

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti detekce poruch na kabelových trasách

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš TOLAR**
Osobní číslo: **E10B0125P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Možnosti detekce poruch na kabelových trasách**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte možnosti detekce poruch na kabelových trasách.
2. Sestavte přehled metod lokalizace poruch na kabelových trasách.
3. Na základě získaných znalostí analyzujte nabídku měřicí aparatury na trhu.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na příčiny vzniku poruch a možnosti detekce poruch na kabelových trasách. Jsou zde uvedeny metody odrazu impulsů, sekundárně impulzní metoda / několikanásobná impulzní metoda, rázová metoda, dokmitávací metoda a můstková metoda.

Klíčová slova

detekce kabelových poruch, lokalizace kabelových poruch, metody měření, vodič, kabel, kabelové trasy

Abstract

This bachelor's project is oriented on causes of faults and possibilities of detection faults on the cable routes. There are the methods of time domain reflection, secondary impulse method / multiple impulse method, impulse current method, decay method and bridge method.

Key words

cable fault detection, cable fault location, measuring methods, wire, cable, cable routes

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2014

Lukáš Tolar

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	7
ÚVOD	8
1 TECHNICKÉ ASPEKTY KABELŮ	9
1.1 DRUHY KABELOVÝCH KOMUNIKACÍ	9
1.2 TYPY KABELŮ	9
1.2.1 <i>Kabely s papírovou izolací</i>	10
1.2.2 <i>Kabely s izolací ze zesíťného polyethylenu</i>	10
2 PŘÍČINY PORUCH KABELŮ	11
2.1 VODNÍ STROMEČKY	12
2.2 ELEKTRICKÉ STROMEČKY	13
3 ZTRÁTOVÝ ČINITEL TG Δ	13
4 POSTUP PŘI LOKALIZACI KABELOVÝCH PORUCH	14
4.1 ANALÝZA KABELU A TEST IZOLACE	15
5 METODY LOKALIZACE CHYB KABELŮ	16
5.1 METODA ODRAZU IMPULSŮ (TDR)	16
5.2 SEKUNDÁRNĚ IMPULZNÍ METODA / NĚKOLIKANÁSOBNÁ IMPULZNÍ METODA (SIM/MIM)	18
5.2.1 <i>Několikanásobná impulsní metoda (MIM)</i>	19
5.3 RÁZOVÁ METODA (ICM).....	20
5.3.1 <i>Pořadí odrazu</i>	21
5.4 METODA DOKMITÁVÁNÍ.....	22
5.4.1 <i>Pořadí odrazu</i>	23
5.5 MŮSTKOVÁ METODA.....	24
5.5.1 <i>Wheatstoneův můstek</i>	24
5.5.2 MURRAYŮV A GLASERŮV MŮSTEK	25
6 TYPY PŘÍSTROJŮ A JEJICH FUNKCE	28
6.1 IRG 3000	28
6.2 SHIRLA	29
6.3 SSG 500	29
6.4 PHG	30
6.5 RB6000	30
6.6 T625	31
6.7 KPG 36 kV VLF	31
ZÁVĚR	33
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	34

Seznam symbolů a zkratk

PILC	Paper Insulated Lead Covered (kabel s papírovou izolací)
XLPE	Cross-linked polyethylene (kabel s izolací ze zesíťeného polyethylenu)
TDR	Time domain reflectometry (metoda odrazu impulsů)
SIM	Secondary impulse method (Sekundárně impulzní metoda)
MIM	Multiple impulse method (několikanásobná impulzní metoda)
ICM	Impulse current method (rázová metoda)
PVC	Polyvinylchlorid
PE	polyethylen

Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje na možné příčiny vzniku poruch a následně jejich detekci pomocí nejpoužívanějších metod.

V první části textu jsou představeny technické aspekty kabelů. Ve druhé jsou uvedeny možné příčiny a postup při detekci poruch na kabelových trasách. Ve třetí a hlavní části bakalářské práce jsou rozvedeny metody lokalizace poruch na kabelových trasách. Na závěr je představena nabídka měřicí aparatury na trhu.

Mezi světově největší výrobce měřících přístrojů pro detekci poruch na kabelových trasách patří rakouská firma BAUR Prüf – und Messtechnik GmbH, která se zabývá diagnostikou kabelů více než 50 let a anglická firma Bicotest, která se zabývá výrobou zkušebních zařízení déle než 80 let. Mezi další výrobce patří RiserBond Instruments a Neumann.

1 Technické aspekty kabelů

1.1 Druhy kabelových komunikací

Na českém trhu je mnoho výrobců elektrických kabelů. Každá z následujících skupin má své uplatnění v praxi, podle toho pro jaké aplikace se využijí.

Druhy komunikací můžeme rozdělit do skupin:

- Vodiče,
- Silové kabely,
- Datové kabely,
- Sdělovací kabely,
- Nehořlavé a samozhášecí kabely,
- Speciální kabely.

Jejich vlastnosti jsou dány různými druhy izolací, plniv a kompozitních materiálů, které zabraňují jejich poškození. Vodiče se používají většinou v domovních rozvodech a jsou buď měděné typu CYKY s průřezem $2,5 \text{ mm}^2$ nebo dříve používané hliníkové vodiče s průřezem 4 mm^2 . Vodiče se většinou ukládají pod omítku. Silové kabely se využívají k rozvodu elektrického napětí od 600 V do 400 kV. Vyznačují se větším průměrem, větší elektrickou pevností a větší životností než vodiče. Používají se jako podzemní kabely k rozvodu elektrické energie. Se sdělovacími kabely se můžeme setkat v požárních systémech. Datové kabely, jak už z názvu vyplývá, se používají k přenosu informací. Patří sem koaxiální a optické kabely. Nehořlavé a samozhášecí kabely jsou určeny do prostorů, kde je velké riziko požáru. Zajišťují bezpečnost v místě, kde se vyskytuje velké množství lidí. Do speciálních kabelů se řadí kabely, které mají úzké spektrum zaměření. Například v robotice, větrných elektrárnách a fotovoltaice. [1]

1.2 Typy kabelů

Typy kabelů můžeme rozdělit jako nízko-napěťové (LV), středně-napěťové (MV) a vysoko-napěťové (HV) kabely. Typické konstrukce napěťových kabelů jsou uvedeny níže. Podle typu kabelu jsou kladeny různé nároky na údržbu a následně i detekci případné poruchy. V dnešní době jsou u nižších třífázových napětí používány třívodičové kabely.

