



ensuring the flow

Diagnostika kabelů

V podzemních VN kabelových sítích
Teoretické podklady a praktické aplikace

VLF zkoušky
Měření ztrátového činitele $\tan \delta$
Lokalizace & měření částečných výbojů

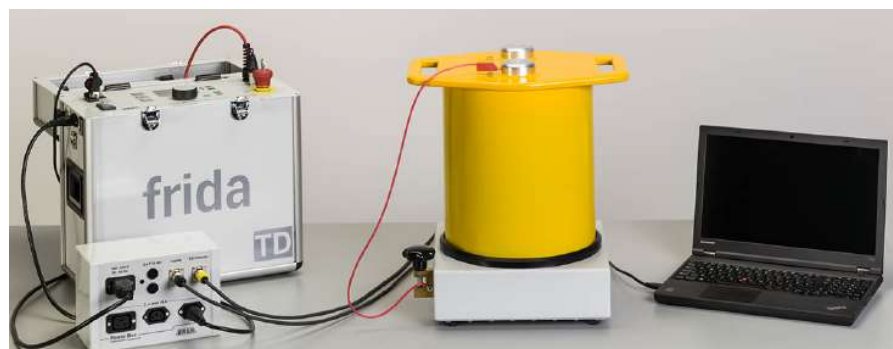
true^{•••}sinus[®]

..... Autor: Tobias Neier, Ing., MBA

Verze: 3.0

02/2015

BAUR
Váš partner pro diagnostiku kabelů



**Sítě jsou citlivé.
Pomáháme vám je chránit.**

www.baur.eu
www.baur.cz

Obsah

1	Úvod.....	6
2	VLF zkoušky.....	7
2.1	Proč používat VLF ke zkoušení SN podzemních kabelů?.....	7
2.1.1	Zkouška odolnosti pomocí VLF	7
2.1.2	Proč nelze použít stejnosměrnou zkoušku na kabely XLPE?	7
2.1.3	Požadavky na zkoušení kabelů a normy	8
2.1.4	Technické důvody pro použití VLF	9
2.1.5	Komerční důvody pro použití VLF	9
2.1.6	Všeobecné strategické důvody pro použití VLF	9
2.2	Normy pro provozní zkoušky vysokonapěťových kabelů.....	10
2.3	Zkoušení a diagnostika v souladu s normami	11
2.3.1	IEC 60060-3	12
2.3.2	IEC 60502-2, vydání 3.0 / 2014-02.....	13
2.3.3	CENELEC HD 620 (S1), VDE 0267 HD S1 (1996)	15
2.3.4	IEEE STD. 400.2	16
3	Monitorovaná zkouška odolnosti (MWT)	21
4	Praktická doporučení pro realizaci zkušebních napětí v souladu s normami.....	29
5	Diskuse o dielektrické odezvě v kabelech XLPE/PILC.....	30
6	Kombinovaná diagnostika kabelů TD/PD.....	32
6.1	Proč používat VLF diagnostiku	33
6.1.1	Ztrátový činitel: srovnání VLF a silových frekvencí	33
6.1.2	PD: srovnání VLF a silové frekvence	33
7	Měření ztrátového činitele TD - TanDelta	34
7.1	Základní informace o ztrátovém činiteli Tan δ (TD)	34
7.2	Vodní stromeček – elektrický stromeček.....	36
7.3	Měření Tan δ u starých kabelů v provozu	38
7.4	Měření Tan δ při nižších zkušebních napětích	40
7.5	Vyhodnocení TD – důležité parametry / vlivy	41
7.5.1	Důležitý parametr pro interpretaci TD	41
7.5.2	Analýza trendu stability TD	44
7.5.3	Základní vzorec analýzy trendu TD založené na prvcích kabelu	45
7.5.4	Příklady měření TD – trend stability	55
7.5.5	Měření TD – porovnání výsledků v průběhu času	56
7.5.6	Vliv povrchových proudů v otevřených koncovech	57
7.6	Doporučený přístup k hodnocení TD	59
7.6.1	Měření ztrátového činitele v kabelech XLPE.....	59
7.6.2	Měření ztrátového činitele u PILC.....	59
7.6.3	Měření ztrátového činitele u obvodů se smíšenými kabely:.....	59
7.6.4	Hlediska / definice použité k hodnocení:.....	60
7.6.5	TanDelta jako nástroj k měření vlhkosti kabelového příslušenství	63
7.6.6	Nově zavedená kritéria hodnocení při měření ztrátového činitele TanDelta dle IEEE 400.2-2013	64
8	Lokalizace a měření úrovně částečných výbojů PD	70
8.1	Základní informace	70
8.2	Měření částečných výbojů dle IEC 60270	71

8.3	Kalibrace	74
8.4	Využití kalibračního grafu.....	74
8.4.1	Měření částečných výbojů při VLF a jiných zkušebních napěťových křivkách...	77
8.5	Výhody VLF PD diagnostiky	78
8.6	Napětí při vzniku PD (PDIV) a vyhasnutí PD (PDEV)	79
8.7	Interpretace výsledků PD – pokyny.....	80
8.7.1	Měření PD u kabelů XLPE	80
8.7.2	Měření PD u obvodů s PILC a smíšenými kabely	81
9	Další metody dielektrické diagnostiky – jejich teorie a vhodnost	82
9.1	Systém k diagnostice kabelů KDA 1 – IRC - Analýza.....	83
9.2	Systém k diagnostice kabelů CD30/31- Metoda zpětného napětí.....	84
9.3	Systém k diagnostice izolace IDA 200 – Sinusová korelační technika.....	85
9.4	Systém PHG TD ke zkoušení a diagnostice kabelů	86
10	Příklad protokolu	87
10.1	Praktické příklady pro základní pochopení.....	87
10.1.1	Příklad 1: Požadavek na citlivost systému k měření TD.....	87
10.1.2	Příklad 2: Měření TD ovlivněné vniknutím vody do spojů	88
10.2	Příklad protokolu o kombinované diagnostice TD / PD	90
11	Nejnovější projekty diagnostických služeb BAUR	96
11.1	Hong Kong Electric.....	96
11.2	KEPCO Korea	99
11.3	Western Power / Austrálie	101
11.4	Další spolupráce.....	102
11.5	Diagnostická platforma BAUR	102
12	Příloha – Případové studie kombinované diagnostiky	103
12.1	Případová studie A 1 - 11153.....	103
12.1.1	Uspořádání kabelu	104
12.1.2	Výsledné TD ze dne 6. 12. 2011	104
12.1.3	Výsledné PD zaznamenané dne 6. 12. 2011	105
12.1.4	Požadovaný zásah a závěr – krok 1.....	107
12.1.5	Rozbor kabelu	108
12.1.6	Výsledné TD dne 31. 1. 2012	109
12.1.7	Porovnání výsledků, před výměnou spoje a po ní	110
12.1.8	Výsledné PD ze dne 31. 1. 2012	111
12.1.9	Požadovaný zásah a závěr – krok 2.....	111
12.2	Případová studie H 2 - 5532	112
12.2.1	Uspořádání kabelu	113
12.2.2	Výsledné TD	113
12.2.3	Interpretace výsledků TD	114
12.2.4	Výsledné PD	115
12.2.5	Interpretace PD	116
12.2.6	Diagnostická analýza.....	116
12.2.7	Závěr a doporučení	117
12.3	Případová studie H 3 - 5360	118
12.3.1	Uspořádání kabelu	119
12.3.2	Výsledné TD ze dne 16. 4. 2013	119
12.3.3	Interpretace výsledku TD.....	120
12.3.4	Výsledné PD ze dne 16. 4. 2014	121
12.3.5	Diagnostická analýza.....	122

12.3.6	Doporučený přístup - zásah	123
12.3.7	Výsledné TD ze dne 10. 5. 2014, opakovaná zkouška <i>po výměně spoje</i>	124
12.3.8	Porovnání výsledků, před výměnou spoje a po ní	125
12.3.9	Výsledné PD ze dne 31. 1. 2012 – po výměně spoje	125
12.3.10	Závěr	125
12.4	Případová studie H 4 - 4285	126
12.4.1	Uspořádání / struktura kabelu	127
12.4.2	Historie	128
12.4.3	Výsledky měření TD a PD	129
12.4.4	Výsledné TD zaznamenané dne 13. července 2011	130
12.4.5	Výsledky měření PD po výměně 169m kabelového úseku dne 13. července ..	132
12.4.6	Přehled diagnostiky TD PD	133
12.4.7	Porucha kabelu dne 30. července 2011	133
12.4.8	Měření TD dne 31. července 2011	134
12.4.9	Rozbor spoje	137
12.4.10	Požadovaný zásah a závěr	138
12.5	Případová studie H 5 -391	139
12.5.1	Historie	140
12.5.2	Měření částečných výbojů dne 6. 6. 2010	143
12.5.3	Přehled diagnostiky TD PD	143
12.5.4	Další prováděné zásahy	143
12.5.5	Další dění	144
12.5.6	Průzkum	144
12.5.7	Závěr & doporučení	146
12.5.8	Výsledek případové studie	146
13	Odkazy	147
13.1	Bibliografie	147
13.2	Přehled obrázků a tabulek	148

Zkoušení a diagnostika

středněnapětových podzemních kabelových sítí na VLF bázi



1 Úvod

Kontroly a zprovoznování nově nainstalovaných VN zařízení, zejména pro přenos energie a distribuční sítě, představují důležité postupy pro zajištění spolehlivého a výkonného napájení. Zkoušky stejnosměrných i střídavých VN zařízení při provozní frekvenci, a to v laboratorních i terénních podmínkách, byly po mnoho let spolehlivým nástrojem k posouzení stavu izolace.

Na základě nejnovějšího vývoje mezinárodních norem byly tyto normy rozšířeny o nové metody a zkušební frekvence, např. VLF – kromě silových frekvencí.

Posouzení stárnutí a prevence poškození středně- a vysokonapětových podzemních kabelových systémů jsou pro současná zařízení velmi důležité. Vzhledem ke kvalitě rozvodných sítí i vysoce nákladným a rostoucím požadavkům na spolehlivost dodávky energie je třeba provádět častější výkonnostní zkoušky a kontroly. [1]

Během posledního desetiletí se technologie i normy vyvíjely. Na mezinárodní rovině i na konferencích byla předložena řada technických zpráv. Byly vypracovány a velmi podrobně analyzovány fyzikální i chemické postupy týkající se středněnapětových podzemních kabelů a jejich příslušenství. Byly vyvinuty a vyhodnoceny technologie, díky kterým je možné pochopit a změřit řadu jevů.

V současnosti si může zainteresovaný technik nebo provozní vedoucí přečíst stovky článků a podrobných studií, je však těžké udržet si přehled.

Tato kniha by měla pomoci technikům údržby, provozním vedoucím i všem ostatním zainteresovaným osobám zaměřit se na výběr dokumentů, které jsou zde představeny. Zároveň jsou některé úryvky vyňaté z těchto dokumentů v této publikaci přímo citovány.

2 VLF zkoušky

2.1 Proč používat VLF ke zkoušení SN podzemních kabelů?

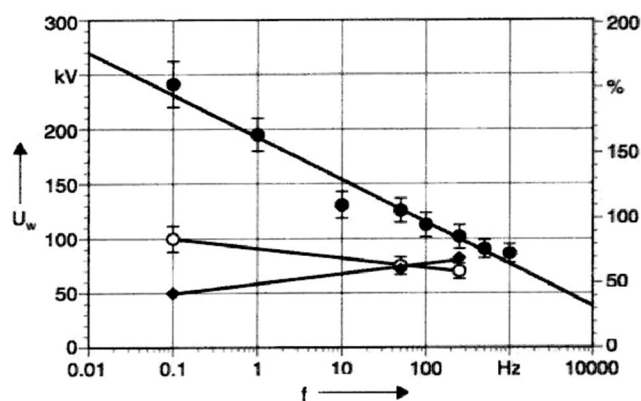
Z důvodu koordinace izolace je třeba zkoušet dielektrickou pevnost zařízení se zatížením, které je podobné provoznímu zatížení. V rámci diagnostických postupů je zatížení izolace víceméně volitelné. Prvním požadavkem je však nepoškodit samotnou izolaci, druhým pak dosáhnout dostatečného posouzení stavu. Stejnosemřné zkoušky napájecích kabelů s PE / XLPE izolací jsou v rozporu s oběma těmito požadavky.

Zkušební napětí s velmi nízkými frekvencemi byla poprvé použita ke zkoušení vysoce výkonných generátorů. Po rozpoznání rizik spojených se stejnosemřnými zkouškami kabelů PE/XLPE byly VLF jednou z možných alternativ. První VLF byly používány pro zkoušky možné odolnosti, typicky s hodnotou $3U_0$ po dobu jedné hodiny. Později byla jako diagnostické nástroje zavedena měření ztrátového činitele (DF) ($\tan \delta$) a částečných výbojů (PD). [2]

2.1.1 Zkouška odolnosti pomocí VLF

VLF zkoušky odolnosti byly úspěšně zavedeny a normalizovány pro silové kabely [VDE], zkušenosti jsou popsány např. v [Moh, 2003]. Podle [Goc, 2000], Obr. 1, je výdržné napětí izolace, která nebyla předem poškozena, při VLF (0.1 Hz) rovno dvojnásobku hodnoty při PLF (50 Hz), což znamená, že i při použití vyšších zkušebních napětí nejsou u těchto VLF zkoušek ohroženy části izolace, které nebyly předem poškozené. [2], [3]

Pro zkoušky podzemních kabelových systémů pomocí VLF lze uvést několik výhod.



