Elektrický oblúk počas poruchy napájacieho systému nie je čistý odpor. Prečo obsahuje „indukčnosť“?

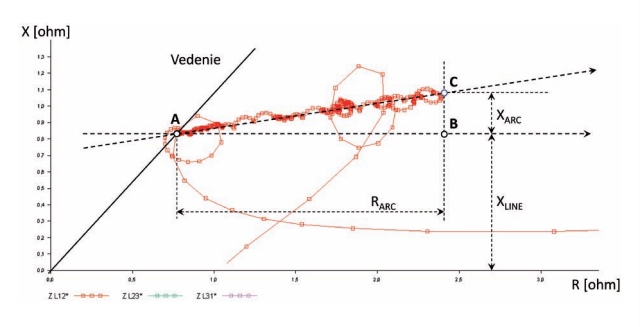
Na vyhľadávanie porúch na elektrických vedeniach sa používajú lokátory porúch, ktoré pracujú na princípe merania impedancie poruchovej slučky. Z impedancie poruchovej slučky je následne extrahovaná jej imaginárna časť – reaktancia. Táto hodnota by mala byť úmerná vzdialenosti poruchy od napájacej rozvodne. Pritom sa predpokladá, že elektrický oblúk v mieste poruchy (väčšina porúch na elektrických vedeniach sú oblúkové poruchy) je čisto odporového charakteru a jeho parametre nemajú vplyv na celkovú hodnotu reaktancie. Dlhodobým výskumom porúch na VN vedeniach bolo zistené, že tento predpoklad nie je správny. Vlastnosti elektrického oblúka v mieste poruchy ovplyvňujú hodnotu reaktancie vypočítanú elektrickou ochranou a môžu vnášať zásadnú chybu do výpočtu miesta poruchy.

Článok obsahuje teoretické vysvetlenie príčin vzniku tohto javu a uvádza výsledky merania tohto javu uskutočneného na reálnom elektrickom vedení VN za plnej prevádzky. Navrhuje aj úpravu výpočtových algoritmov lokátorov porúch, ktoré eliminujú nepriaznivý vplyv vlastností elektrického oblúka v mieste poruchy na presnosť výpočtu vzdialenosti poruchy od napájacej rozvodne.

Definovanie problému

V spoločnosti Západoslovenská distribučná, a. s., sú všetky VN vedenia prevádzkované ako radiálne. Všetky ochranné terminály VN vývodov sú vybavené lokátormi porúch, ktoré v prípade vzniku medzifázového skratu vypočítajú elektrickú vzdialenosť poruchy od napájacej rozvodne, t. j. reaktanciu medzi napájacou rozvodňou a miestom poruchy. VN vedenia sú heterogénne, pomerná reaktancia jednotlivých úsekov vedenia je rôzna (kábel – vzduch, rôzny typ vodičov, rôzne usporiadanie vodičov). Preto sa používa aplikácia v systéme GIS, ktorá prepočíta celkovú reaktanciu poruchovej slučky na konkrétne miesto v teréne. Dispečer má okamžite po vzniku medzifázovej poruchy k dispozícii graficky vyznačené miesto poruchy do mapového podkladu. Pracovníkov sieťového servisu posiela do terénu priamo na miesto poruchy, takže poruchu možno zvyčajne okamžite po príchode na určené miesto nájsť. Využitím tohto systému sa dosahuje signifikantné zníženie indexu SAIDI.