Naopak u větších napěťových hladin jsou použity jednožilové kabely. Důvodem jsou menší náklady na opravu. [3]

1.2.1 Kabely s papírovou izolací

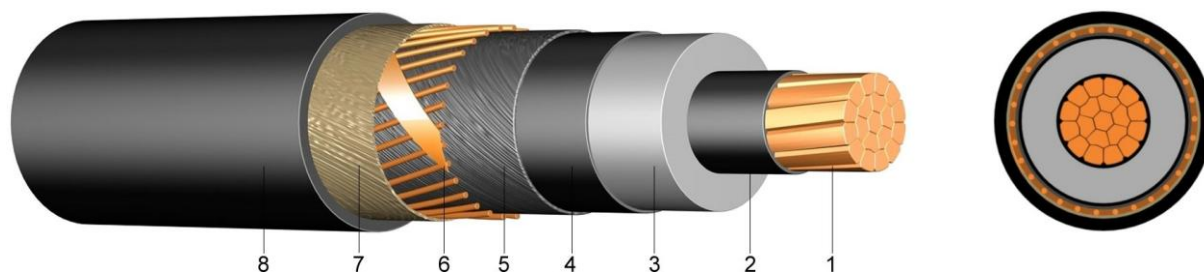
Poměrně velká část kabelů v rozvodné síti jsou PILC kabely, nebo-li kabely s izolací papír a olej. Plášť bývá ocelový nebo olověný. Tyto kabely mají výborné izolační vlastnosti, ovšem při výskytu vlhkosti v izolaci se razantně sníží velikost průrazného napětí. Při testech dochází ke zničení kabelu, protože tyto kabely jsou náchylné na vysoké napětí dodávané testovacím zdrojem. Výměna PILC kabelů za modernější XLPE kabely je velmi nákladná, proto se k detekci poruch těchto kabelů používá střídavé napětí do 140 V při frekvenci 0,1 mHz až 1 kHz. [5]



Obr. 1 Kabel s papírovou izolací krytý olovem (převzato z [6])

1.2.2 Kabely s izolací ze zesíťovaného polyethylenu

V dnešní době se většinou používají kabely XLPE namísto výše zmíněných kabelů s papírovou izolací. Kabely s izolací ze zesíťovaného polyethylenu mají přibližně desetkrát menší dielektrické ztráty a vyznačují se menší nutností údržby než kabely s papírovou izolací. Tyto kabely mají také vysoké tepelné a mechanické odolnost. [7]



Obr. 2 Kabel s izolací ze zesíťného polyetyelnu (převzato z [8])

1 – měděný vodič, 2 – vnitřní vrstva z polovodivého materiálu, 3 – izolace jádra z XLPE, 4 – vnější vrstva z polovodivého materiálu, 5 – těsnicí páska, 6 – stínění z měděných drátů, 7 – proti-zkrutová páska, 8 – vnější plášť z PE.

Tab. 1 Porovnání XLPE a PILC kabelů [3][7]

	XLPE	PILC
Dielektrické ztráty, $\text{tg } \delta$	$< 4 \times 10^{-4}$	$< 3 \times 10^{-3}$
Měrný odpor [$\Omega \cdot \text{cm}$]	10^{18}	10^{18}
Maximální zkratová teplota [$^{\circ}\text{C}$]	250	160 - 220
Rychlost šíření $v/2$ [m/s]	78 až 87 $\times 10^6$	75 až 85 $\times 10^6$ (impregnovaný papír) 108 až 132 $\times 10^6$ (suchý papír)

2 Příčiny poruch kabelů

Počátek poruchy kabelu je dán zhoršenou izolací. Nejčastější příčiny chyb kabelů jsou stárnutí, mechanické poškození, nadměrné tepelné namáhání, koroze a poškození způsobená při přepravě a pokládce kabelu [9].

Stárnutí kabelu je způsobeno mnoha faktory, které jsou shrnuty v Tab. 2.

Tab. 2 Faktory stárnutí kabelu [10]

Faktor stárnutí		Mechanismus stárnutí
Tepelný	Vysoká teplota	Chemická reakce Teplotní roztažnost Difúze Tavení izolace
	Nízká teplota	Praskání Tepelné smrštění
Elektrický	Napětí	Částečné výboje Elektrické stromečky Vodní stromečky Dielektrické ztráty
	Proud	Přehřívání
Mechanický	Opakované ohýbání, vibrace, únava, pevnost v tlaku a tahu a smykové napětí	Praskání Roztržení Ohýbání materiálu
Ekologický	Voda, vlhkost, kontaminace, plyny a kapaliny	Vodní stromečky Koroze Dielektrické ztráty
	Radiace	Zrychlené chemické reakce

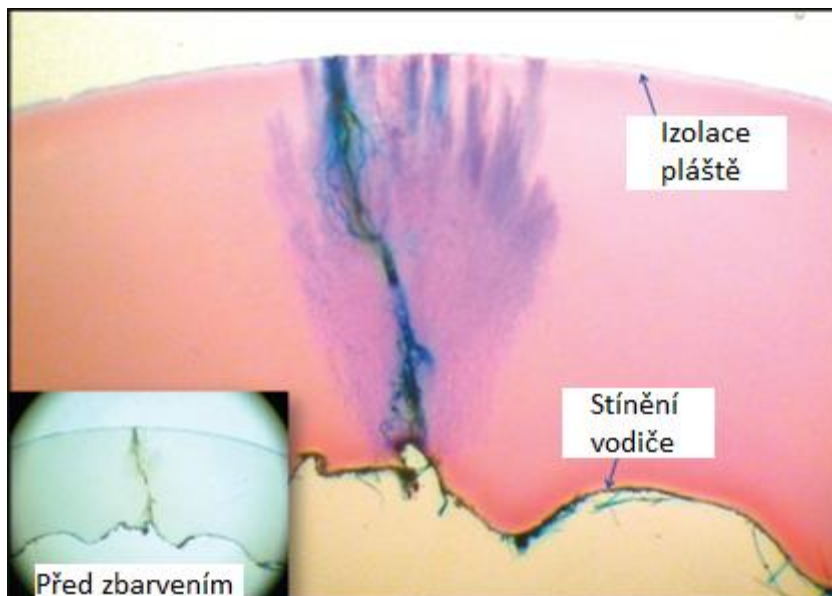
2.1 Vodní stromečky

Vodní stromečky vznikají při působení vlhkosti na izolaci kabelu. Tento jev byl poprvé zaznamenán u XLPE kabelů v roce 1969 a je to jeden z největších problémů podzemích kabelů s izolací ze zesíťovaného polyethylenu. Vzniká působením elektrického napětí, teploty, mechanického namáhání a vody. Proto jsou mechanismy vodních stromeček velmi těžko objasnitelné. [11]

Vodní stromečky se skládají z malých dutin v izolaci ze zesíťovaného polyethylenu. Jejich délka je v řádech od pm do mm, proto jsou těžko zjistitelné i po optickém zvětšení. Vznikají v blízkosti defektu kabelového pláště. Následně se zvětšují důsledkem silného elektrického pole a vody. Růst vodních stromeček způsobí zkratování kabelu. [12]

2.2 Elektrické stromečky

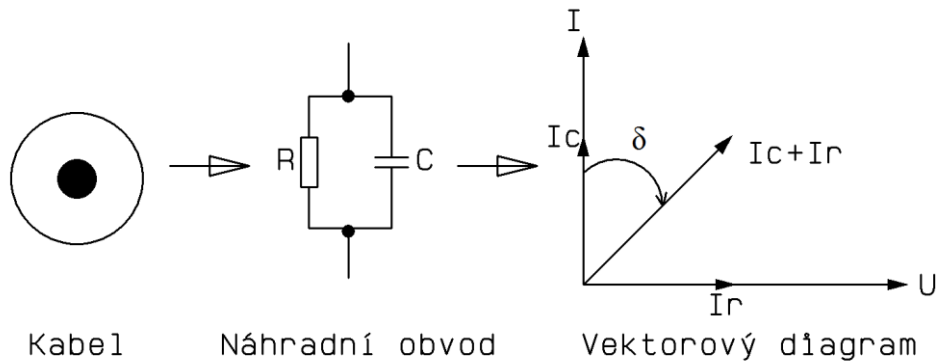
Elektrické stromečky jsou další stromová struktura, která se vytváří i bez přítomnosti vody. Vyskytuje se též v kabelech s XLPE izolací. Vznikají v oblastech, kde jsou povrchové vady a tím pádem vysoké elektrické namáhání, které způsobí dielektrické poškození. Trvale poškodí materiál v daném místě. Další zvětšení stromečků způsobují částečné výboje. Vliv na zvětšování elektrických stromečků má rychlá změna elektrického napětí. Elektrické stromečky jsou na rozdíl od vodních stromečků větší a lépe vidět. Některé poruchy vznikají jako vodní stromečky a následně se vyvinou do elektrických stromečků. Elektrické stromečky mohou být detekovány pomocí měření částečných výbojů, které se provádí pomocí metody TDR. [12]