Obr. 1: Výdržné napětí v závislosti na frekvenci

pro modelové kabely s mechanickým poškozením i bez něj [Goc, 2000]: [3]

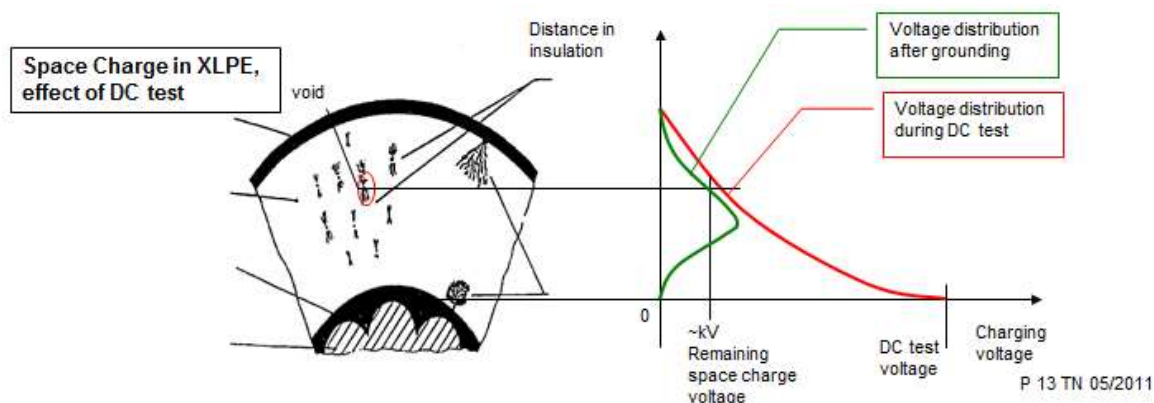
- Výdržné napětí bez mechanického poškození,
- Výdržné napětí s mechanickým poškozením,
- ◆ Poměr výdržného napětí s mechanickým poškozením a bez něj [1]

2.1.2 Proč nelze použít stejnosměrnou zkoušku na kabely XLPE?

Mnoho energetických zařízení používalo stejnosměrné napětí ke zkouškám kabelů na místě. Tato praxe pokračovala i po zavedení kabelů XLPE do systému přibližně před 20 lety. Nedávná studie o poruchách kabelů v moderních zařízeních však odhalila skutečnost, že je tato tradiční metoda zkoušení kabelů, která je relativně spolehlivá u kabelů PILC, neúčinná při detekci skrytých závad izolace XLPE. Jak bylo zjištěno, mohou při zkouškách stejnosměrným napětím vznikat v polymerním materiálu uzavřené prostorové náboje, které mají škodlivý účinek na dielektrickou pevnost kabelů. Ačkoli tyto kabely projdou úspěšně zkouškou stejnosměrným napětím, dojde brzy po obnovení napájení k jejich selhání. Podobný vzorec chování byl pozorován rovněž u poruch středněnapěťových (MV) kabelů [4]

Prostorové náboje lze zobrazit rozdělením napětí během stejnosměrné zkoušky po délce izolace mezi plášť a žílu. Z rozdělení napětí je patrné, že se v dutinkách, které na určitých místech fungují jako miniaturní kondenzátory, může hromadit určitá energie. V závislosti na jeho poloze vzhledem k průměru může toto napětí po několika minutách stejnosměrné zkoušky dosáhnout poměrně vysoké hodnoty. Po dokončení zkoušky dojde k vybití žíly, která zůstane uzemněná. V izolaci však zůstane napětí rozložené po určitou dobu. Nabité dutinky si mohou svůj náboj zachovat díky okolnímu vysoce izolačnímu materiálu XLPE.

Po zapnutí kabelů, které úspěšně prošly stejnosměrnou zkouškou, může dojít k přetížení míst s dutinkami a kabel může brzy po zapínací posloupnosti selhat.



Obr. 2: Prostorové náboje v dutinkách XLPE během stejnosměrné zkoušky [5]

2.1.3 Požadavky na zkoušení kabelů a normy

Nové normy, např. IEC 60060-3 – 2006, definují zdroj VLF napětí jako zdroj adekvátního vlnění pro provozní zkoušky VN; tyto zdroje představují nejmodernější současné zdroje nejruznějších vysokých budících napětí. Provozní VLF zkoušky kabelů na základě výše uvedené normy se opravdu staly celosvětově nejrozšířenější provozní zkouškou a diagnostickou **metodou v rámci provozování a údržby** středně- a vysokonapěťových aplikací.

Uvedené normy navíc představují minimální požadavky.

Pracovníci obsluhy mohou zvolit vyšší kritéria, než požadují normy, jako jsou IEC 60060-3, IEEE STD 400.2 nebo VDE 60620 HD S1.

Specifikace uvedené v normách motivují dodavatele i uživatele podzemních kabelových systémů ke zlepšování spolehlivosti systému. Pravidelné diagnostické kontroly chrání uživatele před vznikajícími poruchami podzemních rozvodných systémů. Ať už je příčina poruchy či poškození, na něž se vztahuje odpovědnost nebo záruka, jakákoli, uživatel nebo dodavatel se nejlépe ochrání (pojistí), pokud bude možné analyzovat a lokalizovat příčinu poruchy nedestruktivním způsobem. [1]

2.1.4 Technické důvody pro použití VLF

- Hmotnost a rozměry zkušebních zařízení
- Mobilita při použití v terénu
- Vyšší účinnost vyhledávání poruch izolace
- Vyšší citlivost a přesnost měření TD ve srovnání se silovou frekvencí nebo oscilační vlnou
- Účinná diagnostika s využitím VN zdroje truesinus® k měření částečných výbojů
- Monitorování vzdálenosti poruchy během uvádění do provozu a zkoušek odolnosti s monitorováním částečných výbojů
- **VLF zkoušky jsou mnohem účinnější než zkoušky stejnosměrné**
- **Stejnosemné napětí může vytvářet v suché izolaci kabelu prostorové náboje s dlouhodobým poškozením kabelu [1]**

2.1.5 Komerční důvody pro použití VLF

S ohledem na strategie údržby je třeba zvážit následující skutečnosti:

- Spotřeba energie (může způsobit velmi vysoké náklady)
- Údržba na základě událostí (vysoké náklady)
- Náklady na opravy – renovace (nízké náklady) [1]

2.1.6 Všeobecné strategické důvody pro použití VLF

- Zvýšení celkové spolehlivosti systému
- Snížení doby prostojů na uživatele a rok
- Údržba na základě daných podmínek (střední náklady)
- Preventivní údržba (velmi vysoké náklady)
- Výměny, rozhodnutí o částečných výměnách
- Spolehlivé posouzení celé životnosti systému a vyhodnocení údajů o systému [1]

2.2 Normy pro provozní zkoušky vysokonapětových kabelů

V polovině 80. let byly představeny alternativní metody provozních zkoušek podzemních kabelů středního napětí pomocí pevného dielektrika s využitím velmi nízkých frekvencí v rozsahu 0,01 až 1 Hz. Kromě silových frekvencí bylo jako alternativu možné použít také VLF zkoušku. Velké provozní i laboratorní zkoušky jasně prokázaly, že jsou nová zkušební zařízení nejen praktická, ale i výhodná. Celosvětově nejběžnějším tvarem vysokonapětového VLF vlnění je sinusoida dle **IEC 60060-3**.

Normalizační komise začaly definovat VLF zkoušky v roce 1996. Evropský výbor pro normalizaci CENELEC vydal první normu HD 620 S1 o provozních zkouškách SN kabelů rozsahu 6 kV až 36 kV. V roce 2004 vydal IEEE první příručku pro provozní zkoušky IEEE STD 400.2-2004[®] týkající se provozních VLF zkoušek vysokonapětových SN kabelů. [1]

V roce 2014 byl nakonec dokument CENELEC HD 620 S1 zapracován do nové normy IEC 60502. Tehdy byly VLF zkoušky oficiálně stanoveny jako doporučený zkušební standard, a to zejména pro podzemní kabely s vytlačovaným XLPE. **Jako doporučený přístup k pokročilým VLF zkouškám je dále uváděna monitorovaná zkouška odolnosti.**

Obecná provozní příručka IEEE 400-2012 o provádění provozních zkoušek vysvětluje jednotlivé dostupné technologie zkoušení a vyhodnocování izolace stíněných silových kabelových systémů o jmenovité hodnotě 5kV a více. VLF zkouška je popsána ve specifické provozní příručce pro danou technologii, IEEE400.2, jejíž aktuální verze pochází z roku 2013.

Aktuální norma IEC 60060-3, vydaná v roce 2004, se zabývá zejména zkušebním zařízením k provádění zkoušek na místě, včetně zařízení k VLF zkouškám. Normy IEC 60060 jsou takzvané horizontální normy, což znamená, že se týkají všech komponent (např. kabelů, transformátorů, rotačních strojů apod.) a všech rozsahů napětí nad 1 kV. Jako horizontální norma neurčuje IEC 60060-3 hodnoty. Zkušební úrovně jsou ponechány v normách týkajících se příslušných komponent (např. IEC 60502-2014, CENELEC HD 620 a 621, VDE 0267 nebo IEEE 400.2 pro kabely).

Diagnostický přístup k VLF lze tudíž popsat jako „**Zkoušení a diagnostika v souladu s normami!**“

Mezi nejdůležitější nové položky v normě IEC 60060-3 patří:

- Zahrnutí zařízení k VLF zkouškám
- Stanovení úrovně přesnosti zkušebního napětí při zkouškách na místě
- Zavedení záznamu výkonnosti zkušebního zařízení pro zkoušky na místě
- Stanovení zkoušky výkonu a kontroly výkonu zkušebního zařízení pro zkoušky na místě

Výhodou pro zákazníky je získání a údržba spolehlivých zařízení ke zkouškám na místě, s certifikovanou přesností a výkonem. Hodnoty přesnosti zařízení ke zkouškám na místě jsou přizpůsobeny potřebám a struktuře nákladů těchto zařízení. [6]

2.3 Zkoušení a diagnostika v souladu s normami

Normy o zkouškách podzemních silových kabelových sítí 6kV – 500kV

	Středněnapěťové kabely 6 – 69kV			
	IEC 60502-2 2014	CENELEC HD 620 – 1996	IEEE400.2- 2013	Příklad užité normy
Zkoušení při uvedení do provozu	3xU _o 15min - VLF 0.1Hz - ACRT 15min, 20-300Hz - zkouška bez zátěže, 24h, 1.0U _o 50/60Hz - TD/PD doporučeno - 4xU _o , 15min, DC	2.0xU _o 60min - 45-60Hz 3xU _o 60min - VLF 0.1Hz Zkouška pláště	Zkoušení 2.2 – 2.8U _o 15 – 60min - VLF - VLF MWT (TD / PD) Diagnostika max. 2.0U _o - VLF TD - VLF PD	Zkoušení 3xU _o 30/60min - VLF 0.1Hz 3xU _o 5min - VLF + PD
Zkoušení v rámci údržby			Zkoušení 1.8 – 2.2 15 – 60min - VLF - VLF MWT Diagnostika Max. 1.5U _o - VLF TD - VLF PD	Zkoušení 3xU _o 10min VLF 0.1Hz Diagnostika Max. 2.0U _o - VLF TD - VLF PD

Tabulka 1: Přehled norem o zkoušení a diagnostice SN kabelů

	Vysokonapěťové kabely 30-150kV		Kabely zvlášť vysokého napětí 150kV – 500kV	
	IEC 60840	IEC 60229 Zkouška pláště	IEC 62067 -2000	IEC 60229 Zkouška pláště
Zkouška při uvedení do provozu	1.7 -2.0U _o -ACRT 60 min, 20-300Hz -zkouška bez zatížení, 24h, 1.0U _o 50/60Hz Zkouška pláště	4kV/mm max. 10kV 1min	1.1– 1.7U _o - ACRT 1h, 20-300Hz -zkouška bez zatížení, 24h, 1.0U _o 50/60Hz	4kV/mm max. 10kV 1min

Tabulka 2: Přehled norem o zkoušení a diagnostice VN a ZVN kabelů

2.3.1 IEC 60060-3

Norma IEC 60060-3 byla vydána v roce 2004. Je považována za horizontální normu, která stanoví charakteristiky a požadavky na zkušební VLF napětí.

9.3 Test voltage

9.3.1 Voltage wave shape

The test voltage should be an alternating voltage having a frequency between 0,01 Hz and 1 Hz.

NOTE With respect to the wide frequency range the relevant Technical Committee should specify the frequency dependent on the test object, the test duration and the voltage value.

Sinusoidal VLF voltage waveshape shall approximate a sinusoid with both half-cycles closely alike. The result of a high voltage test is thought to be unaffected by small deviations from a sinusoid if the ratio of the peak to r.m.s values is within $\sqrt{2} \pm 15\%$.

NOTE If the ratio of peak to r.m.s values is not within $\sqrt{2} \pm 5\%$, it should be verified that positive and negative peaks do not differ by more than 2%.

Rectangular VLF voltage wave shape shall approximate a rectangular wave with both half-cycles closely alike. The polarity change should be controlled to avoid overvoltages caused by transients. The ratio of peak to r.m.s. value shall be within $1.0 \pm 5\%$.

9.3.2 Tolerance

The measured value of the test voltage shall be within $\pm 5\%$ of the specified value unless otherwise specified by the relevant Technical Committee.

Obr. 3: Výňatek z normy IEC60060-3 určující maximální hodnotu zkreslení $\pm 5\%$ [7]

Definice dle IEC 60060-3:

VLF vlnění je definováno jako střídavé napětí o frekvenci 0,01 Hz až 1 Hz. Tvar vlny se může měnit od sinusoidy po obdélník. Tolerance naměřené hodnoty musí ležet v rozsahu $\pm 5\%$. Tato hodnota omezuje přijatelnou hodnotu zkreslení.

2.3.2 IEC 60502-2, vydání 3.0 / 2014-02**IEC 60502-2**

Edition 3.0 2014-02

**INTERNATIONAL
STANDARD**

**Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) –
Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)**

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60038, *IEC standard voltages*

IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 60060-3, *High-voltage test techniques – Part 3: Definitions and requirements for on-site testing*

IEC 60183, *Guide to the selection of high-voltage cables*

IEC 60228, *Conductors of insulated cables*

IEC 60229:2007, *Tests on cable oversheaths which have a special protective function and are applied by extrusion*

IEC 60230, *Impulse tests on cables and their accessories*

IEC 60287-3-1, *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 3: Sections on operating conditions – Section 1: Reference operating conditions and selection of cable type*

IEC 60332-1-2, *Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions – Part 1-2: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable – Procedure for 1 kW pre-mixed flame*

IEC 60811 (all parts), *Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials*

Obr. 4: Výňatek z normy IEC 60502-2, strany 12, [8]

IEC 60060-3 ... popisuje tvarové charakteristiky aplikovaného napětí

IEC 60229:2007 ... norma o zkoušení kabelových plášťů

20.2 DC voltage test of the oversheath

The voltage level and duration specified in Clause 5 of IEC 60229:2007 shall be applied between each metal sheath or metal screen and the ground.

For the test to be effective, it is necessary that the ground makes good contact with all of the outer surface of the oversheath. A conductive layer on the oversheath can assist in this respect.

20.3 Insulation test

20.3.1 AC testing

By agreement between the purchaser and the contractor, an a.c. voltage test in accordance with IEC 60060-3 and in accordance with item a), b) or c) as below may be used:

- a) test for 15 min with the phase-to-phase voltage U , at a frequency between 20 Hz to 300 Hz shall be applied between the conductor and the metal screen/sheath;
- b) test for 24 h with the normal rated voltage U_0 of the system;
- c) test for 15 min with the RMS rated voltage value of $3 U_0$ at a frequency of 0,1 Hz applied between the conductor and the metal screen/sheath.

NOTE 1 During the a.c. test, $\tan \delta$ and/or partial discharge may be monitored.

NOTE 2 For installations which have been in use, lower voltages and/or shorter durations may be used. Values should be negotiated, taking into account the age, environment, history of breakdowns and the purpose of carrying out the test.

[8, p. 43]

Nová verze IEC 60502, položka c), byla rozšířena o VLF zkoušky. Poznámka 1 se týká VLF zkoušek. Je možné provést monitorování TD a PD. V souladu s IEEE400-2012 je to popsáno jako monitorovaná zkouška odolnosti.

2.3.3 CENELEC HD 620 (S1), VDE 0267 HD S1 (1996)

Harmonizační dokument CENELEC HD 620 S1 je definován jako předběžná verze mezinárodně vydané normy IEC. Tento harmonizační dokument byl vydán již v roce 1996. V Evropě se tento harmonizační dokument již používá jako norma VDE 0267 HD 620S1 (1996) a je považován za obecnou normu o zkoušení kabelů po uložení.

V nejbližší době se očekává jeho vydání jako celosvětové normy IEC.