Dlhodobou analýzou pôsobenia lokátorov porúch na VN vedeniach (10 rokov prevádzky, stovky analyzovaných porúch) sa zistilo, že oblúkové skraty sú lokátormi porúch vyhodnocované nesprávne. Priebeh typického medzifázového skratu na VN vedení zaznamenaný poruchovým zapisovačom ochrany v rovine R – X je na obr. 1. Externým mechanickým impulzom (akým je napr. pád stromu na vedenie) dôjde k priblíženiu dvoch fázových vodičov a vzniká kovový skrat – ochrana vidí impedanciu v bode A, ktorý leží na priamke



Obr. 1 Trajektória impedancie videnej ochranou – skutočná porucha

impedančnej charakteristiky vedenia. Následne sa vodiče vracajú do svojej pôvodnej pozície, ich vzájomná vzdialenosť sa zväčšuje a dochádza k vytvoreniu elektrického oblúka. Elektrický oblúk sa vplyvom Lorentzovej sily, pôsobením tepelných javov a prúdením vzduchu predlžuje.

V odbornej literatúre (napr. Siemens) sa charakter elektrického oblúka považuje za čisto odporový. Táto skutočnosť sa vo väčšine dostupnej literatúry považuje za axiómu a je uvádzaná bez ďalšieho dokazovania, maximálne sa odkazuje na súčasný zerocross (prechod nulou) priebehu prúdu a priebehu úbytku napätia na elektrickom oblúku. Impedancia videná elektrickou ochranou počas nárastu elektrického oblúka by sa teoreticky mala pohybovať rovnobežne s osou R smerom do bodu B. Reaktancia videná ochranou by mala byť konštantná počas trvania poruchy (porucha je stále na tom istom mieste). Tu však dochádza k rozporu medzi teóriou a pozorovaním. V skutočnosti sa impedancia videná ochranou pohybuje smerom do bodu C po priamke so sklonom približne 0,14. Narastá nielen hodnota odporu elektrického oblúka, ale proporčne aj hodnota reaktancie videná ochranou. V okamihu vypnutia skratu ochrana vypočíta celkovú reaktanciu, ktorá sa líši od správnej reaktancie o hodnotu $X_{ARC} \approx 0{,}14 \times R_{ARC}$. Pri elektricky vzdialených poruchách pôsobia nadprúdové ochrany s dlhším časovým oneskorením (v našom prípade 0,5 s). Elektrický oblúk má dostatok času sa rozvinutie, dosahuje hodnotu odporu niekoľko ohmov a chyba lokátora môže dosiahnuť hodnotu niekoľko kilometrov.

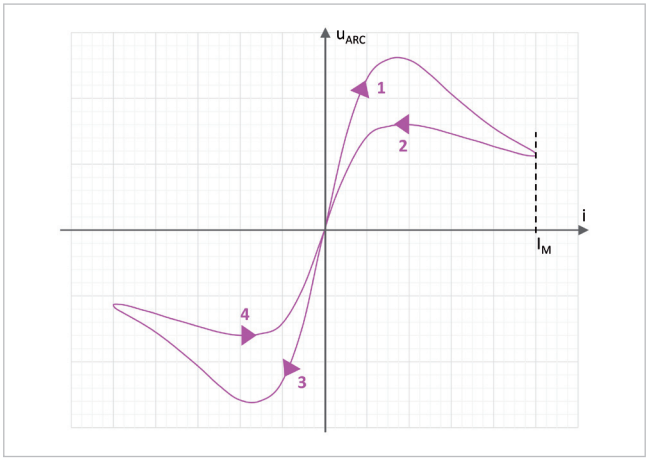
Opisovaná chyba lokátorov porúch nesúvisí s dobre známou chybou spôsobenou príspevkom skratového prúdu z opačného konca vedenia pri obojstrannom napájaní a nenulovom prenosovom uhle. Chyba sa prejavuje aj za nasledujúcich okolností:

- elektrické vedenie je prevádzkované radiálne (bez prívodu výkonu z konca elektrického vedenia),
- pozdĺž elektrického vedenia nie je žiadny významný prívod výkonu,
- pozdĺž elektrického vedenia nie je žiadne významné zaťaženie.