Obr. 3 Prerušení izolace na kabelu způsobené elektrickými stromečkami (převzato z [13])

3 Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$

Jedním z diagnostických parametrů při měření izolace může být tg . Obvykle se k měření využívá vysokonapěťový zdroj s frekvencí 50 Hz, ale čím dál více se uplatňují zdroje s nízkou frekvencí. Jak můžeme vidět z náhradního schématu na Obr. 4, tak jednožilové kabely jsou v principu koaxiální kondenzátory. Ideální kabel je složen z paralelních prvků izolačního odporu R [Ω] a kapacitou kabelu C [F]. Malý izolační odpor a velká kapacita je dána větší délkou kabelu. [14]



Obr. 4 Kabel, náhradní obvod a vektorový diagram [14]

Z Obr. 4 lze vyvodit následující rovnici

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{2\pi f C R} \quad (1)$$

Stárnutí izolace kabelů je přirozený proces. V kabelech ze zesíťového polyetylenu se vlivem stáří vyskytují vodní a elektrické stromečky a v kabelech s papírovou izolací dochází k pronikání vlhkosti do izolace. Všechny tyto jevy mají vliv na izolační schopnosti kabelu. Dochází ke snižování izolačního odporu R a následně zvýšení ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$. Snižováním frekvence zkušebního napětí se ztrátový činitel zvyšuje. Proto se používá tzv. VLF zdrojů, protože lze lépe porovnat nový kabel od poruchového kabelu a zestárlého kabelu. [14]

4 Postup při lokalizaci kabelových poruch

Tento postup se provádí pro maximální úspěch lokalizace kabelových poruch. Ke správné lokalizaci kabelových poruch je nutné dodržet následující procesní kroky: [3]

- Indikace poruchy,
- Odpojení a uzemnění,
- Analýza poruchy a test izolace,
- Předběžná lokalizace chyby kabelu,

- Trasování,
- Přesné lokalizování poruchy,
- Identifikace kabelu,
- Označení poruchy a následná oprava,
- Diagnostika kabelu,
- Zavedení do normálního provozu.

4.1 Analýza kabelu a test izolace

Nejprve se musí nashromáždit co nejvíce informací o daném kabelu a kabelové síti, aby byla detekce kabelové poruchy co nejefektivnější. Ovlivnitelné faktory analýzy kabelu:

- Druh kabelového pláště,
- Samostatné izolace u tří žilového kabelu,
- Typ izolačního materiálu (PILC, XLPE),
- Rychlost šíření signálu,
- Délka kabelu při analýze,
- Výskyt kabelových odboček a jejich délka,
- Uložení kabelu přímo v podzemí nebo v trubce.

Všechny výše uvedené faktory musí být známy před zahájením lokalizace chyby kabelu. [3]

Při analýze se zjistí všechny hodnoty odporů mezi fázovým vodičem a uzemňovacím vodičem, mezi jednotlivými fázovými vodiči a na všech vodičích jednotlivě. Když se jedná o poruchu, která je vysoce rezistentní, tak dalším krokem je použití stejnosměrného napětí. Tím se určí napětí, kde se stav chyby mění. Velikost tohoto napětí je minimální hodnota pro rázový generátor, který je využit u metod SIM/MIM, rázové metody nebo metody dokmitávání. [3]

Obecně se poruchy rozdělují na vysokoodporové a nízkoodporové. Rozdíl mezi těmito poruchami je od 100 Ω do 200 Ω . [3]

Typy poruch:

1. Poruchy kabelového jádra jsou:
 - Nízko odporové poruchy ($R < 100 - 200 \Omega$)
 - Zkrat
 - Vysoko odporové poruchy ($R > 100 - 200 \Omega$)
 - Přerušený obvod
2. Poruchy ochranného pláště (PVC, PE).

Většina kabelových poruch se vyskytuje mezi kabelovým jádrem a pláštěm. Dalšími místy poruch jsou kabelové spojky. Přítomnost chyby, která je dána změnou odporu, lze měřit obyčejným multimetrem. Nejjednodušší způsob testu je vzdálený konec kabelu uzemnit. Za normálních podmínek bude odpor kabelu kolem $1 \Omega/\text{km}$. Podle poruchových charakteristik lze vybrat správnou metodu pro předběžnou lokalizaci poruchy kabelu. [3]

5 Metody lokalizace chyb kabelů

5.1 Metoda odrazu impulsů (TDR)

Metoda TDR patří k nejrozšířenějším metodám k vyhledávání poruch na kabelovém vedení. Funguje na principu zaslání krátkého nízkonapěťového impulsu po kabelu. Napěťový impuls je například vyslán z IRG, nebo-li generátoru odrazu impulsů. Impuls se odrazí pokaždé, když narazí na impedanční nespojitost. Pomocí velikosti odraženého signálu se vypočítá koeficient zpětného odrazu, který se vypočítá pomocí rovnice (2). Kde Z_1 je charakteristická impedance kabelu, Z_2 je impedance na poruše a k je odrazový koeficient. [2]

$$k = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

Pomocí amplitudy odraženého signálu můžeme odhadnout typ poruchy. Jestliže $k = 1$ ($Z_2 \gg Z_1$) nebo-li pozitivní odrazový impuls, jedná se o přerušeny obvod. Naopak jestliže $k = -1$ ($Z_2 \ll Z_1$) nebo-li negativní odrazový impuls, potom je obvod ve zkratu. Když $k = 0$ tak se

jedná o bezztrátové vedení. V případě zkratu nebo přerušení je k reálné číslo, ale při spoji vodičů je k komplexní číslo. Vzdálenost mezi počátečním bodem a bodem odrazu je dána vztahem (3). [2]

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \text{ [m]} \quad (3)$$

Kde v je rychlost šíření signálu v kabelu a t je časový interval mezi dopadajícím a odrazovým signálem

Největším problémem ve vedení je přesně definovat rychlost šíření signálu v , která je závislá na frekvenci, vlastnostech vedení a na způsobu zaslání signálu. Pro výpočet rychlosti šíření signálu v závislosti na frekvenci se používá fázová konstanta β [rad/m], kde jsou zahrnuty parametry vedení jako odpor R , indukčnost L , kapacita C a svod G . Rychlost šíření signálu dostaneme, když vydělíme úhlový kmitočet ω [rad/s] fázovou konstantou β . V praktickém využití můžeme rychlost šíření signálu v vypočítat podle vzorce (5), kde rychlost světla $c = 3 \cdot 10^8$ m/s a relativní permitivita ϵ_r je dána dielektrickými vlastnostmi kabelu. [2]

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R'^2 + \omega^2 L'^2) \cdot (G'^2 + \omega^2 C'^2)} - R'G' + \omega^2 L'C' \right]} \text{ [rad/m]} \quad (4)$$