Page 5-C-19
HD 620 S1:1996
Part 5 Section C

3. Test requirements (concluded)

5. Recommended tests after installation, if required

	Test	Requirements	Test method
1.	Voltage test on insulation ^{11 21}		
1.1	a.c. test voltage 45 to 65 Hz - test voltage (r.m.s) $2U_0$ - test duration 60 min	no breakdown	
	alternatively:		
1.2	a.c. test voltage 0.1Hz - test voltage (r.m.s) $3U_0$ - test duration 60 min	no breakdown	

Obr. 5: Výňatek z CENELEC HD 620 (S1) nebo VDE 0267 HD 620 S1 (1996) [9]

2.3.4 IEEE STD. 400.2

Existují spory ohledně úrovní zkušebního napětí, jelikož není známa úroveň stárnutí izolace kabelů, a tím jejich možné poškození a degradace [6]. Z tohoto důvodu se doporučuje aplikovat zkušební standard 3U_o pouze při **uvádění do provozu a v rámci zkoušek po uložení kabelů**. [1]

Z důvodu dlouhodobého zajištění rozvodné sítě lze předejít vzniku poruch v podzemním rozvodném systému (URD) pomocí zkoušek spolehlivosti a výkonu s využitím provozních vysokonapěťových VLF zkoušek na základě doporučených norem [3,4]. V současnosti jsou na trhu k dispozici odpovídající přenosná zařízení k VLF zkouškám v terénu. Poznatky nejnovějších výzkumů týkajících se silových frekvencí, zkoušek VLF a výsledků diagnostiky hovoří ve prospěch velmi nízkých frekvencí. Nově navržené, nejmodernější zdroje VLF VN využívají vysoce přesných polovodičových zesilovačů.

Jedná se o technologii k vytváření přesného sinusového výstupního signálu, která umožňuje zajistit požadavky na přesné diagnostické měření TD a PD pomocí vysoce přesných VN zdrojů částečných výbojů bez harmonických složek. [10,11]. [1]

IEEE 400.2-2001 / IEEE 400.2-2004 / IEEE400.2/D12 leden 2012 / IEEE400.2-2013

Komise IEEE je v zásadě tvořena odborníky z energetických podniků, univerzit i výrobců zařízení. Společně byly sestaveny směrnice pro praktickou aplikaci zkušebních metod. Tyto směrnice doporučují aplikovat při různých zkouškách různé úrovně napětí. Aplikace jsou rozděleny do kategorií Instalační zkouška, Přejímací zkouška a Zkouška při údržbě.

1.2 Purpose

This guide is intended to provide troubleshooting and testing personnel with information to test shielded medium- and high-voltage cable systems rated 5 kV through 69 kV using VLF ac techniques.

Obr. 6: Definice účelu IEEE400.2-2013, [10, p. 2]

Podle IEEE400.2-2013 jsou tyto zkoušky definovány následovně: [10, pp. 3,4]

Instalační zkouška: Zkouška v terénu, prováděná po položení kabelu, avšak před jeho spojováním, ukončením nebo zavedením napětí. Účelem zkoušky je detekce poškození během přepravy, skladování nebo instalace. Je třeba poznamenat, že pro úspěšné dokončení této zkoušky může být potřeba vybavit kabel dočasnými koncovkami, a to zejména u kabelů se jmenovitou hodnotou nad 35 kV.

Přejímací zkouška: Zkouška v terénu prováděná po instalaci kabelového systému, včetně koncovek a spojů, avšak před uvedením kabelového systému do normálního provozu. Účelem zkoušky je detekce poškození během instalace a zjištění jakýchkoli větších závad nebo chyb při instalaci ostatních systémových komponent.

Zkouška při údržbě: Zkouška v terénu prováděná během provozní životnosti kabelového systému. Jejím účelem je detekce zhoršení stavu a kontrola provozuschopnosti systému. Tyto úrovně zkušebního napětí jsou stanoveny odlišně pro kosinový-obdélníkový tvar vln (definovaný špičkovou hodnotou) a pro sinusový tvar vln (definovaný efektivní (RMS) hodnotou). Příručka pro provozní zkoušky stíněných silových kabelových systémů používajících velmi nízké frekvence (VLF) [10] stanoví zkušební úrovně s ohledem na špičkové nebo efektivní hodnoty napětí.

Tabulka 3: Napětí při VLF zkoušce odolnosti pro sinusový a kosinový-obdélníkový tvar vlny¹

Tvar vlny	Jmen. hodnota kabelového systému (fáze-fáze) [kV]	Instalační zkouška (fáze-zem)		Přejímací zkouška (fáze-zem)		Údržba ² (fáze-zem)	
		[kV efekt.]	[kV špička]	[kV efekt.]	[kV špička]	[kV efekt.]	[kV špička]
Sinusový	5	9	13	10	14	7	10
	8	11	16	13	18	10	14
	15	19	27	21	30	16	22
	20	24 ³	34 ³	26	37	20	28
	25	29 ³	41 ³	32	45	24 ³	34 ³
	28	32	45	36 ³	51 ³	27	38
	30	34	48	38	54	29 ³	41 ³
	35	39	55	44	62	33	47
	46	51	72	57	81	43	61
	69	75	106	84	119	63	89

Tvar vlny	Jmen. hodnota kabelového systému (fáze-fáze) [kV]	Instalační zkouška (fáze-zem)		Přejímací zkouška (fáze-zem)		Údržba ² (fáze-zem)	
		[kV efekt.]	[kV špička]	[kV efekt.]	[kV špička]	[kV efekt.]	[kV špička]
Kosinový-obdélníkový	5	13	13	14	14	10	10
	8	16	16	18	18	14	14
	15	27	27	30	30	22	22
	20	34	34	37	37	28	28
	25	41	41	45	45	34	34
	28	45	45	51	51	38	38
	30	48	48	54	54	41	41
	35	55	55	62	62	47	47
	46	72	72	81	81	61	61
	69	106	106	119	119	89	89

Poznámka 1: Je-li provozní napětí o třídu nižší než jmenovité napětí kabelu, doporučuje se provádět zkoušky při údržbě s napětím odpovídajícím třídě provozního napětí, pokud není známo, že je příslušenství stejné třídy jako kabel. V takovém případě je třeba provést zkoušky s napětím odpovídajícím napětí jmenovitému.

Poznámka 2: Hodnota napětí při údržbě je rovna přibližně 75 % velikosti napětí při přejímací zkoušce.

Poznámka 3: Některé stávající zkušební sady mají maximální napětí až o 2 kV nižší než hodnoty uvedené v tabulce. Použití těchto zkušebních sad je přijatelné.

*Zkušební metody se střídavým VLF napětím používají střídavé signály o frekvencích v rozsahu 0,01 Hz do 1 Hz. Nejčastěji používané, komerčně dostupné **obloukové VLF napětí má frekvenci 0,1 Hz**. Nejčastěji se používá obloukové zkušební VLF napětí s kosinovým-obdélníkovým a*

sinusovým tvarem vln. Zatímco jsou ke zkoušení kabelových systémů k dispozici i jiné tvary vlnění, doporučené úrovně zkušební napětí nejsou stanoveny.

Další komerčně dostupné frekvence leží v rozsahu 0,001 Hz až 1 Hz. Frekvence nižší než 0,1 Hz mohou být užitečné k diagnostice kabelových systémů tam, kde délka kabelového systému překračuje omezení zkušební zařízení při 0,1 Hz. Pokud se však provádějí zkoušky při frekvencích pod 0,1 Hz, je třeba zvážit prodloužení doby zkoušky tak, aby byl zaručen dostatečný počet cyklů pro vyvolání průrazu při vzniku elektrického stromečku.

Několik postřehů o spolehlivosti lze vyslovit na základě údajů shromážděných od roku 2008 u přibližně 16 000 km (10 000 mil) kabelových systémů v několika severoamerických energetických zařízeních. VLF zkoušky odolnosti lze provádět ve velkém rozsahu délek kabelů (~75 m až ~4,5 km). Riziko selhání při zkoušce tak lze posuzovat na dvou úrovních dle Tabulky 4 v [11]:

1. riziko selhání při zkoušce v závislosti na délce kabelu;
2. riziko selhání při zkoušce pro specifickou délku kabelu, např. 300 m.

Obr. 7: Tabulka 3 dle IEEE400.2-2013, [10, p. 11]

Praktické zkušenosti z energetických zařízení vycházející z těchto doporučení potvrdily publikované technické zprávy s případovými studii.

Diagnostika je alternativním řešením dneška!

Aniž by bylo nutné provádět jakoukoli nadbytečnou tlakovou zkoušku, lze veškeré výkonnostní detaily analyzovat měřením ztrátového činitele tangens delta (TD nebo DF) a diagnostikou částečných výbojů PD.

Kromě doporučených úrovní zkušební napětí doporučuje „IEEE 400.2-2001 Příručka pro provozní zkoušky silových kabelů“ z roku 2001 také kritéria k posouzení hodnot ztrátového činitele TanDelta pro kabely XLPE. [12, p. 23]. Praktické zkušenosti z období deseti let byly v roce 2013 shrnuty v nových hodnotách kritérií dle „IEEE4002.-2013 Příručka pro provozní zkoušky stíněných silových kabelových systémů“.

9.3 Method

The dissipation factor ($\tan \delta$) test is a diagnostic test that allows an evaluation of the cable insulation at operating or test voltage levels. The test is conducted at operating frequency or at the VLF frequency of 0.1 Hz. When the $\tan \delta$ measurement exceeds a historically established value for the particular insulation type, the cable is considered to be defective and may have to be scheduled for replacement. If the $\tan \delta$ measurements are below a historically established value for a particular insulation type, additional tests have to be performed to determine whether the cable insulation is defective.

Tests conducted on 2 400 km of XLPE-insulated cables have established a figure of merit for XLPE, $\tan \delta = 2.2 \times 10^{-3}$. If the cable's measured $\tan \delta$ is greater than 2.2×10^{-3} , the cable insulation is contaminated by moisture (water trees). The cable may be returned to service, but it should be scheduled for replacement as soon as possible.¹⁰

If the cable's measured $\tan \delta$ is less than 2.2×10^{-3} , the general condition of the insulation is probably good; however, the cable insulation could have many small defects; in which case, the cable may operate satisfactorily for many more years. The $\tan \delta$ should be monitored regularly, and upon further deterioration of the dissipation factor, proper action should be taken. However, the cable could have only a few isolated large defects, which could cause it to fail upon returning it to service or within days after it has been re-energized. Therefore, if the measured $\tan \delta$ is greater than 2.2×10^{-3} , it is recommended that a VLF test at $3 V_0$ be performed to identify the large defects, remove them, and repair them.

Obr. 8: Výňatek z IEEE 400.2-2001, 9.3 Metoda vyhodnocení TD [12, p. 23]

Nová verze provozní příručky „IEEE400.2-2013“ obsahovala souhrn zkušeností, shromážděných během posledního desetiletí při stanovování různých hodnoticích kritérií pro izolace z PE, XLPE, TRXLPE, EPR a papíru. Rozlišují se kritéria pro diagnostické hodnocení nových a starých kabelů. Kritéria pro posouzení TD byla navíc rozšířena o hodnotu stability tangens delta (VLF-TDTS).

5.4 Tangent delta/differential tangent delta/tangent delta stability/leakage current/harmonic loss current tests with VLF sinusoidal waveform

5.4.1 Measurement and equipment

VLF Tangent delta, differential tangent delta, tangent delta stability, leakage current, and loss current harmonics measurements may be used to monitor aging and deterioration of cable systems (Werelius [B35]). However, tangent delta (VLF-TD), differential tangent delta (VLF-DTD), and tangent delta stability (VLF-TDTS) measurements are the most commonly used methods in the field. A correlation between an increasing 0.1 Hz tangent delta and a decreasing insulation breakdown voltage level at power frequency has been reported (Bach, Kalkner, and Oldehoff [B3]; Hvidsten, et al. [B24]; Hernandez-Mejia, et al. [B21]) for PE and cross linked polyethylene (XLPE) cables. The 0.1 Hz tangent delta, differential tangent delta, and tangent delta stability are mainly determined by degradation of the cable insulation (water-trees), corroding metallic shields, insulation moisture, and degraded accessories. The measurement of the tangent delta, differential tangent delta and/or tangent delta stability with a 0.1 Hz sinusoidal waveform offer comparative assessment of the aging of PE, XLPE, TRXLPE, EPRs, and paper-type insulations and can be used as a diagnostic test. The test results permit differentiating between new, defective, and highly degraded cable systems (Baur, Mohaupt, and Schlick, [B6]; Hernandez-Mejia, et al. [B21]; Hampton, et al. [B20]; Hampton and Patterson [B18]).

Cable systems can be tested in preventive maintenance programs and returned to service after testing. The measurements at VLF can be used to make decisions on cable/accessory replacement, cable rejuvenation, or repair expenditures.

Obr. 9: Výňatek z IEEE 400.2-2013, 5.4 VLF-TD, VLF-DTD, VLF-TDTS se sinusovým tvarem VLF vlnění [10, p. 15]

Table 2—Usefulness of VLF ac voltage testing methods for selected cable and/or insulation conditions

Cable condition	Diagnostic test methods				
	Simple withstand test methods	VLF-MW	VLF-TD VLF-DTD VLF-TDTS VLF-DS	VLF-PD	VLF-LC VLF-LCH
Cables with metallic shield corrosion	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Poor (see Note 1)	Poor
Extensive water treeing	Acceptable	Good	Good	Poor (See Note 2)	Good
Few large defects or few localized electrical trees	Good	Acceptable/Good (see Note 3)	Acceptable/Good (see Note 2)	Acceptable/Good	Acceptable/Good (see Note 3)
Defective splices and terminations	Acceptable/ Good (see Note 4)	Acceptable/Good (see Note 3)	Acceptable (see Note 3)	Acceptable (see Note 2)	Acceptable (see Note 3)
Mixed insulation (extruded and/or laminated)	Good	Good (see Note 4)	Poor/Good (see Note 4)	Good (See Note 5)	Poor/Good (see Note 4)

Poznámka 1: U starých kabelů s páskovým stíněním mohou být zkoušky PD méně citlivé vzhledem ke korozi v překrývajících se částech stínění a následným změnám rozložení proudu v pásce.

Poznámka 2: PD lze detekovat pouze tehdy, existuje-li v izolaci kabelů nebo příslušenství jeden či více aktivních elektrických stromečků nebo sledovacích míst, popř. jsou zde dutinky. Dále je třeba poznamenat, že podmínky vzniku PD mohou být u VLF odlišné od podmínek při jiných frekvencích.

Poznámka 3: Z důvodu odlišení vážné lokální poruchy od celkového zhoršení stavu se doporučuje dodatečná zkouška.

Poznámka 4: Jelikož tato zkušební metoda měří průměrnou hodnotu všech zkoušených izolací, doporučuje se provést dodatečnou zkoušku s cílem změřit jednotlivé úseky izolace. K rozlišení smíšených izolací kabelů lze použít metody VLF-TD, VLF-DTD, VLF-TDTS, VLF-DS nebo jiné než VLF. Nelze-li změřit jednotlivé úseky, může být metoda málo užitečná.