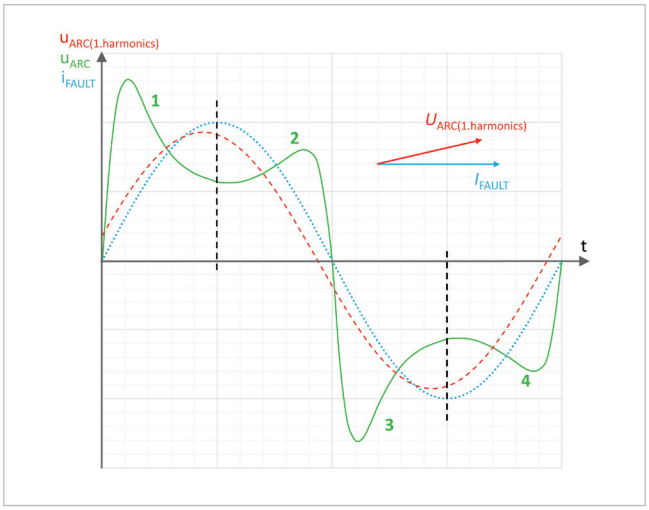
Uvedená chyba je spôsobená principiálnou, málo známou vlastnosťou elektrického oblúka a nesprávnym vyhodnotením tejto vlastnosti bežnými impedančnými ochranami.

Teoretický rozbor problému

Kľúčom k riešeniu problému je V-A charakteristika elektrického oblúka pri prechode striedavého prúdu sínusového tvaru (obr. 2a). Krivka 1 predstavuje úbytok napätia $u_{ARC}(i)$ na elektrickom oblúku voľne horiacom vo vzduchu pri náraste okamžitej hodnoty skratového prúdu v prvej štvrtine periódy až po dosiahnutie maxima prúdu v danej polperióde I_M. Pri následnom znižovaní okamžitej



Obr. 2a V-A charakteristika oblúka



Obr. 2b Časový priebeh elektrických veličín

hodnoty prúdu v druhej štvrtine periódy bude úbytok napätia prebiehať po krivke 2, odlišnej od krivky 1. Úbytok napätia uARC(i) bude nižší ako v prvej štvrtine periódy. Dôvodom je, že pri rýchlom zmenšovaní prúdu sa nestíhajú dostatočne rýchlo meniť podstatné parametre elektrického oblúka (prierez kanála, teplota, stupeň ionizácie) a prejavuje sa určitá hysteréza týchto parametrov. Rovnaká situácia nastáva aj v zápornej polperióde priebehu skratového prúdu (krivka 3 a krivka 4).

Aplikovaním nelineárnej V-A charakteristiky s hysteréznymi vlastnosťami na sínusový priebeh prúdu (modrá) získavame časový priebeh úbytku napätia na elektrickom oblúku (obr. 2b). Priebeh úbytku napätia (zelená) je nesínusový a obsahuje nepárne vyššie harmonické.

Lokátory porúch pracujú zvyčajne na princípe merania fázorov prúdu a napätia základnej frekvencie. Fázor základnej harmonickej úbytku napätia na elektrickom oblúku sa počíta z nameraných okamžitých hodnôt použitím Fourierovej transformácie. Fázový posun úbytku napätia na elektrickom oblúku voči fázoru skratového prúdu vypočítame podľa:

$$\theta_1 = arctan\left(\frac{a_1}{b_1}\right)$$

kde

$$a_1 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t).\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)dt$$

$$b_1 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t).\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)dt$$

Pozrime sa bližšie na kosínusový člen a_1. Keďže na obr. 2b sú plochy pod krivkami 1 a 3 väčšie ako plochy pod krivkami 2 a 4,