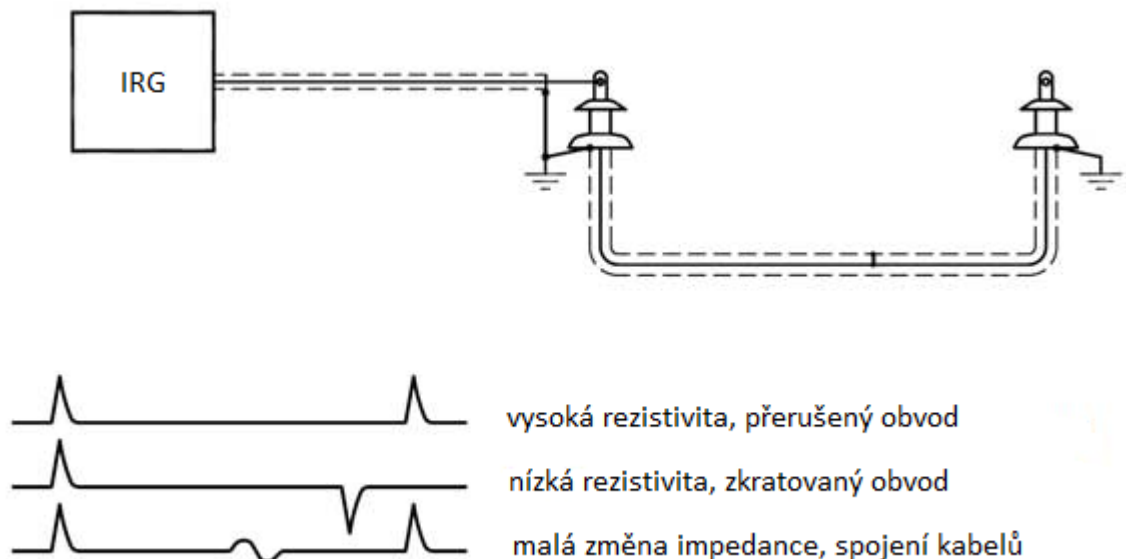
Fázová konstanta β [rad/m], odpor vedení R [Ω], indukčnost vedení L [H], kapacita vedení C [F], svod G [S], úhlový kmitočet ω [rad/s].

$$v = \frac{\omega}{\beta} \cong \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ [m/s]} \quad (5)$$

Rychlost šíření signálu v [m/s], rychlost světla $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, relativní permitivita ϵ_r [-], fázová konstanta β [rad/m].

Metodu TDR lze jednoduše používat pro velké změny impedance (zkraty, přerušení), ale u menších změn impedance (uzly, roztřepení) je detekce ztížena menšími odrazy. Také u

kabelů menších délek je problém zjistit chybu, protože vyslaný signál se ihned vrací zpět a tyto dvě naměřené hodnoty se mohou vzájemně překrývat. Časový úsek mezi vyslaným a odraženým signálem je příliš krátký, aby se mohl změřit. Tento problém lze vyřešit pulzním generátorem s rychlým náběhovým časem a napěťovým vzorkovačem k zachycení časového intervalu. Ovšem to je nákladnější. [2]



Obr. 5 Detekce poruchy metodou odrazu impulsů (převzato z [4])

5.2 Sekundárně impulzní metoda / několikanásobná impulzní metoda (SIM/MIM)

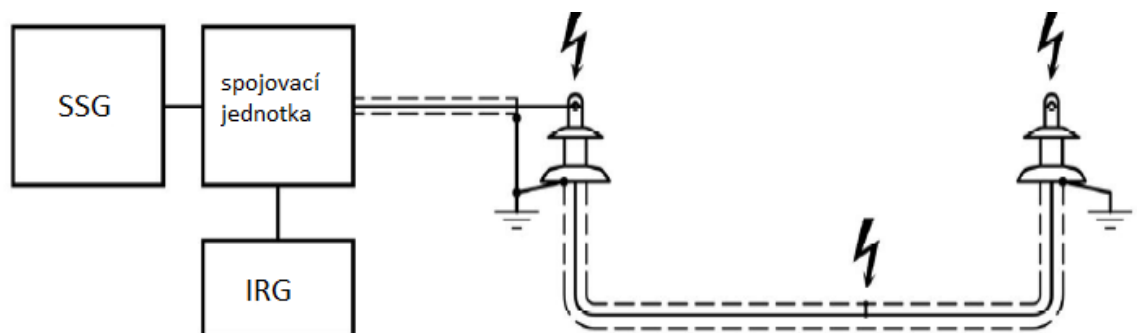
SIM/MIM patří mezi nejpoužívanější a nejefektivnější metody lokalizace poruch na kabelových trasách. Tato metoda se používá tam, kde metodu TDR nelze použít, protože poruchová impedance vzhledem k impedanci kabelu se výrazně nezmění. [3]

Způsob měření spočívá ve vyslání jednoho vysokonapěťového impulsu, který generuje rázový generátor. To způsobí, že vysokoimpedanční chybu krátkodobě změní na zkrat a poté může být detekována druhým nízkonapěťovým impulzem TDR (SIM/MIM). Nízkonapěťový impuls je spojen přes spojovací jednotku s výstupem vysokého napětí na rázovém generátoru (SSG). Vysokonapěťový impuls přináší několik problémů. Blesk způsobuje potíže, jako vodu

ve spojkách nebo přetavení oleje v kabelech s olejovou izolací. Ve složitých charakteristikách se hůře lokalizuje porucha. Všechny tyto účinky mají vliv na časování a uvolnění sekundárních impulzů pro dosažení poruchy přesně v krátkém časovém intervalu. Musí se manuálně měnit zpoždění a to vyžaduje odborné schopnosti uživatele. Proto je vynalezena několikanásobná impulsní metoda (MIM). Výhodou této metody je, že uživateli zvětší časový rámec pro detekci poruchy. Jelikož se nemusí manuálně nastavovat čas zpoždění, je tato metoda více využívána. [3]

5.2.1 Několikanásobná impulsní metoda (MIM)

V prvním kroku jsou z TDR odeslané impulzy do kabelu, které při vysoké impedanci kabelových poruch neukazují žádný odraz. Následně je zjištěna pozitivní výchylka na druhém konci kabelu. Ve druhém kroku je chyba zapálena vysokonapětovým impulzem z rázového generátoru. Výboj se zobrazí jako oblouk na chybném místě. Přesně v okamžiku oblouku (stav zkratu) je vyslán druhý impulz z TDR do kabelu, který se odráží s negativní výchylkou od oblouku, jelikož oblouk má nízkou impedanci. Nízkonapětových impulzů můžeme vyslat až 5 a tím si zajistíme lepší přesnost lokalizace chyby. Díky tomu dostaneme až 5 grafů chybovosti za jeden vysokonapětový impulz. [3]