Poznámka 5: Lokalizaci mohou ztížit rozdílné přenosové charakteristiky různých kabelových úseků (rozdílné rozměry nebo izolace).

Tabulka 3: Tabulka 2, str. 9, normy IEEE400.2,2013, [10, p. 9] Užitečnost zkušebních a diagnostických metod VLF TD PD

3 Monitorovaná zkouška odolnosti (MWT)

V posledních letech se středisko NEETRAC zabývalo rozsáhlými praktickými výzkumnými projekty. V rámci nejnovějších projektů byl realizován výzkum **dielektrických parametrů v průběhu jednoduché zkoušky odolnosti**.

NEETRAC (National Electric Energy Testing, Research and Applications Centre) je neziskové středisko podporované svými členy, zabývající se výzkumem, vývojem a zkoušením elektrické energie, se sídlem v Georgia Institute of Technology.

Utilities	
American Electric Power	FirstEnergy
Ameren	FPL
BC Hydro	Hydro Quebec
CenterPoint Energy	NRECA
Consolidated Edison	Pacific Gas & Electric
Dominion	PacifiCorp
Duke Energy	SCE&G
EPRI	Southern California
Exelon	Southern Company

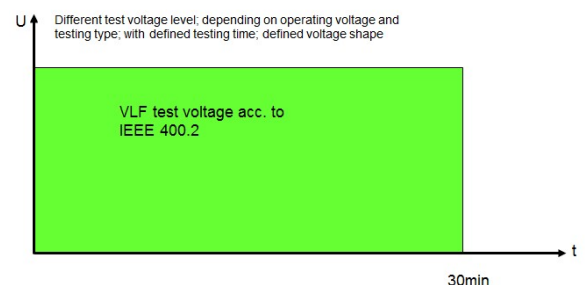
Obr. 10: Plnoprávní členové výzkumné organizace NEETRAC [13]

Na základě interpretace praktických zkušeností z konvenčních zkoušek odolnosti zdůrazňují autoři studie „First Practical Utility Implementations of Monitored Withstand Diagnostic in the USA“ [První prakticky využitelná realizace monitorované diagnostiky odolnosti v USA] [13] velmi dobře známé vedlejší účinky konvenční zkoušky odolnosti dle následující kapitoly.

„Zkoušky odolnosti byly používány při výrobě kabelů velmi dlouhou dobu. Jejich počátky lze najít v dobře známých výrobních zkouškách prováděných u výrobců kabelů a příslušenství. Ačkoli je tato zkouška v průmyslu i nadále poměrně užitečná, setkávají se uživatelé při realizaci jednoduché zkoušky odolnosti v terénu se třemi problémy:

- Neexistuje způsob jak před aplikací zkušebního napětí posoudit kvalitu kabelového systému, a tím i riziko jeho selhání.
- Neexistuje způsob jak nastavit rozsah zkoušky (snížením nebo zvýšením) podle kvality kabelového systému.
- Pokud kabelový systém odolá zkušebnímu napětí, neexistuje způsob jak posoudit kvalitu, s jakou vyhověl, tzn., zda systém vyhovuje s rezervou, nebo pouze těsně.“

Bylo navrženo, že pokud byly diagnostické parametry, například **dielektrická ztráta, svod nebo částečný výboj během zkoušky odolnosti monitorovány, lze na všechny tři výše uvedené otázky odpovědět**. Od roku 2008 poté autoři prováděli monitorované zkoušky odolnosti (MWT) u užitných systémů pomocí velmi nízké frekvence (VLF) s cílem posoudit praktické uplatnění výchozí hypotézy. Jak ukázaly praktické zkušenosti, přináší monitorovaná zkouška odolnosti, ať už pomocí částečných výbojů nebo dielektrické ztráty, technikům daných zařízení rozsáhlé a užitečné informace.



Obr. 11: Jednoduchá zkouška VLF dle IEEE400.2 [10]

Jednou z nevýhod jednoduchých zkoušek odolnosti je skutečnost, že neexistuje přímý způsob jak odhadnout „vyhovující“ rozmezí – jakmile zkouška skončí (například po 30 minutách při 2 U₀), není možné navzájem rozlišit vyhovující úseky. Jinak řečeno, není možné odlišit úseky, které by odolaly 120minutové zkoušce, od těch, které by vydržely pouze 40 minut. Z tohoto důvodu je užitečné přijmout koncepci monitorované zkoušky odolnosti se současným sledováním dielektrických vlastností nebo charakteristik výbojů, které poskytnou další údaje.

Během zkoušky jsou tyto údaje užitečné pro rozhodování ve čtyřech směrech.

1. Umožňují odhadnout „vyhovující“ rozmezí.
2. Umožňují okamžité ukončení zkoušky v zařízení, pokud z monitorované vlastnosti vyplývá, že při zkoušce hrozí bezprostřední riziko selhání, díky čemuž lze v příhodném čase (s nižšími náklady) zahájit nápravná opatření.
3. Umožňují dřívější ukončení zkoušky v zařízení, pokud z monitorované vlastnosti zřetelně vyplývá dobrá výkonnost, díky čemuž lze zvýšit počet dokončených zkoušek a zlepšit celkovou účinnost provozních zkoušek.
4. Umožňují pokračovat ve zkoušce v zařízení, pokud z monitorované vlastnosti vyplývá, že „vyhovující“ rozmezí není dostatečné, díky čemuž lze zaměřit zkušební zdroje na úseky, které vyžadují nejvyšší pozornost.

Při jednoduché zkoušce odolnosti je aplikované napětí zvýšeno po předepsanou dobu na danou úroveň, obvykle 1,5 až 2,5násobek jmenovitého provozního napětí obvodu. Účelem je vyvolat poruchu na slabých místech v obvodu během aplikace zvýšeného napětí, kdy má obvod zásobovat zákazníky a kdy je dostupná energie výrazně nižší (což může být spojeno s bezpečnostním rizikem). Zkoušky probíhají v době, kdy je dopad poruchy (pokud k ní dojde) nízký a kdy lze rychle a nejučinněji provést opravy.

Při provádění monitorované zkoušky odolnosti se během výdržné doby monitorují dielektrické nebo vybíjecí vlastnosti. Údaje i jejich vyhodnocení jsou během zkoušky k dispozici v reálném čase, aby tak bylo možné učinit výše uvedená rozhodnutí. Sledované dielektrické nebo vybíjecí vlastnosti jsou podobné vlastnostem popsaným v dřívějších oddílech. Jejich realizace a vyhodnocení je však odlišná vzhledem k požadavku na pevné napětí a relativně dlouhou dobu aplikace napětí. V rámci těchto omezení lze jako ukazatele jednoduše použít svodový proud, částečné výboje (velikost a počet opakování) a Tan Delta (stabilitu a velikost).

Jak je popsáno v [13], Obr. 12, zahrnuje schéma rovněž běžně prováděnou posloupnost MWT formou krokového zvyšování napětí a doby výdrže.

Klíčovou součástí zkoušky je měření a hodnocení během zkoušky odolnosti. Krok / stoupaní napětí umožňuje vyhodnocení před zahájením zkoušky odolnosti. Tento přístup je užitečný tím, že umožňuje provozním technikům posoudit stav kabelového systému dříve, než přistoupí k MWT.

Špatný stav kabelu se může vyskytnout v jednom koncentrovaném místě (průrazu), nebo se může jednat o široce rozložené, všeobecné stárnutí.

Z tohoto důvodu může kabelový systém „vyhovět“ ve zkoušce MWT pouze tehdy, nedojde-li k dielektrickému průrazu a informace z monitorovaného zařízení jsou vyhovující. Hlavními kritérii posouzení jsou stabilní údaje (pouze lehce kolísající) a malá velikost. V této fázi je užitečné posoudit rozdíly mezi výsledky standardních měření dielektrických ztrát a vyhodnocením stejných vlastností ve zkoušce MWT.

Vyhodnocení měření dielektrické ztráty je třeba zaměřit na

- stabilitu v rámci napěťového skoku vyhodnoceného formou standardní odchylky měření TD;
- vzrůstající tendence (rozdíl střední hodnoty Tan Delta u dvou vybraných napětí) Tan Delta (střední hodnota při U_0).

Při použití monitorovacího režimu neumožňuje použité konstantní napětí vyhodnotit nárůst. Tato informace je však dostupná při použití napěťové rampy na úrovni výdržného napětí. V opačném případě nemůže být nárůst součástí standardní hierarchie monitorované odolnosti.

Podobné problémy se vyskytují u střední hodnoty TanDelta. Tuto hodnotu lze vypočítat pro celou dobu výdrže při zkoušce. Jelikož se však jedná o MWT, provádějí se zkoušky při napětích nad U_0 , což je napětí běžně používané pro standardní hodnocení Tan Delta.

Koncepce střední hodnoty Tan Delta je užitečná i při tomto vyšším napětí, klíčové hodnoty pro posouzení však nemohou být stejné jako hodnoty používané pro Tan Delta při U_0 . Tyto hodnoty budou ve skutečnosti pravděpodobně vyšší než hodnoty použité pro standardní posouzení TanDelta.

V rámci přístupu, který je zde podrobně vysvětlen, byla stabilita posouzena s ohledem na rozdíl mezi výchozí a 10minutovou situací. Doba 10 minut byla zvolena proto, že je dostatečně dlouhá pro určení základního trendu, uživateli však stále zbývá dostatek času pro aktivní rozhodnutí, zda chce zkoušku po 15 minutách ukončit.

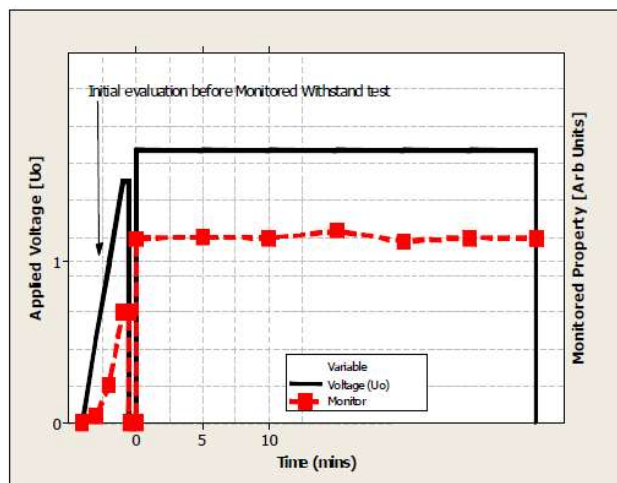


Figure 1: Schematic of a Monitored Withstand Test (black) with Optional Diagnostic Measurement (red)

Obr. 12: Diagram MWT (černý) s volitelným diagnostickým měřením (červeným) [13]

Delta) for Step (incl pure Tan Delta tests) and Hold Portions of Monitored Withstand tests

	Voltage Step Portion & Tan Delta Assessment	Voltage Hold (Withstand - Constant Voltage) Portion
Stability (Standard Deviation)	over 6 to 12 measurements at U_0	extended time at IEEE400.2 voltage level
Voltage Dependence of Tan Delta (Tip Up)	between $1.5U_0$ & $0.5U_0$	-
Tan Delta (Mean)	over 6 to 12 measurements at U_0	extended time at IEEE400.2 voltage level
Change in Tan Delta with time	-	between 0 & 10 minutes

Obr. 13: Srovnání diagnostických vlastností pro krokové a výdržné části MWT [10]

Paper Insulations (PILC) for Dielectric Loss and Monitored Withstand Modes

Condition Assessment	Tan δ Stability Measured @ U_0 [E-3] (Dielectric Loss Mode)	Tan δ Stability Measured @ IEEE Std. 400.2 Withstand levels [E-3] (Monitored Withstand Mode)
No Action Required	<0.3	<1.4
Further Study Advised	0.3 to 0.4	1.4 to 2.8
Action Required	>0.4	>2.8

Obr. 14: Kritéria pro kabely PILC [13]

Stabilita je obecně nejužitečnějším parametrem při hodnocení chování během zkoušky odolnosti. Dále je důležité poznamenat, že jsou atributy pro stoupání i výdrž podobné, avšak úrovně budou zcela rozdílné vzhledem k rozdílným napětím a dobám aplikace.

Trend během monitorovaného období. Toto jsou pravděpodobné atributy kategorií:

- plochý,
- vzestupný trend
- sestupný trend atd.
- stabilita během monitorovaného období
- monitorovaná vlastnost (střední hodnota při výdržném napětí)

V kontextu zkoušky MWT lze posouzení stavu („není potřebná žádná akce“ apod.) rovněž využít v reálném čase jako vodítko k pokračování zkoušky odolnosti. Přístup, který je aktuálně doporučován autory [13] spočívá ve využití posouzení stavu k návrhu, jakým způsobem by bylo možné modifikovat dobu zkoušky odolnosti podle normy IEEE 400.2 v závislosti na stavu kabelového systému s ohledem na dobu zkoušky:

Obr. 16 ukazuje výsledky zkoušky MWT se střídavým sinusovým VLF napětím, při níž byl po dobu 30 minut nepřetržitě monitorován Tan Delta.

Není potřebná žádná akce.	Standardní 30minutovou zkušební dobu lze snížit na 15 minut.
Další zkoumání	Zachovat standardních 30 minut
Potřebná akce	Standardní 30minutovou zkušební dobu je třeba zvýšit na 60 minut.

Table 3 Test Time Guidance and Condition Assessment for Monitored Withstand tests on MV cable systems

Test Time Guidance	Condition Assessment	Change in Tan Delta between 0 and 10 mins (E-3)		VLF-TD Stability (standard deviation) at Maintenance Level [10 ⁻³]		Mean VLF-TD at Maintenance Level [10 ⁻³]
PE-based Insulations (i.e. PE, XLPE, WTRXLPE)						
Reduced to 15 Mins	No Action Required	<0.25	and	<0.25	and	<5
Retain 30 Mins	Further Study Advised	>0.25 and <17	and	>0.25 and <6	and	>5 and <45
Extended to 60 Mins	Action Required	>17	or	>6	or	>45
Paper Insulations (i.e. PILC)						
Reduced to 15 Mins	No Action Required	<1.3	and	<0.7	and	<75
Retain 30 Mins	Further Study Advised	>0.13 and <4	and	>0.7 and <3.5	and	>75 and <135
Extended to 60 Mins	Action Required	>4	or	>3.5	or	>135

Obr. 15: Pokyny pro zkušební dobu a posouzení stavu MWT

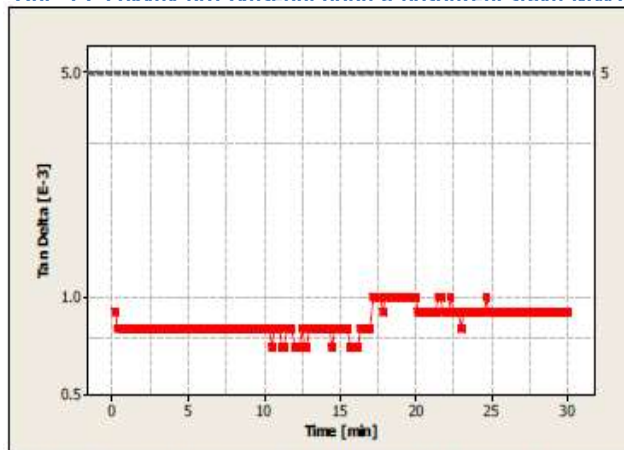


Figure 4: Tan δ Monitored Withstand Data on service aged XLPE cables

Obr. 16: Tan Delta MWT u XLPE kabelu zestárlého v provozu [13]

Při aplikaci kritérií v příkladu dle Obr. 16 vedou zkušební výsledky k následujícímu hodnocení:

Ve zkoušeném úseku nedošlo k dielektrickému průrazu.