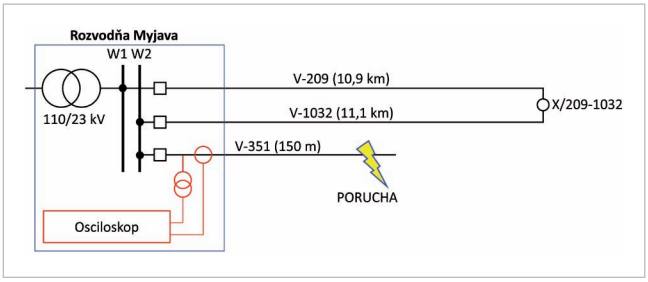
tento kosínusový člen bude nenulový. Výsledkom je nenulový fázový posun fázora úbytku napätia (červená) voči fázoru prúdu. Pri výpočte impedancie sa objaví zdanlivá indukčnosť elektrického oblúka a dochádza k chybnému výpočtu elektrickej vzdialenosti poruchy od napájacej rozvodne. Toto teoretické odvodenie je plne v korelácii s pozorovaním daného javu pri reálnych poruchách.

Overenie teórie meraním

Aby sa potvrdila teória, vykonalo sa meranie na umelo vytvorenom medzifázovom oblúkovom skrate v reálnej 22 kV sieti za plnej prevádzky v podmienkach spoločnosti Západoslovenská distribučná, a. s.

Zapojenie siete počas skúšok

Pri skúškach bolo potrebné dosiahnuť čo najdlhší čas trvania poruchy, aby sa mohol elektrický oblúk plne rozvinúť a aby sa plne prejavil opisovaný jav. Z toho dôvodu bolo potrebné, aby bola impedancia vedenia medzi napájacou rozvodňou a miestom poruchy pomerne vysoká, aby bol skratový prúd nižší ako nastavenie druhého stupňa nadprúdovej ochrany (čas pôsobenia 50 ms) a aby bola porucha vypnutá až prvým stupňom nadprúdovej ochrany (čas pôsobenia 500 ms). To sa dosiahlo zapojením siete 22 kV počas merania podľa obr. 3. Celková trasa poruchového prúdu bola nasledujúca: transformátor 110/23 kV, napájacia rozvodňa Myjava prípojnica W1, vedenie V-209 s dĺžkou 10,9 km, zapnutý spínač X/209-1032, vedenie V-1032 s dĺžkou 11,1 km, rozvodňa Myjava prípojnica W2, vedenie V-351 s dĺžkou 150 m, medzifázová porucha L1-L2. Vedenie V-351 bolo v stave naprázdno, bez pripojenej záťaže. Týmto neštandardným zapojením sa dosiahla elektrická vzdialenosť poruchy od napájacej rozvodne 22 150 m (obmedzenie skratového prúdu na hodnotu cca 800 A), pričom fyzická vzdialenosť poruchy od rozvodne bola iba 150 m.



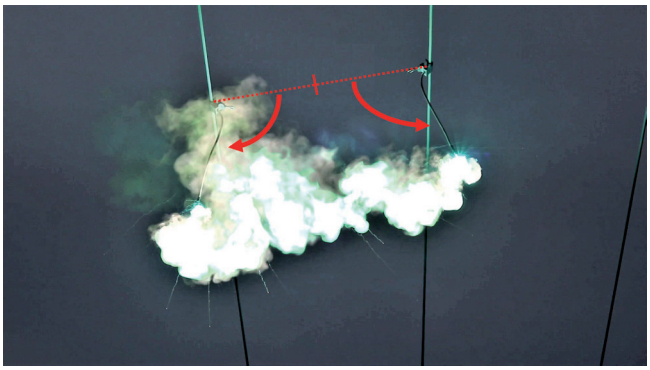
Obr. 3 Zapojenie siete počas skúšok

Zapojenie meracích prístrojov

Osciloskop Picoscope 5444D bol zapojený do sekundárnych obvodov ochranného terminálu vedenia V-351. Medzi miestom merania a simulovanou poruchou bolo len zanedbateľných 150 m vedenia 22 kV. Osciloskop teda meral elektrické veličiny takmer totožné s elektrickými veličinami v mieste poruchy. Prvé dva kanály osciloskopu merali fázové napätie dvoch postihnutých fáz. Rozdiel týchto dvoch napätí zodpovedal napätiu na vzniknutom elektrickom oblúku. Tretí kanál osciloskopu meral prúd vo fáze L1, zodpovedajúci skratovému prúdu tečúcemu elektrickým oblúkom.