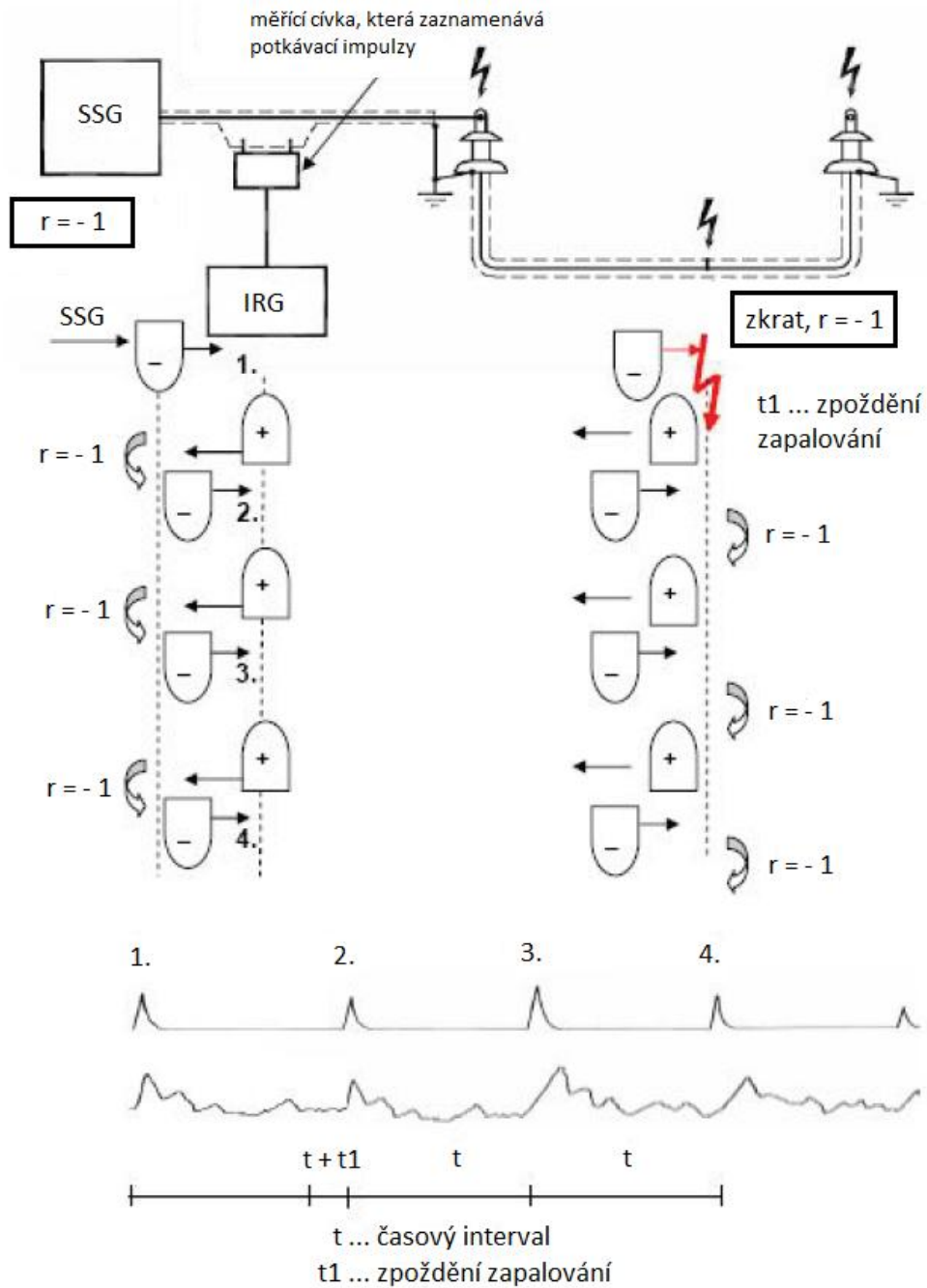
Obr. 6 Detekce poruchy SIM/MIM (převzato z [3])

5.3 Rázová metoda (ICM)

U předešlých metod, které jsou založeny na TDR impulzu, je problém v tlumení signálu v dlouhých kabelech nebo odrazy od spojů v kabelech. Ve velmi dlouhých kabelech může přirozený útlum impulzu způsobit, že se impulz nevrátí zpět do TDR, a proto nelze použít předešlé metody. Tyto neobvyklé vlivy tlumení mohou být také způsobeny korozí kabelového pláště. [3]

Funguje na základě vyslání vysokonapěťového impulzu z rázového generátoru. Tento výboj způsobuje průraz. Opakováním impulsu se stanoví vzdálenost chyby. Přesnost metody ICM je v dlouhých kabelech velmi vysoká. V krátkých kabelech nízká, protože se vyslané impulzy navzájem ovlivňují. [3]

ICM detekuje proudový impulz podél pláště kabelu při přeskočení. Sekvence proudového impulzu se měří pomocí indukční spojovací jednotky. Každý impulz, který se odrazí na konci vedení nebo v místě poruchy má činitel odrazu v závislosti na impedanci vzhledem k zemi. První odraz impulzu je ovlivněn zpožděním zapalování. Pro určení vzdálenosti se používají vzdálenosti mezi druhým až třetím nebo čtvrtým až pátým impulsem. Vzdálenost chyby se vypočítá pomocí impulsní rychlosti testovacího kabelu a doby periody odražené vlny. Měřením lze vzdálenost od chybného místa zjistit podle nastavením kurzorů od vrcholků pozitivních vln. V praktickém měření se zvyšuje napětí tak, že je vytvořeno rozdělení. Vybíjecí impulz potom cestuje mezi místem oblouku a rázovým generátorem, dokud není utlumen. [3]



Obr. 7 Pulzní posloupnost rázové metody (převzato z [3])

5.3.1 Pořadí odrazu

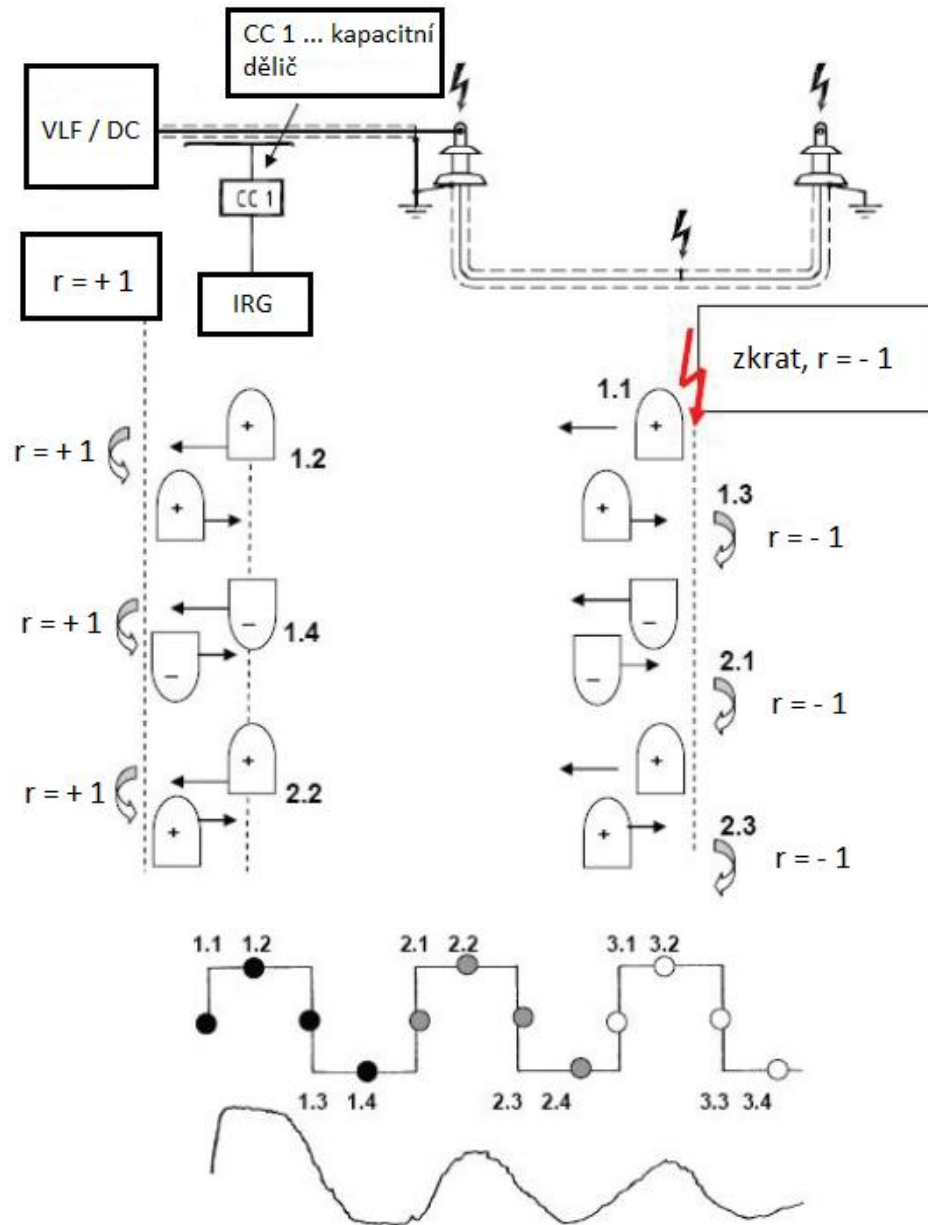
Polarita impulsu ze zaznamenaných impulsů závisí na směru spojovací cívky. Indikovaná impulzní posloupnost ukazuje obrácené pozitivní impulzy. Po doplnění odrazových faktorů ($r = -1$ na rázovém generátoru a $r = -1$ na chybě kabelu) je vytvořena impulzní posloupnost.