Změna mezi 0 a 10 min: 0 E-3

Stabilita: 0.79 E-3

Tan Delta: 0.90 E-3

Vyhodnocení monitorované zkoušky odolnosti pro tento výkon bude pravděpodobně „není potřebná žádná akce“, a **zkušební dobu bude možné snížit na 15 minut.**

V tomto případě se podnik rozhodl zkušební dobu nezkracovat, ačkoli to bylo v tomto případě možné.

Výzvou pro zkoušku MWT je, obecně řečeno, nalezení způsobu, jak získat dostupné zkušební údaje a jejich zpřístupnění tak, aby pokrývala co nejširší rozsah situací, které se mohou v oblasti vyskytnout. [13]

Studie publikovaná na 8. mezinárodní konferenci o izolaci silových kabelů, Jicable 2011, byla první oficiální prací, která se zabývala klíčovými otázkami souvisejícími s jednoduchou zkouškou odolnosti. Tato studie ukazuje praktický přístup, který mohou podniky realizovat.

Poslední kapitola této knihy obsahuje několik praktických případových studií, které ukazují případy, v nichž by byla MWT užitečná k rozeznání těsně „uspokojivých“ výsledků jednoduché zkoušky odolnosti.

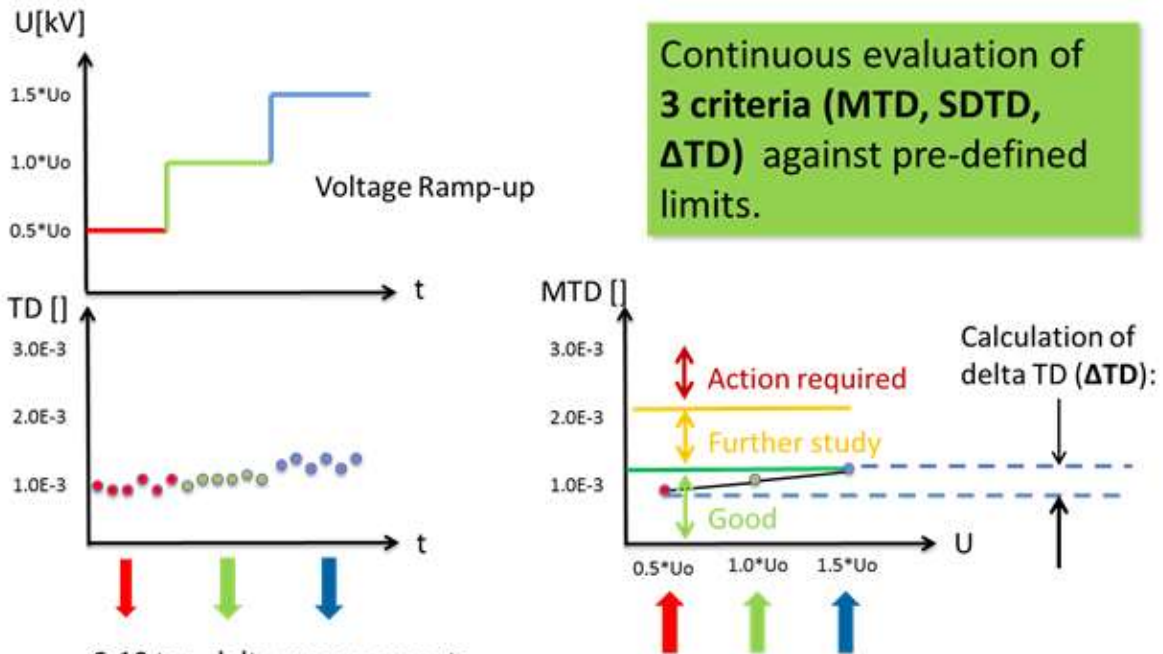
Podnik uvedený v případové studii uvítal základní vstup poznatků, které práce nabídla [13]. Potíže pozorované v rámci posledních případových studií jsou dány komplexním charakterem, jaký mohou kabelové sítě mít. V hustě zalidněných městech s velkou populací a vysoce rozvinutými velkoměstskými obvody se kabelové soustavy vyvíjely během posledních 50 let. Počátkem 80. let byla zaváděna první generace kabelů XLPE. Kabelové úseky dřívějších kabelů PILC byly vyměněny. V pozdější etapě, na konci 80. let, začala být zaváděna druhá generace XLPE. V současnosti obsahují kabelové soustavy úseky se starými PILC kabely, s XLPE kabely 1. generace, které byly později nazvány „kabelovými úseky náchylnými k tvorbě vodních stromečků“, XLPE kabely 2. generace atd., atd. Kvůli této smíšené konstelaci lze pro tyto smíšené kabely velmi obtížně stanovit hodnotící kritéria. Určité úseky s kabely náchylnými k tvorbě vodních stromečků nelze občas identifikovat jako kritické, jelikož jsou zahrnuty v celkové svodové situaci úseků PILC. Stárnutí v důsledku vodních stromečků nelze detekovat měření PD. Také v případech, kdy hodnoty TD ukazují dokonce relativně dobrý stav, nebude viditelné potenciální riziko způsobené podmínkami vysokého provozního stárnutí konkrétního úseku WTPC. Při pochopení těchto komplexních situací používá podnik stále jednoduchou zkoušku odolnosti dle IEEE400.2. Aby se předešlo přetížení v nežádoucím rozsahu a získal čas pro zlepšovateľské práce, aplikuje se minimální doba 15 minut.

Po provedení uvedeného postupu údržby bylo zjištěno, že strategií 15min VLF zkoušky při $2U_0$ lze zaručit výkonnost pouze s přibližně 60% jistotou. Jinak řečeno, 40 % zkoušených kabelů prošlo jednoduchou zkouškou odolnosti ve „vyhovujícím“ rozsahu. V extrémních případech došlo k poruše kabelu během několika hodin po obnovení napětí.

Provedením monitorované zkoušky odolnosti je možné výpadkům při zatížení brzy po obnovení napájení předejít.

Shrnutí – Monitorovaná zkouška odolnosti MWT

1. Stage: Ramp-up

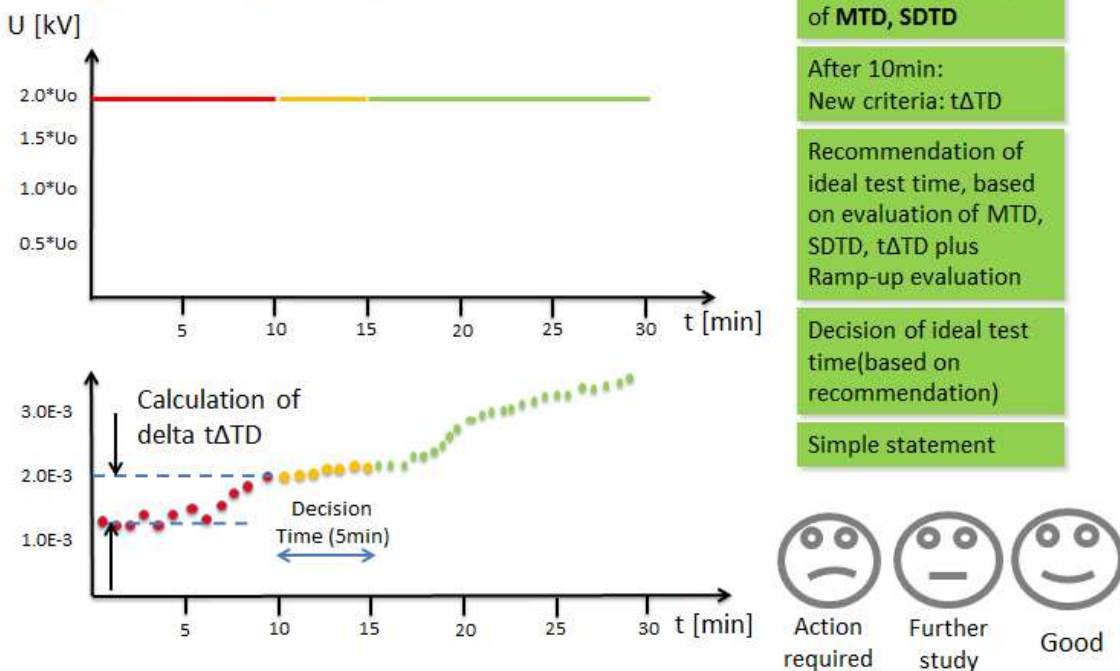


6-10 tan-delta measurements:

- Calculation of mean value (MTD) and plot the MTD versus test voltage
- Calculation of standard deviation (SDTD)

Obr. 17: Zobrazení fáze stoupání MWT

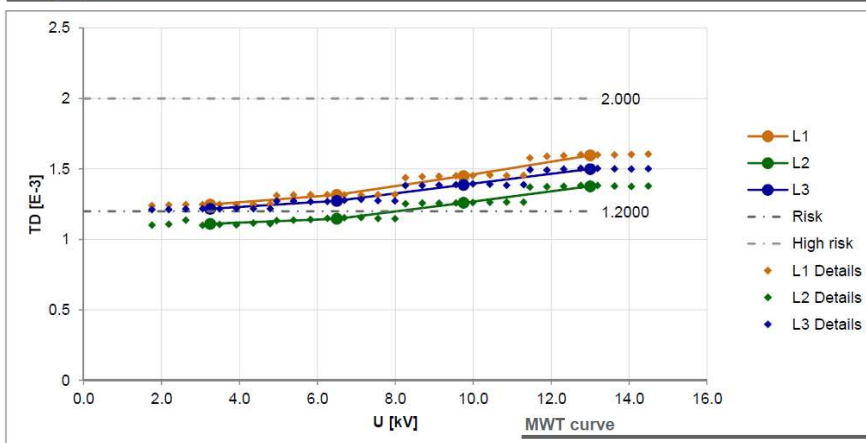
2. Stage: MWT (or hold)



Obr. 18: Zobrazení fáze výdrže MWT /

Příklad MWT 1: kabel XLPE v dobrém stavu

Ramp-up curve



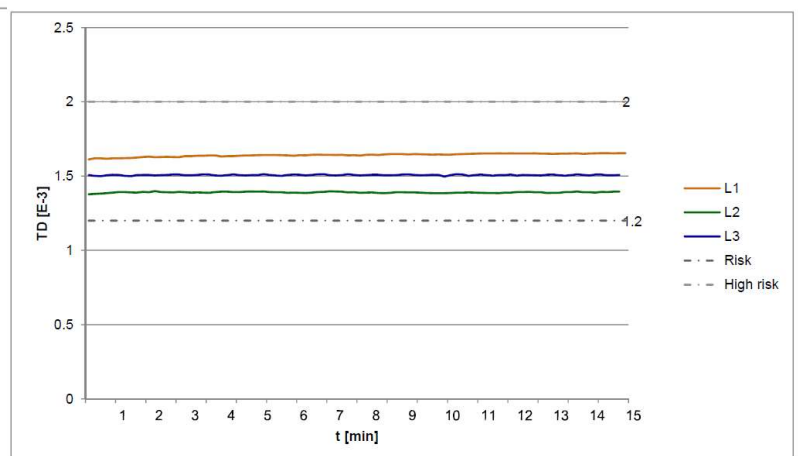
Obr. 19: Ref. 8438CM, stoupání, XLPE, stabilní stav

Stoupání

- Nízké MTD
- Nízké SDTD
- Nízké Δ TD

MWT / fáze výdrže

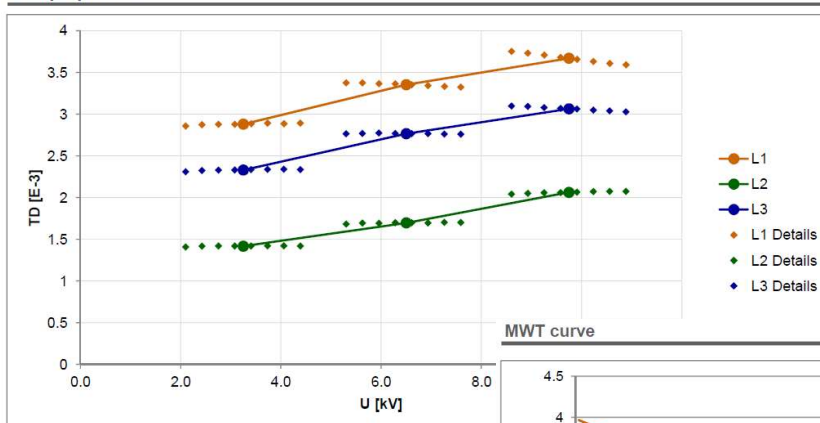
- Nízké MTD
- Nízké $t\Delta$ TD
- Nízké SDTD



Obr. 20: Ref. 8438CM, MWT/ fáze výdrže, XLPE, doba stability

Příklad MWT 2: kabel XLPE ovlivněný vlhkostí

Ramp-up curve



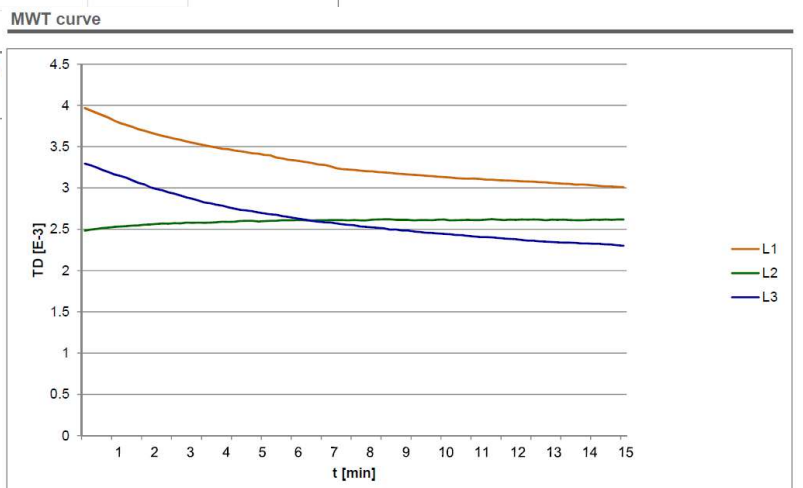
Obr. 22: Ref. 12518CM, stoupání, klesající trend