Vytvorenie poruchy

Spôsob vytvorenia umelého medzifázového oblúkového skratu L1-L2 je na obr. 4. K obom fázovým vodičom vzdušného vedenia boli pevne pripojené skratovacie vodiče veľkého prierezu s dĺžkou rovnou polovici vzájomnej vzdialenosti fázových vodičov. Konce skratovacích vodičov boli spojené krátkou spojkou malého prierezu. Po zapnutí výkonového vypínača vedenia V-351 došlo k nábehu skratového prúdu, ktorý takmer okamžite spôsobil vyparenie spojky skratovacích vodičov. Následne dochádza vplyvom vlastnej hmotnosti k pohybu skratovacích vodičov, predlžovaniu vzdialenosti ich koncov a postupnému rozvinutiu dlhého elektrického oblúka. Prvý stupeň nadprúdovej ochrany vypol výkonový vypínač vedenia V-351 v okamihu, keď sa oba konce skratovacích vodičov nachádzali približne pod príslušnými fázovými vodičmi vedenia 22 kV. Práve tento okamih je znázornený na obr. 4.



Obr. 4 Umelo vytvorený medzifázový skrat

Výsledky merania

Na obr. 5 sú uvedené namerané V-A charakteristiky oblúka. Jednotlivé charakteristiky rôznych farieb od červenej po fialovú zodpovedajú jednotlivým periódam priebehu skratového prúdu v rôznych fázach rozvinutia elektrického oblúka. Z obrázka je zrejmé, že úbytok napätia narastá vplyvom postupného zväčšovania dĺžky elektrického oblúka. Pritom v jednotlivých polperiódach platí, že pri náraste prúdu je úbytok napätia na elektrickom oblúku vyšší ako pri jeho poklese – prejavuje sa hysteréza.

Na obr. 6 sú uvedené namerané časové priebehy úbytku napätia na elektrickom oblúku zodpovedajúce jednotlivým periódam priebehu skratového prúdu v rôznych fázach rozvinutia elektrického oblúka. Z obrázka je zrejmé, že v 1. a 3. štvrťperióde je úbytok napätia väčší ako v 2. a 4. štvrťperióde. Práve tento fakt spôsobuje, že kosínusový člen a1 pre základnú harmonickú priebehu úbytku napätia na elektrickom oblúku je nenulový. Väčšina elektrických ochrán využívajúcich princíp merania fázorov prúdu a napätia základnej frekvencie vyhodnotí z tohto priebehu nenulový fázový posun medzi úbytkom napätia a prúdom elektrického oblúka. Elektrický oblúk sa nejaví ako čistý odpor. V jeho impedancii sa objaví zdanlivá indukčnosť, ktorá narastá proporčne s narastajúcim odporom (dĺžkou) elektrického oblúka.

Fázový posun v rozsahu približne 0,12 ÷ 0,14 je dlhodobo pozorovaný pri skratoch v skutočnej prevádzke. Výsledky merania umelo vytvoreného medzifázového oblúkového skratu v reálnej sieti 22 kV plne potvrdzujú teóriu uvedenú v predošlej stati.