Nejprve je impulz vypuštěn z rázového generátoru. Je vypuštěn první negativní impulz, který je zaznamenán. Od chybného místa se vrací jako pozitivní impulz. Následně, když impulz dorazí k rázovému generátoru, tak se odráží a běží pozpátku jako druhý negativní impulz, který je zaznamenán. Poté se nad bodem výboje impulz znovu odrazí a vrací se jako pozitivní impulz. Nakonec impulz dorazí na rázový generátor a odráží se opět jako negativní impulz. Tento postup se opakuje, dokud není impulz utlumen, jak můžeme vidět na Obr. 7. [3]

Důvodem této posloupnosti je, že na obou koncích jsou nízké body impedančního odrazu. Teoreticky by se impulz měl pokaždé zdvojnásobit, protože na obou koncích jsou negativní body odrazu. Vzhledem k přirozenému útlumu v kabelu je počet odrazů omezen na 5 časových intervalů. [3]

5.4 Metoda dokmitávání

Předchozí metody jsou založeny na rázovém generátoru, se kterým lze úspěšně předběžně lokalizovat chyby maximálně do 32 kV. Na lokalizaci poruch na vysokonapěťových kabelech do 220 kV se používá metoda dokmitávání (Decay method). Tyto kabely se používají pro vysoké zatížení. Rozdělení energie v případě poruchy kabelu je tak vysoká, že by výboj na poruše byl těžce detekován. Některé poruchy mohou způsobit nárůst napětí na hodnotu, která je větší než jmenovité napětí na rázovém generátoru. Proto se používají zdroje vysokého napětí VLF nebo DC. Dokmitávací metoda je založena na kapacitním děliči napětí. Na vadném kabelu se pomocí VLF/DC zdroje navyšuje napětí až na průraznou hodnotu. V kabelu se hromadí velké množství energie. Při dosažení průrazného napětí, průraz vytvoří přechodovou vlnu, která postupuje od vadného místa ke zdroji. Tato přechodná vlna je zaznamenána pomocí echometru metodou TDR přes kapacitní dělič. Zaznamenaná doba kmitání odpovídá vzdálenosti poruchy. [3]



Obr. 8 Pulzní posloupnost metody dokmitávání (převzato z [3])

5.4.1 Pořadí odrazu

Odrazové faktory ($r = +1$ na zdroji vysokého napětí a $r = -1$ na poruše kabelu). Na kabelu je záporné napětí. Nejprve výboj vytlačuje pozitivní přechodovou vlnu směrem ke zdroji. Následně u vysokonapěťového zdroje se odráží bez změny polarity. Poté impuls přichází opět k výboji, kde se změní na negativní polaritu. Nakonec opět impuls přichází ke

zdroji napětí bez změny polarity. Tento proces se opakuje, dokud není impulz utlumen jak můžeme vidět na Obr. 8. Jeden cyklus impulzu je čtyřnásobek vzdálenosti od poruchy. Proto je výpočet vzdálenosti při dokmitávací metodě založen na rovnici (6). [3]

$$d = \frac{v \cdot t}{4} \text{ [m]} \quad (6)$$

5.5 Můstková metoda

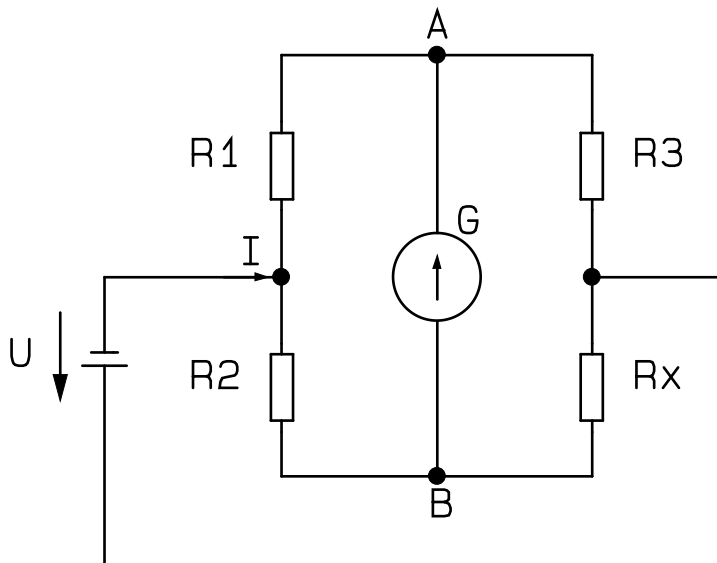
Všechny dříve zmíněné metody pro předběžnou lokalizaci poruch, které jsou založeny na principu odrazového impulzu, lze použít pouze v případě, kdy jsou v kabelech paralelně dva vodiče a více. Ovšem v některých kabelových konstrukcích může dojít k poruše mezi jádrem vodiče a vnějším pláštěm kabelu a tím i půdy. Především v kabelech bez stínění např.: stejnosměrné vysokonapěťové kabely pro železniční napájení, nízkonapěťové kabely a signálové kabely. Na těchto kabelech nefunguje princip odrazu, protože plášť kabelu se nechová jako kovové uzemnění. Impulz putuje po kabelu jen do té doby, dokud existují dvě paralelní vodivé vrstvy. [3]

Porucha vnějšího pláště kabelu, který je z PVC nebo PE izolace se projevuje jako kterákoliv výše zmíněná porucha. Nelze rozeznat, jestli se jedná o poruchu vnějšího pláště. Chyba pláště nemá přímý vliv na elektrický výkon stíněného kabelu, ale ze střednědobého hlediska na něj působí negativně. Hlavně umožňuje vniknutí vody z okolní půdy do kabelu, což způsobuje korozi a vznik vodních stromečků. Proto je testováno ochranné opláštění pokaždé, když se provádí diagnostika kabelu. Zajistí se tím dlouhodobá spolehlivost kabelu. Ochrana opláštění těchto kabelů se měří pomocí můstkových metod. Můstkové metody se většinou používají u nízkoodporových poruch. Všechny můstkové metody využívají pro stejnosměrný proud. [3]

5.5.1 Wheatstoneův můstek

Můstek je vyvážen, pokud body A a B mají stejný potenciál. Na galvanometru se objeví nula.