Stoupání

- zvýšené MTD
- zvýšené SDTD
- klesající Δ TD

MWT / fáze výdrže

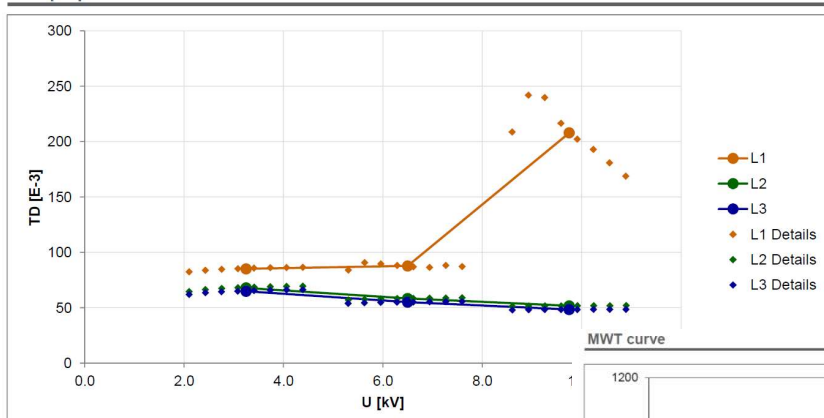
- zvýšené MTD
- vysoké $t\Delta$ TD
- zvýšené SDTD



Obr. 21: Ref. 12518CM, MWT/ fáze výdrže, XLPE s klesajícím $t\Delta$ TD

Příklad MWT 3: smíšený kabel se starým PILC, selhání spoje během zkoušky

Ramp-up curve



Obr. 23: Ref. 3730-31, stoupání, vodiví cesty & vlhkost v L klesající DTD, starý PILC

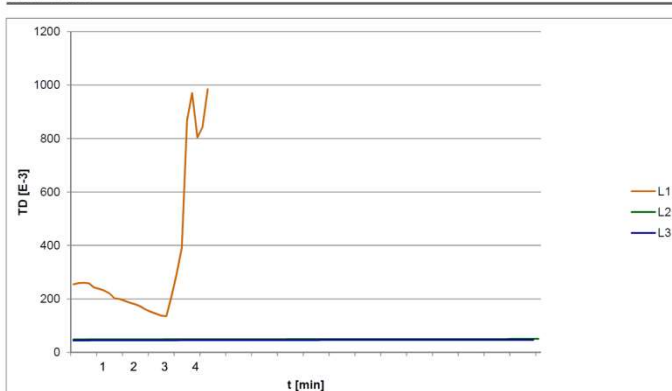
Stoupání

- Vysoká hodnota MTD, vysoce provozně zestárlý PILC
- Velmi vysoká hodnota MTD v L1 při $1.5U_0$
- zvýšené SDTD
- klesající ΔTD v L2, L3... indikuje stárnutí PILC

MWT / fáze výdrže

- stabilní MTD v L2 a L3
- klesající $t\Delta TD$ v L1, indikace vlhkosti ve spoji
- průraz po 4 minutách

MWT curve



Obr. 24: Ref. 3730-31, MWT / fáze výdrže, průraz ve spoji po 4 minutách

4 Praktická doporučení pro realizaci zkušebních napětí v souladu s normami

Zkouška po uložení			Kabel 66 kV	38 kV U _o	Kabel 33 kV	19 kV U _o	Kabel 11 kV	6.3 kV U _o
CENELEC/ VDE HD 620 IEC 60502	3xU _o	60 min	n.a.	3xU _o	57kVrect. 42.5kVrms	3.0xU _o 2.2xU _o	19kVrms	3xU _o
IEEE400.2- 2013	2- 3xU _o	15-60 min	n.a. (80 kV)	2.1xU _o	40 kVrms	2.1xU _o	18 kVrms	2,8xU _o
MWT PD	2xU _o	15-60 min	42.5kV	1.1xU _o	40 kVrms	2.1xU _o (max. 2.2U _o)	18 kVrms	2,8xU _o

Údržba								
VDE	3xU _o	10 min	n.a.	3xU _o	57 kVrect. 42.5 kVrms	3.0xU _o 2.2xU _o	19 kVrms	3xU _o
IEEE400.2	2- 3xU _o	15-60 min	60kVrect	1.6xU _o	30.4 kVrms	1.6xU _o	14 kVrms	2,2xU _o
MWT TD	Do 2xU _o 0.5 – 1.0 – 1.5 ::2.0- 2.2U _o	15-60 min	Max. 42.5 kVrms	Max. 1.1xU _o 0.5 -0.75 – 1.0 - 1.1xU _o	40.4 kV (0.01- 0.1Hz)	2.0xU _o	14 kVrms	2,2xU _o
TD diagnostika	Do 1,5xU _o	3 kroky	Max. 42.5 kVrms 1.0U _o =38 kVrms	Doporučeno 0.5 -0.75 – 1.0U _o	30.3 kVrms	1,5xU _o	9,5 kVrms	1,5xU _o
PD diagnostika	Do1,7x U _o	4 kroky	Max. 42.5 kVrms 1.1U _o = 42.5 kVrms	Max. 1.1xU _o 0.5 -0.75 – 1.0 - ::1.1xU _o	33 kVrms	1,7xU _o	11 kVrms	1,7xU _o

Tabulka 4: Praktická realizace zkušebních napětí s ohledem na zvolený zkušební přístroj Viola TD PD

Tabulka je založena na zkušebním systému **Viola TD PD**

kVrms Truesinus®

kVrect ... špičkové napětí, obdélníkové

5 Diskuse o dielektrické odezvě v kabelech XLPE/PILC

Při zhoršování stavu izolačního systému dochází k nárůstu ztrát a poklesu dielektrické pevnosti. Dielektrická odezva v celém svém rozsahu je nástroj, kterým lze odhalit zhoršování, a tím i stav elektrické izolace jakéhokoli druhu. Vnikne-li do polymerové izolace voda, vznikají vodní stromečky, které vlivem elektrického pole rostou. Vodní stromečky jsou již dlouho považovány za nejrizikovější faktor ohrožující životnost rozvodných kabelů XLPE a za hlavní příčinu poruchy izolace.

Vodní stromečky zvyšují $\tan \delta$ a kapacitanci a snižují elektrickou pevnost kabelů s polymerovou izolací. Voda a vodní stromečky navíc modifikují svodové proudy, absorpční stejnosměrný proud, polarizační a depolarizační proud i vybíjení zbytkového napětí a zpětné napětí. Ukázalo se, že je provozní měření některých z těchto parametrů vhodným prostředkem k detekci degradace a přítomnosti vodních stromečků. Mnohé měřicí metody však mají své nevýhody, které zabránily jejich širšímu uplatnění. Například měření $\tan \delta$ lze získat přehled o celkovém stavu kabelového systému, nikoli o poškozené části kabelu. Také svodový proud ve spojích a koncokách je zahrnut do svodového proudu celého kabelového systému.

Stávající metody diagnostiky kabelů, jako jsou měření stejnosměrného svodového proudu nebo $\tan \delta$, vyžadují přerušení dodávky elektřiny a rozsáhlé instalační práce. Z těchto důvodů se v Japonsku používají k detekci zhoršování stavu vlivem vodních stromečků některé provozní on-line diagnostické metody, například metoda stejnosměrného komponentního proudu nebo stejnosměrná superpoziční metoda. Přesnost metody stejnosměrného komponentního proudu a stejnosměrné superpoziční metody se poté porovná. On-line diagnostické metody lze nakonec považovat za stejně účinné jako metoda stejnosměrného svodového proudu. Metoda založená na stejnosměrné superpozici však nemusí být použitelná na všechny kabely v provozu, jelikož pomocí nízkého napětí (< 100 V) lze detekovat vodní stromeček u některých kabelů, zatímco u jiných je potřebné superponované napětí 10 kV nebo vyšší. U těchto vysokých stejnosměrných napětí lze očekávat průraz

Novou metodou diagnostiky silových kabelových systémů je kombinace měření $\tan \delta$ a celkového harmonického zkreslení. Tato metoda se však stále nachází na laboratorní úrovni. Význam relativních hodnot $\tan \delta$ a celkového proudu harmonického zkreslení v izolaci zatím není plně pochopen. Jak ukazují výsledky studií urychleného stárnutí, roste $\tan \delta$ a vodní stromečky v polymerových kabelech s dobou zrychlení a s napětím, což má obojí význam. Zrychlení při 16 kV po dobu 2000 h však například vedlo k většímu zvýšení $\tan \delta$ než zrychlení při 20 kV po dobu 1000 h. Dokonce i po 2000 h zrychlení při 12 kV je tvorba vodních stromečků výraznější než po 1000 h při 20 kV.

Hodnoty $\tan \delta$ a kapacitance kabelu s vodními stromečky (např. při 70 °C), naměřené při silové frekvenci (50 Hz), avšak při proměnlivém napětí, jeví tendenci klesat s rostoucím napětím. To je především důsledkem ohřívání vody ve stromečcích dlouhým působením měřicího napětí (ručně vyvážený Scheringův můstek). Důvodem je pokles relativní permitivity vody s teplotou. ($\epsilon_r = 80$ při 20 °C a např. 60 při 60 °C); při dlouhodobém působení měřicího napětí se voda ohřívá. Tento účinek tak není skutečný, nýbrž se jedná o důsledek měřicích podmínek, a je reverzibilní. Také průměry kanálku vodního stromečku se důsledkem ohřevu zmenšují, což vede k poklesu kapacitance a $\tan \delta$.

$\tan \delta$ a kapacitance jsou ve velmi dobrém vzájemném vztahu, nezávisle na podmínkách.

Dielektrická odezva jako diagnostický nástroj pro systémy silových kabelů

Mnohé výzkumné týmy prováděly měření dielektrické odezvy systémů s izolací z olejového papíru, a to v časové, nebo frekvenční oblasti. Dielektrická odezva v obou oblastech poskytuje nové diagnostické metody pro kontrolu kvality středně- a vysokonapěťových kabelů. Informace získané ve frekvenční nebo časové oblasti jsou však ekvivalentní pouze tehdy, je-li izolační systém lineární. Měření v obou oblastech navíc prokázala, že by měření nelinearity v dielektrické odezvě mohlo být základem pro diagnostiku degradace kabelu vodními stromečky. Nelinearita dielektrické odezvy byla předmětem studia mnohých dizertačních prací.

Měření ztrátového úhlu kabelů s olejovým papírem v závislosti na frekvenci se za normálních okolností provádí pomocí napájení s nízkým napětím. Ztrátový úhel se zvyšuje s vyšším obsahem vlhkosti v izolaci. Toto chování však není zřetelné v celém frekvenčním rozsahu. Křivky ztrátového úhlu odpovídající různému obsahu vlhkosti se mohou navzájem protínat. Ztrátový úhel má svou minimální hodnotu, která vykazuje tendenci zvyšovat se s rostoucím obsahem vlhkosti. To znamená, že při hodnocení izolačního stavu různých impregnovaných kabelů v závislosti na obsahu vlhkosti lze vycházet z minimálního ztrátového úhlu.

Polarizační (nabíjecí) a depolarizační (vybíjecí) proudy v izolaci z olejového papíru rostou s obsahem vlhkosti. Kromě funkce dielektrické odezvy umožňuje měření polarizačních a depolarizačních proudů v časové oblasti také odhad vodivosti zkoušeného předmětu. Zvýšeným obsahem vlhkosti se zvýší vodivost. Je důležité poznamenat, že vodivost systému z olejového papíru výrazně závisí na teplotě. Bez znalosti teploty nelze k odhadu obsahu vlhkosti použít žádné jednoduché kritérium založené na vodivosti. Dielektrická odezva poskytuje přehled průměrného stavu zkoumaného izolačního systému, neumožňuje však lokalizaci možných oblastí zhoršeného stavu. Pro odhad zbývajících životnosti izolačního systému na základě DR nebo jiných měření jsou potřebné další výzkumy. [14], [15]

6 Kombinovaná diagnostika kabelů TD/PD

Systém BAUR k VLF diagnostice je jedinečné zařízení na trhu, které se během posledního desetiletí osvědčilo v mnoha energetických podnicích. Spolu s VLF generátory BAUR nabízí kompaktní zkušební a diagnostický systém, který je svou spolehlivostí, výkonem a účinností nepřekonatelný.

Nejdůležitější výhody zařízení BAUR lze shrnout následovně:

Diagnostické zařízení BAUR **TanDelta** je odolné a **nezávislé na vnějších vlivech**. Systém se dobře osvědčil při více než 100'000 měření po celém světě. Díky tomu mohou všichni zákazníci profitovat z ohromné databáze. Celosvětově je v provozu více než 300 systémů. Měření trvá pouze 10 min na jednu fázi, nebo přibližně 1 hodinu pro kompletní systém včetně přípravy a dokončení. Používání a obsluha systému jsou snadné. Interpretace výsledků probíhá obvykle automaticky na počítači.

Systém BAUR **PD** i systém TD tvoří **integrováný systém**, který pouze nepatrně navýší hmotnost a rozměry generátoru.

Současné provádění VLF zkoušky a PD diagnostiky je velmi užitečné **v rámci zkoušení během instalace a údržby**. BAUR PD je technicky nejpokročilejší systém na trhu. Spolehlivost údajů je prokázána více než 400 systémy po celém světě. [6]

true[®] sinus[®]



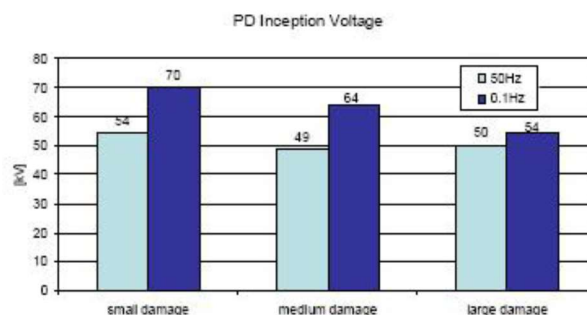
Obr. 25: BAUR VLF TD, série: PHG80 TD (57 kVrms); VIOLA TD (42,5 kVrms); FRIDA TD (24 kVrms)

6.1 Proč používat VLF diagnostiku

6.1.1 Ztrátový činitel: srovnání VLF a silových frekvencí

Vzhledem k časovému účinku depolarizace jsou **vodní stromečky (WT) v pevném dielektriku citlivější vzhledem ke ztrátovému činiteli při použití nižších frekvencí.** Klasifikace stavu stárnutí kabelu jako dobrého, středního nebo vážně narušeného vlivem WT je při použití VLF účinnější než při 50Hz nebo proměnlivých frekvencích.