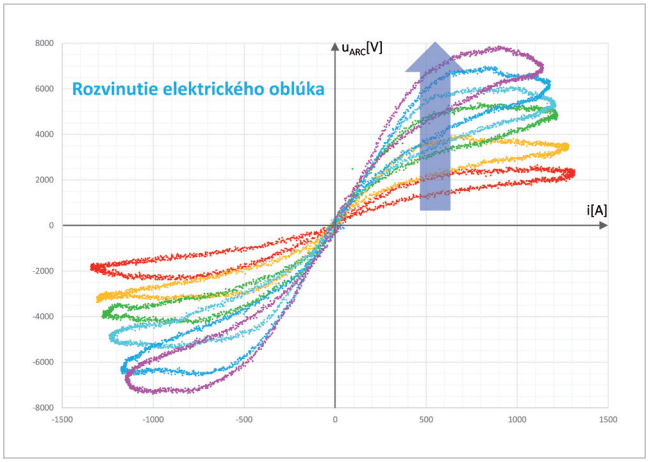
Možnosti vylepšenia algoritmov lokátorov porúch

Lokátory porúch pre elektrické vedenia VN

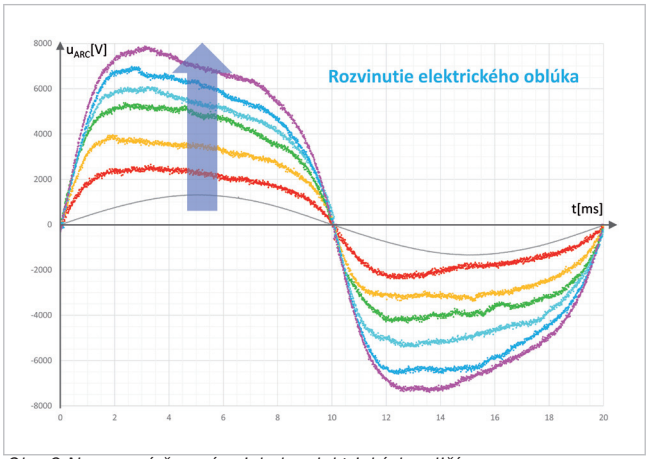
Elektrické vedenia VN sa vyznačujú týmito vlastnosťami:

- nižšia preskoková vzdialenosť,
- vyšší čas pôsobenia nadprúdovej ochrany,
- premenlivý pomer parametrov R/X pozdĺž vedenia.

Z dôvodu kratšej preskokovej vzdialenosti vznikajú poruchy na vedeniach VN zvyčajne až po vzájomnom priblížení fázových vodičov. Nastáva preskok na veľmi krátku vzdialenosť a porucha sa spočiatku javí takmer ako kovová. Dlhšie časové oneskorenie pôsobenia



Obr. 5 Namerané V-A charakteristiky oblúka



Obr. 6 Namerané časové priebehy elektrických veličín

červená čiara	0,130
oranžová čiara	0,136
zelené čiara	0,133
azúrov čiara	0,144
modrá čiara	0,132
purpurová čiara	0,123

Tab. 1 Fázový posun v radiánoch pre jednotlivé zobrazené periódy (viď obr. 5 a 6)

nadprúdovej ochrany na vedeniach VN umožňuje elektrickému oblúku jeho postupné rozvinutie do veľkej dĺžky. Práve možnosť sledovať trajektóriu impedancie v rovine R – X zaznamenanú poruchovým zapisovačom nám umožnilo odhaliť, že s narastajúcim odporom elektrického oblúka proporčne narastá aj jeho reaktancia.

Pretože porucha v čase vzniku (po odznení prechodného javu) je takmer kovového charakteru, ochrana vidí elektrickú vzdialenosť poruchy správne. S narastajúcim odporom elektrického oblúka narastá aj jeho zdanlivá indukčnosť a ochrana vidí poruchu ďalej, ako sa v skutočnosti nachádza. Výpočet elektrickej vzdialenosti prebieha po dočasovaní nadprúdovej ochrany, v okamihu vyslania vypínacieho impulzu. V tomto čase ochrana vidí impedanciu v bode C (obr. 1), pričom chyba spôsobená elektrickým oblúkom je maximálna.