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \rightarrow R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \text{ [\Omega]} \quad (7)$$



Obr. 9 Wheatstoneův můstek [3]

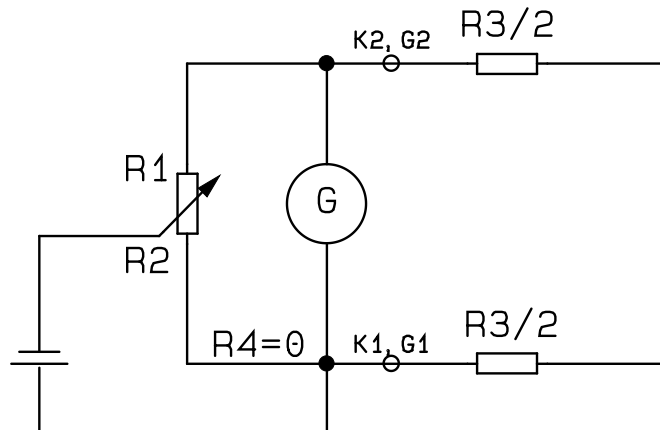
5.5.2 Murrayův a Glaserův můstek

Oba tyto můstky vychází z Wheatstoneovo můstku. Rozdíl mezi Murrayovým a Glaserovým můstkem je v zapojení a ve vzorci použitým pro výpočet vzdálenosti chyby. Vnitřní můstek je pro oba stejný. Svorky G jsou připojení galvanometru a svorky K jsou na připojení ke kabelu. Murrayův můstek se uplatňuje tam, kde vedle poruchového kabelu je i kabel bez poruchy. Glaserův můstek se používá pro nízkonapěťové kabely bez stínění. [3]

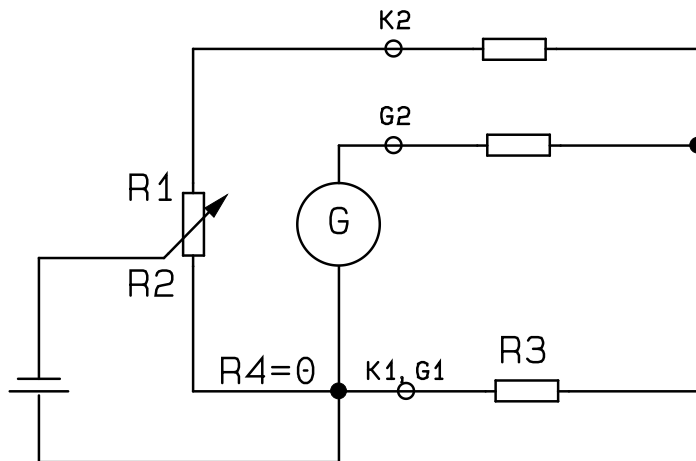
Průběh měření:

- **Vyvážení můstku**

Prostřednictvím stejnosměrného nízkonapěťového zdroje vyvážíme okruh. Galvanometr se nastaví na nulu. Odpor R_4 zobrazuje nulu, protože přivedený zdroj napětí není spojen se zemí a porucha nezpůsobuje žádný unikající proud. [3]



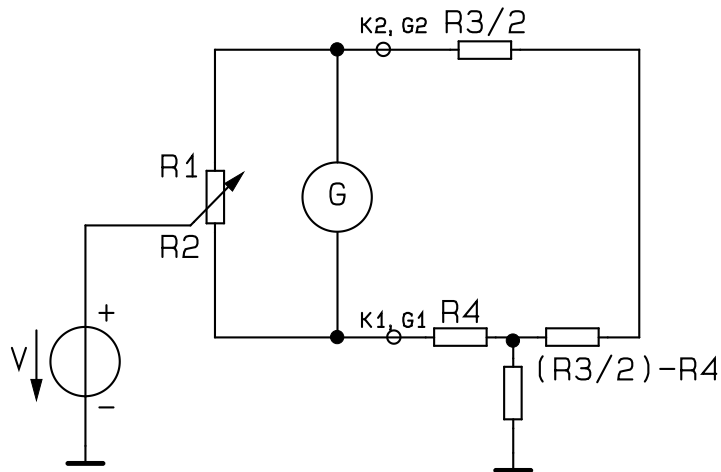
Obr. 10 Vyvážení Murrayova můstku [3]



Obr. 11 Vyvážení Glaserova můstku [3]

- **Měření**

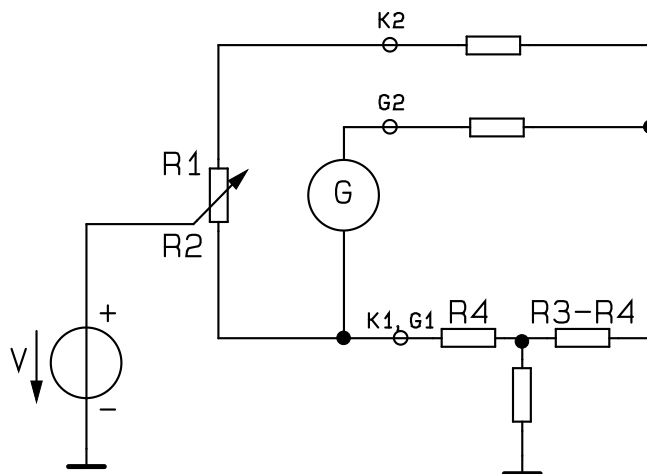
Pro měření se používá stejnosměrný zdroj spojený se zemí. Proto protékající proud se vrací zpět do zdroje napětí. Poté se na můstku projeví odporová chyba. Galvanometr se vychylnuje a ukazuje určitou hodnotu odpovídající odporu R_4 a vzdálenosti od poruchy. [3]



Obr. 12 Měření Murrayova můstku [3]

$$d = \frac{\alpha}{100} \cdot 2l \text{ [m]} \quad (8)$$

Kde d je vzdálenost od poruchy v metrech, α je výchylka na galvanometru a l je délka kabelu v metrech.



Obr. 13 Měření Glaserova můstku [3]

$$d = \frac{\alpha}{100} \cdot l \text{ [m]} \quad (9)$$

Kde d je vzdálenost od poruchy v metrech, α je výchylka na galvanometru a l je délka kabelu v metrech.

