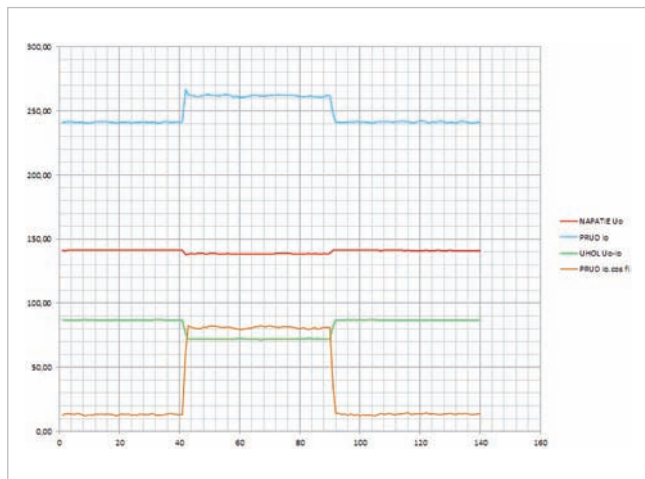
Magnetické pole v okolí vedenia 22 kV

Výpočet magnetickej indukcie v okolí vedenia 22 kV je veľmi jednoducho vykonateľný analytickými metódami. V programe Excel bolo prepočítané magnetické pole pre množstvo typov vedení a kombinácií usporiadania vodičov. Na základe týchto výsledkov boli nastavené zosilnenia a softvérové parametre merania magnetického poľa.

Experimentálne meranie zemných spojení

Aby sa overila funkčnosť prístroja ELF7, vykonalo sa niekoľko desiatok meraní v podmienkach experimentálneho zemného spojenia v reálnej sieti 22 kV. Jednotlivé merania sa vykonávali tak, aby pokryli čo najviac situácií, ktoré sa v reálnej prevádzke môžu vyskytnúť, a boli zamerané najmä na:

- meranie na rôznych typoch vedení s rôznym usporiadaním fázových vodičov,



Obr. 8 Príklad poruchového záznamu – výsledkom je signalizácia červenej LED RESULT



Obr. 9 Príklad poruchového záznamu – výsledkom je signalizácia žltej LED RESULT

- meranie pri kovovom zemnom spojení aj pri odporovom zemnom spojení,
- meranie na dvojitém vedení 22 kV,
- meranie v blízkosti vedenia 110 kV,
- meranie v blízkosti križovania vedení 22 kV,
- meranie v blízkosti cudzích vodivých uzemnených predmetov veľkých rozmerov,
- meranie v tesnej blízkosti zemného spojenia (smerom k rozvodni aj smerom od nej),
- meranie pri rozladenej zhášačkej tlmivke.

Na obr. 8 je príklad poruchového záznamu nameraného na mieste nachádzajúcom sa medzi napájacou rozvodňou a miestom zemného spojenia. Na obr. 9 je príklad poruchového záznamu nameraného na mieste nenachádzajúcom sa medzi napájacou rozvodňou a miestom zemného spojenia.

Všetky merania vykonané pomocou prístroja ELF7 určili relatívnu polohu miesta poruchy SPRÁVNE. Pomocou analýzy poruchových záznamov výsledkov meraní pri experimentálnych zemných spojeniach boli nastavené parametre prístroja ELF7 tak, aby správne vyhodnocoval relatívnu polohu miesta zemného spojenia vo všetkých situáciách, s ktorými možno v prevádzke uvažovať.

Prínosy prístroja

Za podstatné prínosy prenosného meracieho prístroja ELF7 možno považovať najmä skrátenie času potrebného na vyhľadanie miesta zemného spojenia, zníženie času nedodávky elektrickej energie pri zemných poruchách a zníženie počtu manipulácií pri vyhľadávaní. Tým sa zníži aj počet prechodných dejov pri vzniku zemných spojení, čo je jav, pri ktorom sú izolačné systémy najviac napätovo namáhané.

Dôležitým aspektom je skutočnosť, že pri bežnom vyhľadávaní miesta zemného spojenia manipuláciou s úsekovými odpínačmi často dôjde k vypnutiu nesprávneho úseku. Pri skúšobnom zapnutí následne dochádza k vzniku zemného spojenia v sieti, ktorá nie je správne vykompenzovaná. Miestom poruchy tečie navyše kapacitný prúd vypnutého úseku, čo môže pri odpojení dlhších káblových úsekov predstavovať bezpečnostné riziko. Použitie prístroja ELF7 úplne eliminuje možnosť vzniku takýchto udalostí.

Ing. Martin Horák, PhD.

V roku 2004 ukončil štúdium na fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, odbor výroba a rozvod elektrickej energie. V rokoch 2003 – 2006 bol zamestnaný ako technik ochrán v spoločnosti LiV Elektra, a. s. Od roku 2006 pracuje ako technik technického rozvoja v spoločnosti Západoslovenská distribučná, a. s. V súčasnosti sa venuje nasadzovaniu nových technických riešení v oblasti prevádzky distribučných sietí VN, elektrických ochrán, lokalizácie porúch a kompenzácie uzla VN.



Literatúra

- [1] HORÁK, Martin: Systémy chránenia a automatizácie distribučných elektrických sietí 22 kV. Banská Bystrica: PRO 2012. 128 s.
- [2] Firemná dokumentácia ELVAC

ON-LINE | Celý článok nájdete v online vydaní tohto čísla na www.atpjournalsk/25557

Martin Horák

Západoslovenská distribučná, a. s.
martin.horak@zsdisk.sk