Na vedeniach VN je eliminácia chyby lokalizovania poruchy jednoduchá. Výpočet elektrickej vzdialenosti by mal prebiehať v začiatočnom štádiu poruchy, po odznení prechodného javu, keď elektrický oblúk ešte nie je rozvinutý. V tomto čase vidí ochrana impedanciu v bode A (obr. 1), pričom chyba spôsobená elektrickým oblúkom je minimálna.

Samozrejme, nie úplne všetky poruchy na vedeniach VN prebiehajú podľa opísaného scenára. Môžu sa vyskytovať výnimky, keď

impedancia z rôznych dôvodov prebieha po odlišnej trajektórii. Dlhodobá analýza však ukazuje, že navrhnuté riešenie by výrazne znížilo chyby lokalizácie porúch na tejto napäťovej úrovni.

Lokátory porúch pre elektrické vedenia VVN a ZVN

Elektrické vedenia veľmi vysokého napätia (VVN) a zvlášť vysokého napätia (ZVN) sa vyznačujú týmito vlastnosťami:

- vyššia preskoková vzdialenosť,
- okamžité pôsobenie dištančnej ochrany,
- konštantný pomer parametrov R/X pozdĺž vedenia.

Dištančné ochrany a lokátory porúch sa používajú najmä na VVN a ZVN vedeniach, avšak tu je situácia zásadne odlišná ako pri VN vedeniach. Z dôvodu vyššej preskokovej vzdialenosti porucha vzniká už ako oblúková porucha (napríklad preskok izolátora). Dištančné ochrany na vedeniach VVN (ZVN) zároveň pôsobia takmer okamžite. Dĺžka a charakter oblúka sa počas tejto krátkej doby takmer nemení, impedancia videná ochranou v rovine R – X (obr. 1) leží v bode C a takmer sa nepohybuje, preto nie je ľahké pozorovať zdanlivú indukčnosť elektrického oblúka. Hodnota reaktancie v bode C však nezodpovedá skutočnej reaktancii medzi napájacou rozvodňou a poruchou.

VVN a ZVN vedenia sú zvyčajne homogénne a po celej dĺžke majú parametre konštantné, najmä parameter R/X. Charakteristika týchto vedení je priamková. Elimináciu chyby spôsobenej zdanlivou indukčnosťou elektrického oblúka možno v tomto prípade dosiahnuť výpočtom prieniku charakteristiky vedenia a charakteristiky elektrického oblúka. Na obr. 1 je táto hodnota reprezentovaná bodom A. Reaktancia v bode A presnejšie zodpovedá skutočnej elektrickej vzdialenosti poruchy ako reaktancia v bode C.

Sklon charakteristiky elektrického oblúka sa bude pravdepodobne líšiť od hodnoty 0,14 dlhodobo pozorovanej pri poruchách na VN vedeniach. Presnejšie určenie sklonu tejto charakteristiky je predmetom nášho výskumu prebiehajúceho v súčasnosti. Treba si uvedomiť, že nepresnosť výpočtu reaktancie poruchy má zásadný vplyv aj na funkciu samotných dištančných ochrán. Poruchu možno vplyvom elektrického oblúka vidieť ďalej, ako sa v skutočnosti nachádza. Niektoré poruchy nie sú vypnuté v zóne Z1, aj keď sa v tejto zóne nachádzajú. Veľkosť tejto chyby je taktiež predmetom prebiehajúceho výskumu.

Ing. Martin Horák, PhD.

Narodil sa v roku 1979. V roku 2012 získal titul PhD. na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave. Od roku 2006 pracuje ako manažér špeciálnych projektov technického rozvoja v spoločnosti Západoslovenská distribučná, a.s. Dlhodobo sa venuje nasadzovaniu nových technických riešení v oblasti prevádzky distribučných sietí VN (elektrické ochrany, lokalizácia porúch, prevádzka uzla sietí VN) a vývoju meracích prístrojov pre elektroenergetiku.

Martin Horák

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