6 Typy přístrojů a jejich funkce

6.1 IRG 3000

Měřicí přístroj pro lokalizaci poruch od firmy BAUR. Disponuje automatickým režimem, který je snadno ovladatelný. Měří jednofázové i třífázové kabely o délce 10 m až 200 km. Při měření se může používat společně s rázovým generátorem. [15]



Obr. 14 Měřicí přístroj BAUR IRG 3000 (převzato z [15])

Metody měření:

- Metoda odrazu impulsů (TDR)
- Sekundárně impulzní metoda / několikanásobná impulzní metoda (SIM / MIM)
- Rázová metoda (ICM)
- Dokmitávací metoda

6.2 Shirla

Měřicí přístroj pro testování kabelů od firmy BAUR. Využívá se pro lokalizaci poruch pláště kabelů. Používá Murrayovo a Glaserovo můstkovou metodu. Přístroj automaticky vyváží můstek a naměřená vzdálenost poruchy se zobrazuje přímo v metrech. Měřicí rozsah je do 10 kV stejnosměrného napětí a odporové chyby do 1 GΩ [15]



Obr. 15 Měřicí přístroj BAUR shirla (převzato z [15])

6.3 SSG 500

Tento přístroj je generátor rázového napětí s maximálním napětím 16 kV od firmy BAUR. Výstupní napětí je volitelné na tři úrovně 4, 8 a 16 kV. Používá se v kombinaci s echometrem IRG při měření SIM/MIM a rázovou metodou pro lokalizaci chyb kabelů s vysokým a nízkým odporem. Vysokonapěťový náboj z kondenzátorů lze vybíjet manuálně nebo automaticky po jednotlivých nebo 10-ti a 20-ti impulsech za minutu. Disponuje tepelnou ochranou proti přetížení. [15]



Obr. 16 Generátor rázového napětí BAUR SSG 500 (převzato z [15])

6.4 PHG

Přístroj sloužící k diagnostice kabelů od firmy BAUR. Poskytuje měření ztrátového činitele a měření částečných výbojů. Jedná se o nízkofrekvenční generátor (VLF), který využívá frekvenci od 0,01 Hz do 1 Hz a je určen pro měření kabelů do napětí 50 kV. Převážně se využívá pro kabely s papírovou izolací. [15]



Obr. 17 Měřicí přístroj pro diagnostiku kabelů BAUR PHG (převzato z [15])

6.5 RB6000

Měřicí přístroj pro celkovou diagnostiku kabelu od americké firmy RiserBond Instruments. Tento přístroj obsahuje plně funkční reflektometr (TDR), multimetr a zaměřovač izolačních poruch. Používá se k měření vysokoohmových i nízkoohmových poruch. [16]



Obr. 18 Měřicí přístroj RB6000 od firmy RiserBond Instruments (převzato z [16])

6.6 T625

Multifunkční reflektometr T625 od firmy Bicotest pro měření kabelových poruch patří k nejlepším měřicím přístrojům. Pracuje na principu TDR, vyšle do kabelu signál, který na základě zpětného zpoždění vyhodnotí a určí vzdálenost poruchy. Dokáže lokalizovat zkrat, přerušeni, poškození izolace a délku kabelu. [16]



Obr. 19 Měřicí přístroj T625 od firmy Bicotest (převzato z [16])

6.7 KPG 36 kV VLF

Přístroj pro diagnostiku kabelů od firmy Neumann. Měří XLPE i PILC kabely do jmenovitého napětí 20 kV. Pracuje na principu VLF, testuje s napětím do hodnoty 36 kV o velmi nízké frekvenci (0,1 Hz). Testem lze zjistit poškození izolace. [17]



Obr. 20 Měřicí přístroj KPG 36 kV VLF od firmy Neumann (převzato z [17])

Závěr

V dnešní době je rostoucí poptávka po elektrické energii tak velká, že si nemůžeme dovolit energetické výpadky. Proto je důležité detekovat poruchy na kabelových trasách. I když v dnešní době existují pokročilé technologie, kabelové trasy budou i nadále nedílnou součástí rozvodu elektrické energie. Nové kabely s izolací ze zesíťovaného polyetyleny mají mnohem lepší vlastnosti než zastaralé, přesto používané kabely s izolací z impregnovaného papíru. Poruchy mohou nastat i u nových kabelů, které mohou být poškozeny mechanicky při pokládce. Proto je důležité diagnostikovat kabely před prvním použitím a tím předejít následnému zničení kabelu v důsledku narušené izolace.

Tato práce znázorňuje základní typy používaných kabelů pro rozvod elektrické energie, procesní kroky při vyhledávání poruchy, jejich příčiny a metody pro detekci kabelových poruch. Na závěr jsou zde představeny základní měřicí přístroje pro detekování poruch. Firma BAUR Prüf – und Messtechnik GmbH, která je považována za jednoho z předních světových výrobců měřicí kabelové techniky, působí od roku 2010 i v České republice. Také firma Bicotest má velké zkušenosti v tomto oboru a jejich produkty též patří k nejdokonalejším na světě.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PROPROJEKTANTY.CZ. Druhy elektrických vodičů a kabelů [online]. 2010. Dostupné z: <http://www.proprojektanty.cz/vodice-a-kabely/181-druhy-elektricky-ch-vodicu-a-kabelu>
- [2] SHI, Qinghai, Uwe TROELTZSCH a Olfa KANOUN. Detection and localization of cable faults by time and frequency domain measurements. *2010 7th International Multi- Conference on Systems, Signals and Devices* [online]. IEEE, 2010, č. 1, s. 1-6 [cit. 2014-06-04]. DOI: 10.1109/SSD.2010.5585506. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5585506>
- [3] BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH. *Cable Fault Location in LV, MV and HV Underground Cable Networks Practical Experience* [online]. 2009. Dostupné z: <http://www.allbookez.com/pdf/276092/>
- [4] HV TECHNOLOGIES, Inc. *Cable Fault Location Measuring Methods* [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.hvtechnologies.com/HVSolutions/CableFaultLocationSystems/CableFaultLocationMeasuringMethods/tabid/328/Default.aspx#Top>
- [5] FCC PUBLIC s. r. o. *Diagnostika a testování silových kabelů* [online]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26382
- [6] *The Canadian Copper and Brass Development Association* [online]. © 1997-2014. Dostupné z: <http://coppercanada.ca/publications/pub23e/23e-section3.htm>
- [7] *Industrija kablova - Jagodina (FKS)* [online]. [1971] [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://www.fks.co.rs/fkse/maticna/energet/upet/index110.htm>
- [8] *ALLKABEL s.r.o.* [online]. © 2011 [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://www.allkabel.cz/high-voltage-cables-3630-kv-n2xsf2y-12-20-kv/>
- [9] *BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH* [online]. 2010 [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: http://www.baur.at/fileadmin/ASSETS/brochures/CableFaultLocation/Kabelfehlerortung_de-de.pdf

- [10] KASZTENNY, Bogdan, Iliia VOLOH a Christopher G. JONES. Detection of incipient faults in underground medium voltage cables. *2009 Power Systems Conference* [online]. IEEE, 2009, č. 1, s. 1-12 [cit. 2014-06-04]. DOI: 10.1109/PSAMP.2009.5262402. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5262402>
- [11] MIYASHITA, Y., Y. MAKISHI a H. KATO. Mechanism of water tree generation and propagation in XLPE. [1991] *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* [online]. IEEE, 1991, č. 1, s. 147-151 [cit. 2014-06-04]. DOI: 10.1109/ICPADM.1991.172140. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=172140>
- [12] *Wikipedia.org: Electrical treeing* [online]. 2014 [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_treeing
- [13] WEN SHU, JUN GUO a S. A. BOGGS. Water treeing in low voltage cables. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2013, vol. 29, issue 2, s. 63-68 [cit. 2014-06-04]. DOI: 10.1109/MEI.2013.6457600. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6457600>
- [14] *FCC Public s. r. o.: Měření ztrátového činitele izolace silových kabelů* [online]. © 2014 [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23877
- [15] *Servis BAUR s.r.o.* [online]. © 2008 [cit. 2014-06-06]. Dostupné z: <http://www.baur.cz/produkty/>
- [16] *Radeton* [online]. © 2010 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.radeton.cz/kategorie/lokalizace-poruch-na-kabelech>
- [17] *Blue Panther s. r. o.* [online]. © 2008 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.blue-panther.cz/kpg-36kv-vlf>