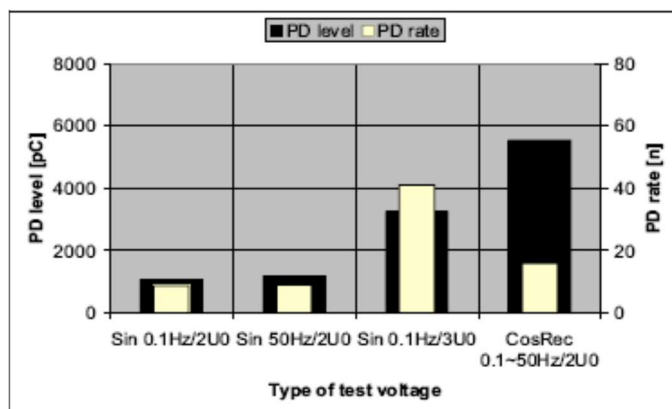
Simulace ztrátového činitele pomocí matematických vztahů, např. **na základě činitele útlumu oscilační vlny, plně závisí na délce měřeného kabelu.** Podrobnější odpověď při diagnostice vniknutí vody do spojů nebo koncovek mohou navíc poskytnout hodnoty Tan Delta (TD) a delta TD při nárůstu a poklesu napětí [14]. Uživatel se musí spolehnout na odpovídající databázi, a to zejména v případě náročných kritérií, která jsou nákladná a vyžadují údržbu. Kalibrační a ověřovací postupy je třeba provádět pečlivě; chybná rozhodnutí v terénu mohou být velmi nákladná. [1]



Obr. 26: Počáteční napětí PD u kabelu XLPE 110 kV (9,10), [1]

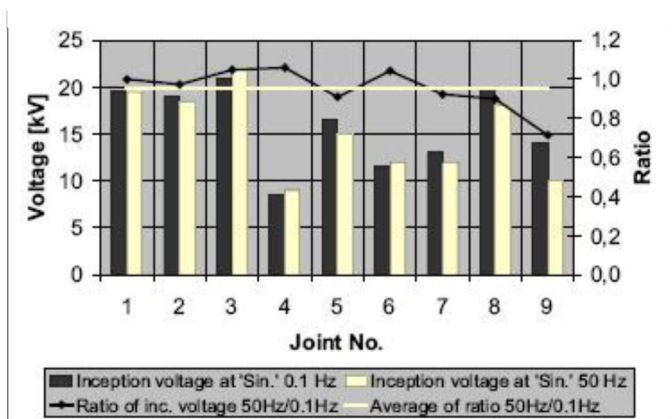
6.1.2 PD: srovnání VLF a silové frekvence

Obrázek 27 ukazuje srovnávací charakteristiky chování částečných výbojů při 0,1 Hz a 50 Hz. Vyplyvá z nich, že VLF při 0,1 Hz má **nejvyšší shodu ve srovnání s 50Hz**, zatímco kosinový-obdélníkový tvar VLF vlnění nebo oscilační vlnění OWTS jsou na úrovni PD a hodnot výrazně odlišné.



Obr. 27: Úroveň PD se sinusovým tvarem vlnění 0,1 Hz, silové frekvence 50 Hz a kosinové-obdélníkové vlnění 0,1 Hz [16]

Obrázek 28 ukazuje výsledky na základě sinusového tvaru vlnění. Docela podobné výsledky lze nalézt, pokud jde o PDIV. **Ve všech případech kolísá poměr o méně než 10 %.** Jak je vidět, vykazuje VLF srovnatelné výsledky také při vyšších úrovních napětí do 80 kV. Velmi podobné vzorce PD při vyšších úrovních sinusového napětí byly zjištěny u různých umělých poruch spojů u XLPE kabelů 110 kV. [16]



Obr. 28: Spouštěcí napětí částečných výbojů ve srovnání s VN zdrojem [16]

7 Měření ztrátového činitele TD - TanDelta

7.1 Základní informace o ztrátovém činiteli Tan δ (TD)

Tan δ určuje stupeň reálné ztráty výkonu v dielektrickém materiálu, a tím i jeho ztráty.

V případě podzemních kabelů slouží tato zkouška spíše k měření celkové ztráty než ztráty způsobené konkrétní poruchou. Měření Tan δ proto představuje metodu diagnostiky kabelu k všeobecnému posouzení stavu izolace kabelového systému. Tan δ lze měřit u všech typů kabelů; výsledky zkoušky je však třeba posuzovat s ohledem na izolační materiál konkrétního typu kabelu a příslušenství.

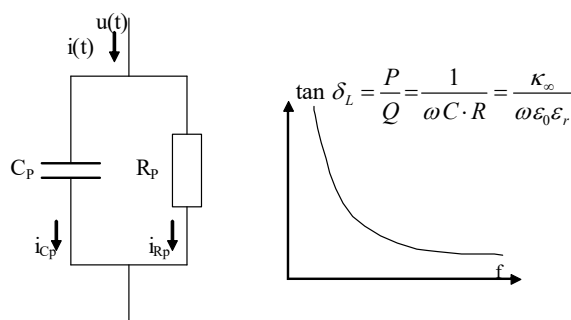
V rámci modelování je izolační systém kabelu představován jednoduchým ekvivalentním obvodem tvořeným dvěma prvky: odporem a kondenzátorem, jak je vidět na Obr. 30.

Po zavedení napětí do kabelu bude celkový proud (I) tvořen proudem kondenzátoru (I_C) a proudem odporu (I_R). Tan δ je poměr proudu odporu a proudu kondenzátoru. Úhel δ je úhel mezi součtovým proudem a nabíjecím proudem, pokud jsou zobrazeny jako fázory. [12]

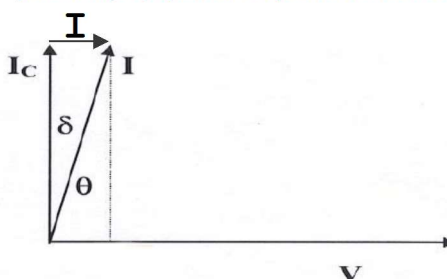
Měření hodnoty Tan δ se rovněž často označuje jako měření Tan Delta, TD, ztrátového činitele nebo rozptylového činitele.

Obr. 31 ukazuje různé hodnoty Tan δ pro různé kabely s polymerovou izolací. Z hodnot vyplývá, že hodnota Tan δ při 0,1 Hz je odlišná od hodnoty při 50 Hz.

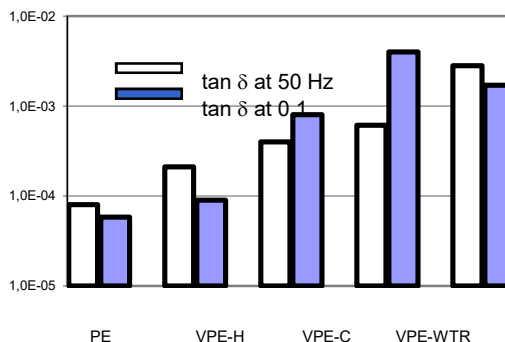
Diagnostické metody, jako je měření částečných výbojů (PD) a ztrátového činitele (TD) jsou doporučovány za účelem kontroly stavu izolace zatížené vysokým napětím s tvarem vlnění v souladu s normou IEC 60060-3. Diagnostické zkoušky, od úrovně napětí **0,5U₀ až do maximální hodnoty 2U₀**, jsou v praxi běžné, díky čemuž jsou **srovnatelné s hodnotami mezi fázemi a historickými údaji**. Maximální úroveň diagnostického napětí je třeba pečlivě zvážit, aby se předešlo vzniku poruch kabelů, zejména u starších kabelových systémů. Není-li znám stav kabelu nebo v klíčové etapě by aplikované **napětí nemělo nikdy dosáhnout vyšších mezních hodnot, než je doporučeno výrobcem nebo uživatelem**.



Obr. 29: Zjednodušený diagram a jednou křivkou, používaný k popisu DPF u jediné frekvence [12]



Obr. 30: Výňatek z IEEE 400.2-2001, obr. 6 – Vektorový diagram pro dielektrický materiál s vysokou ztrátou [12]

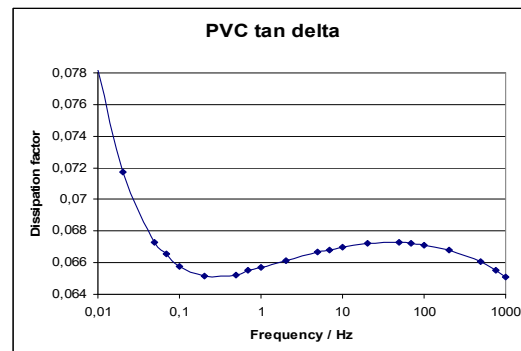
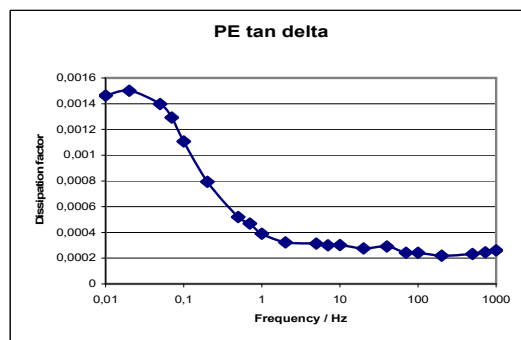


Obr. 31: Ztrátový činitel nových SN kabelů s polymerovou izolací při 0,1 Hz / 50 Hz, (H: Homopolymer, C: Kopolymer, WTR: zpomalovač vodních stromečků) [Kus, 1995] Obr. 4 [2]

Aby se předešlo možnému průrazu izolace, může pracovník zvolit úroveň napětí hluboko pod hodnotou dielektrické pevnosti, nebo alespoň pro dosažení tip up kritérií TD nebo úrovně spouštěcího napětí částečných výbojů. [2]

Podle Obr. 32 závisí ztrátový činitel výrazně na frekvenci. Vzhledem k rezonanční frekvenci polarizace prostorového náboje však jsou naměřené hodnoty porovnatelné. U různých izolačních materiálů může být hodnota $\tan \delta$ vyšší nebo nižší.

Na Obr. 34 je vidět vysoká citlivost měření $\tan \delta$ při 0,1 Hz na vodních stromečcích, na rozdíl od měření s frekvencí 50 Hz. Obr. 33 ukazuje, že $\tan \delta$ při 0,1 Hz výrazně roste s úrovní zkušebního napětí. Výsledkem bylo stanovení níže uvedených mezních hodnot pro kabely XLPE a PE. [2]



Obr. 32: Spektroskopie ve frekvenční oblasti u PE a PVC kabelů zestarálých v provozu [2]

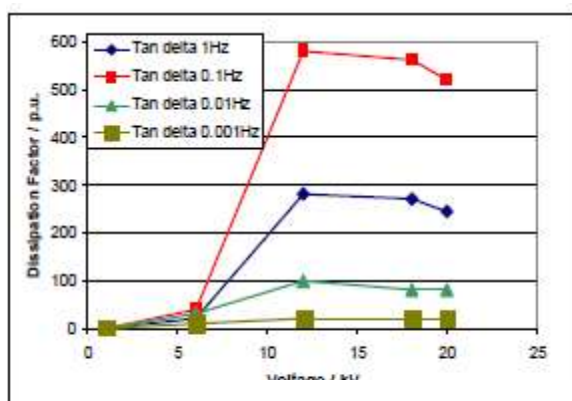
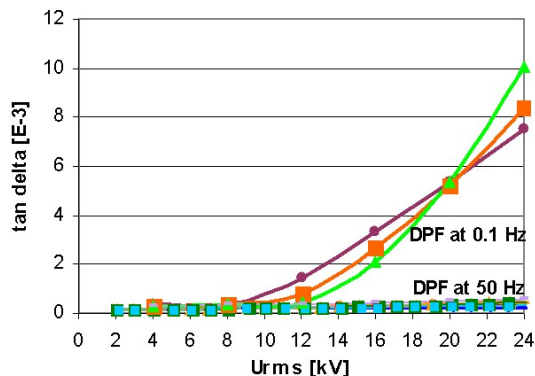


Fig. 5: Compendium
[Kus,
Obr. 33: Srovnání
kabelu vážn
[2]

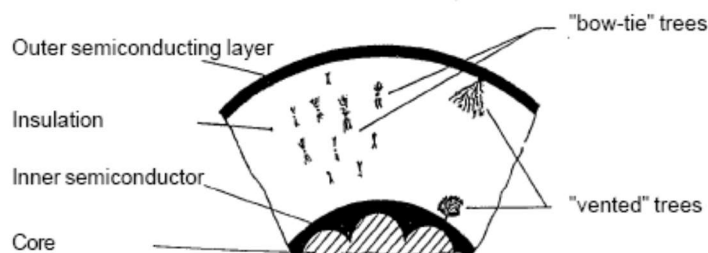


Obr. 34: Nelinearita DPF u XLPE kabelů zestarálých v provozu, při 0,1 Hz a 50 Hz, vykopáno 2008 [2]

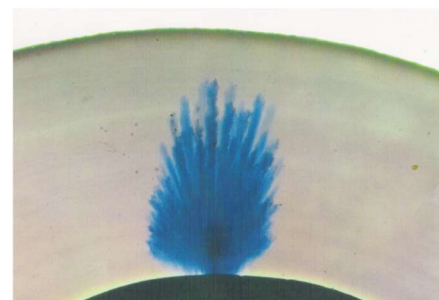
7.2 Vodní stromeček – elektrický stromeček

Jak ukazují zkušenosti posledních let, je tvorba vodních stromečků hlavním faktorem určujícím trvanlivost, a to zejména u polymerových kabelů první generace. Zatímco instalační a montážní závady lze obvykle lokálně opravit, vodní stromečky se vyskytují na místech, kde lze mnohdy dosáhnout prodloužení životnosti zařízení pouze výměnou úseků nebo chemickou renovací. Navzdory mnohým teoriím je tvorba vodních stromečků jevem, jehož fyzikální podstata dosud nebyla plně vysvětlena. Vodní stromečky jsou v podstatě kanálikovité útvary, které se vyvíjejí ve formě drobných stromečků v izolačním materiálu působením vlhkosti a elektrických polí vyzařovaných v místech poruch. Elektrické podmínky, které v těchto vodních stromečcích převažují a jsou prostým okem většinou neviditelné, se liší od podmínek v neporušeném okolním izolačním materiálu, a právě tuto vlastnost lze využít k jejich měření. Rozvoj vodních stromečků je proces trvající několik let. Vodní stromečky se mohou vyskytovat v celém kabelu, aniž by snižovaly jeho funkční kapacitu. Kritická fáze nastává po překročení intenzity pole ke vzniku PD ve špičkách vodních stromečků. Protože vodní stromečky ovlivňují svodový proud podél kabelu, lze je určit měřením TanDelta. Jelikož je nedoprovázejí částečné výboje, nelze vodní stromečky jako částečné výboje lokalizovat.

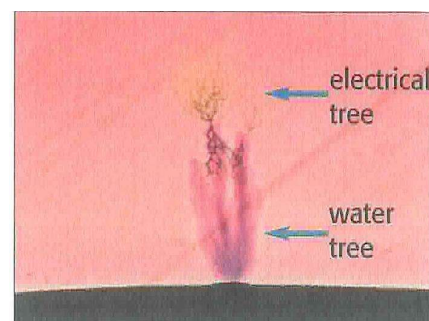
Na rozdíl od vzniku vodních stromečků, je elektrické stromečkování proces, k němuž dochází pouze v místech s vysokou lokální intenzitou elektrického pole s následnou sérií částečných výbojů. Výsledné struktury s dutými kanálky jsou však viditelné prostým okem (Obr. 39). Konečný průraz izolační cesty ovlivněné elektrickými stromečky je někdy otázkou minut nebo hodin.



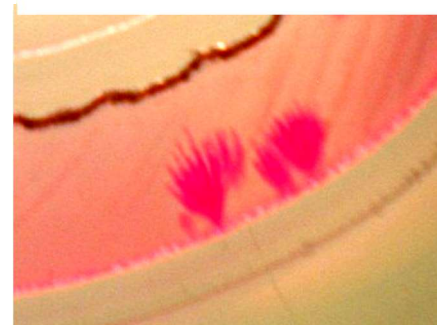
Obr. 37: Ilustrace „motýlkovitých“ a „odvětraných“ stromečků



Obr. 36: Vodní stromeček, kanálikovitá struktura



Obr. 35: Vodní stromeček s vyvíjející se úrovní elektrického stromečku, aktivita PD

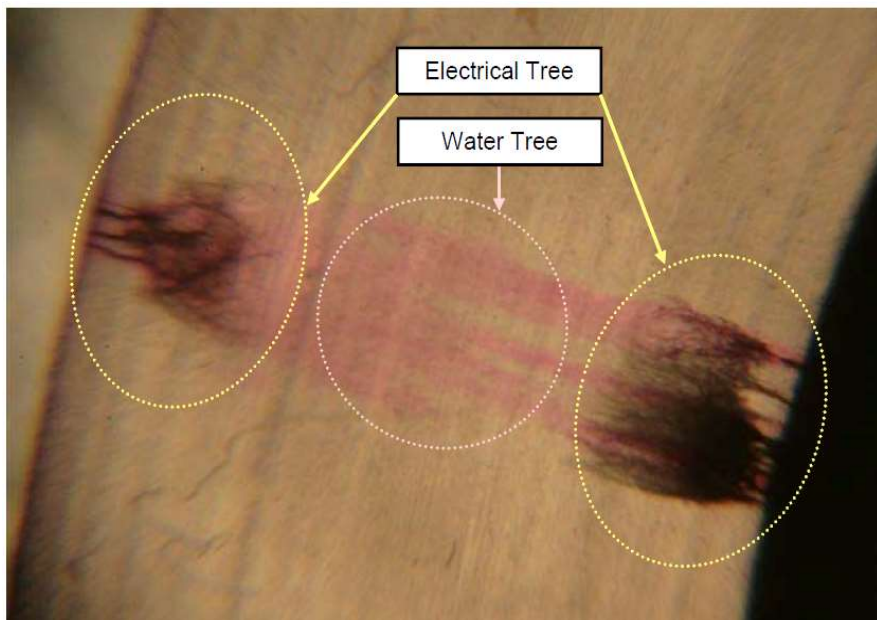


Obr. 38: Vodní stromeček, kanálikovitá struktura

Na rozdíl od vodních stromečků lze elektrické stromečky detekovat měřením PD.

Jelikož dlouhé vodní stromečky v izolačním materiálu pravděpodobně povedou ke vzniku elektrických stromečků, lze je rovněž využít k měření stavu stárnutí kabelu s platovou izolací. Diagnostická metoda nemá poskytnout pouze hodnocení „vyhovuje/nevyhovuje“, nýbrž musí také vyhodnotit celkový stav kabelové izolace a poskytnout naměřené hodnoty, které budou dobře odpovídat „koncentrací“ dlouhých vodních stromečků. Ačkoli tento „náhled“ do izolace kabelu může nabídnout pouze **celkový výsledek**, lze v mnoha případech při použití náležitých diagnostických metod odhalit významné podobnosti mezi výsledky měření a skutečným stavem kabelu.

Čím je vyšší ztrátový činitel izolace, tím nižší je dielektrická pevnost.



Obr. 39: Snímek aktuálního vodního a elektrického stromečku po rozřezání kabelu (průřez XLPE)



Obr. 41: Stará izolace XLPE, dutinky v kabelu XLPE, 115 kV



Obr. 40: Nedostatečné odplynění kabelu ve výrobě, po 14 měsících v provozu

7.3 Měření $\tan \delta$ u starých kabelů v provozu

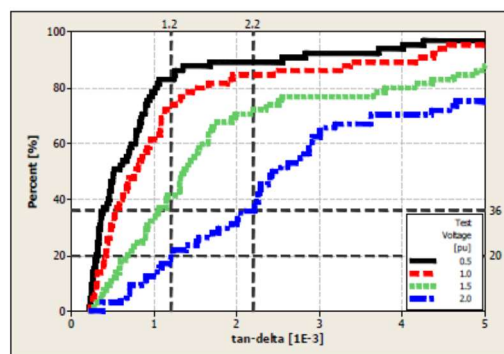
Během několika posledních let začala také většina mimoevropských průmyslových zemí používat diagnostické směrnice zavedené v Evropě. Vzhledem k různému provedení jednotlivých kabelů se stalo otázkou zkušební napětí do $2U_0$. Následně provedl NEETRAC řadu provozních zkoušek a výzkumných prací. Jejich výsledky a zkušenosti z nich jsou shrnuty v následující kapitole.

Tento oddíl se zabývá měřeními $\tan \delta$ prováděnými v terénu. Zkoušky proběhly v jednom z podniků, které se účastní projektu CDFI. Vzhledem k důvěrnému charakteru údajů zde není jeho název uveden. Tento podnik se rozhodl provést měření u kabelového systému 25 kV XLPE přímo uloženého v zemi, který byl původně provozován s napětím 15 kV, které bylo později v roce 2006 zvýšeno na 25 kV. Po povýšení systému se vyskytlo značné množství poruch a podnik vážně uvažoval o celkové výměně postižených dílčích úseků.

Měření $\tan \delta$ byla provedena při 0,5, 1,0, 1,5 a 2,0 x U_0 . Obr. 42 znázorňuje souhrnné distribuční funkce provozních údajů o $\tan \delta$ pro všechna zkušební napětí.

Z výsledků vyplývá, že pokud je posouzení prováděno podle hodnot uvedených v normě IEEE 400 (článek 8.4) [12], považuje se 64 % kabelů za vysoce poškozené, 16 % je zastaralých, a pouze stav 20 % kabelů lze považovat za dobrý.

Tyto podíly se zdají extrémní, jelikož byly po provedení zkoušky vedeny na místě záznamy a až do dnešního dne se žádné další poruchy nevyskytly. Tato zkouška byla provedena v červenci 2006. Podobných výsledků lze dosáhnout při hodnocení údajů s využitím „tip-up“ kritérií. To může naznačovat, že hodnoty uvedené v normě jsou pravděpodobně příliš konzervativní nebo je k posouzení potřeba více charakteristik.



Obr. 42: Kumulativní distribuční funkce TanDelta provozních údajů pro měření kabelu >10360 m [17]

Vliv některých terénních podmínek na interpretaci s využitím standardního ekvivalentního obvodu:

Měření $\tan \delta$ jsou nejčastěji interpretována pomocí jednoduchého obvodu s paralelně zapojeným odporem a kapacitancí. Tento ekvivalentní obvod zahrnuje všechny prvky po celé délce do prvků jediného jednoduchého obvodu. Z toho by mělo být jasné, že pro správnou interpretaci je třeba použít správný ekvivalentní obvod. V průběhu zde popsané práce bylo zjištěno, že minimálně ve třech důležitých případech nemusí být předpoklad jednoduchého ekvivalentního obvodu zcela přiměřený:

- přítomnost částečných výbojů (PD);
- zkorodované nulové vodiče;
- nerovnoměrná degradace vlivem vodních stromečků.

Při laboratorních měřeních bylo prokázáno, že na měření $\tan \delta$ mají vliv částečné výboje. To platí minimálně ve dvou případech:

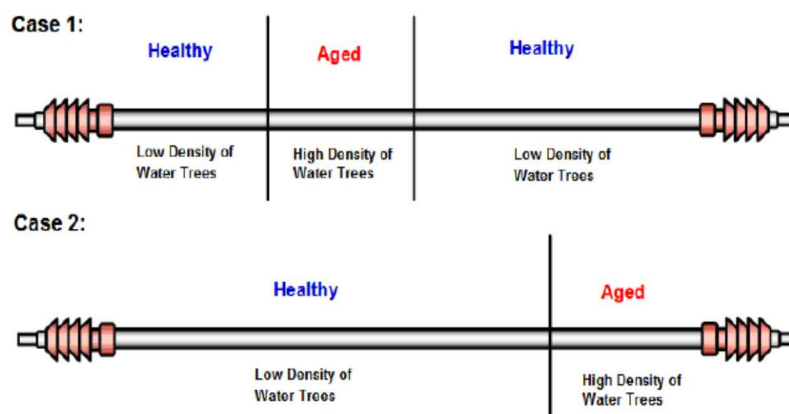
- Koróna na koncokách a při částečných výbojích při velkých dutinách v kabelové izolaci. V tomto prvním případě může být měření narušeno, protože proud při korónovém výboji zvyšuje měřený svodový proud. Ten však nelze ve skutečnosti považovat za součást kabelových ztrát. Poukazuje však na důležitost zajištění koncovek bez výbojů při provádění jakýchkoli terénních měření.
- Ve druhém případě, při velkých výbojích v dutinách kabelu, může přítomnost vnitřních částečných výbojů zvýšit naměřenou hodnotu $\tan \delta$ u XLPE kabelů téměř dvojnásobně. Vyskytují-li se po délce zkoušených kabelů částečné výboje, pocházející často z příslušenství, mohou jejich účinky zkomplikovat diagnostiku.

Není pochyb o tom, že se jednoduchý ekvivalentní obvod pro tuto situaci nehodí. Je třeba použít propracovanější model. V současnosti není zřejmé, jaký model použít; v této oblasti jsou proto potřebné výzkumy.

V případě výskytu výrazné koroze nulových vodičů bude hodnota $\tan \delta$ zahrnovat rovněž složku pocházející ze sériového odporu ekvivalentního modelu. V rámci jednoduchého modelu se předpokládá, že je sériový odpor, tvořený odporem stínění, odporem nulového vodiče a jakýmkoli přechodovým odporem, velmi malý. Vyskytuje-li se v nulových vodičích výrazná koroze, není tento předpoklad správný. V takovém případě bude $\tan \delta$ zahrnovat složku sériového odporu závislou na délce kabelu. Jsou-li tedy nulové vodiče zkorodované, dá se očekávat nárůst hodnoty $\tan \delta$, která je funkcí délky. Jinak řečeno, celková ztráta výkonu bude výsledkem zahrnujícím celkové izolační ztráty a ztráty sériového odporu závislé na délce. To vede k situaci, která je podobná částečným výbojům, avšak s rozdílnými diagnostickými charakteristikami. Tato situace byla pozorována při jiných provozních měřeních $\tan \delta$ prováděných v rámci projektu CDFI. [17]

Pokud se oblasti s vyšší hustotou vodních stromečků vyskytují pouze v části délky kabelového úseku, jejich účinek na $\tan \delta$ se v měření neprojeví. To znamená, že celková hodnota $\tan \delta$ může být nižší než hodnota, která odpovídá oblastem s vyšší hustotou vodních stromečků.

Obr. 43 znázorňuje dva případy kabelového úseku s nerovnoměrnou degradací vlivem vodních stromečků; tuto situaci lze namodelovat vhodnými úpravami ekvivalentního obvodu za účelem odhalení užitečných diagnostických indikátorů pro hodnoty $\tan \delta$ a tip-up. [17]



Obr. 43: Kabelový úsek s nerovnoměrnou degradací vlivem vodních stromečků

7.4 Měření $Tan \delta$ při nižších zkušebních napětích

Údaje z terénu odhalily způsob, jakým lze shromažďovat hodnoty $Tan \delta$ a porovnávat je s údaji při nižších zatíženích nebo zkušebních napětích. Pomocí vzorových a srovnávacích metod je možné stávající kritéria úspěšně použít při vyšších zatíženích převést na nižší úroveň zatížení. Tím lze zajistit stejnou úroveň rozlišení, avšak převedenou na nižší zatížení. Tím je výrazně omezeno riziko poruchy během zkoušky.

Úroveň snížení rizika lze přiměřeně odhadnout ze známé Weibullovovy rovnice, ve verzi s vhodně upravenými parametry, jak je uvedeno výše.

Obr. 44 ukazuje vztah mezi měřením $Tan \delta$ v rámci provozních zkoušek při $2,0 U_0$ a $1,5 U_0$ s upravenými diagnostickými kritérii. Napětí $1,5 U_0$ představuje nižší riziko poruchy během zkoušky kabelového systému.

Graf znázorňuje vztah mezi údaji získanými při různých napětích. Jeho srozumitelnost je zvýšena zavedením logaritmických stupnic, které dále usnadňují identifikaci tohoto vztahu. V tomto případě je vztah z logaritmického hlediska lineární, nemusí tomu však tak být. Stačí, že je vztah zřetelný.

Svislé čáry představují již zavedená úspěšná kritéria dle normy IEEE 400. Při absenci vztahu je zjevné, že technik, který chce využít zkušenosti uvedené v normě IEEE 400, je omezen na zkoušku při $2,0 U_0$. Kvůli tomu je nucen smířit se s vyšší úrovní rizika, než by bylo žádoucí.

Díky tomuto vztahu může technik jednoduchým postupem převést úspěšná kritéria z vyššího zatížení (1.2, 2.2 a 4 hodnoty v horní části osy X pro $2.0 U_0$) na nižší zatížení (0.7, 1.3 a 2.3 vlevo na ose Y na $1.5 U_0$), což vede ke snížení rizika. Tento vztah tedy dokazuje, že lze velmi pohodlným způsobem vytvářet kritéria pro různá napětí.

Novými kritérii hodnocení měření TD u starších kabelů se rovněž zabývají nová doporučení uvedená v návrhu IEEE400.2 D12 z roku 2012 [18].

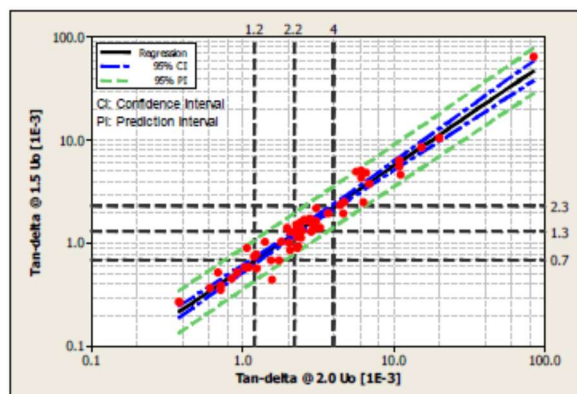


Figure 12: Correlation between $Tan \delta$ measurements from field testing at $2.0 U_0$ and $1.5 U_0$ for modified diagnostic criteria

Obr. 44: Hodnotící kritéria upravená na $0,5 U_0$ až $1,5 U_0$ [17]

7.5 Vyhodnocení TD – důležité parametry / vlivy

7.5.1 Důležitý parametr pro interpretaci TD

1. Absolutní hodnota TD

Dle IEEE 400.2-2001 ... do $2 \times U_0$

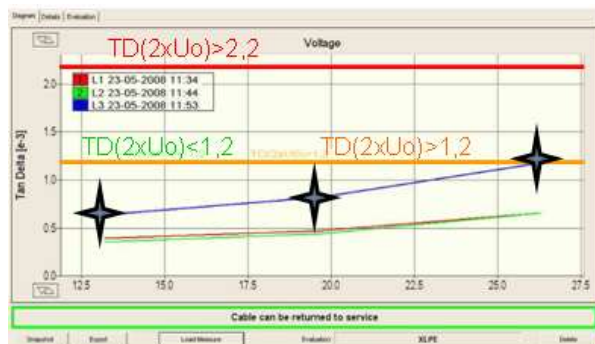
Dle IEEE400.2-2013
pro provozně zestárlé kabely .. do $1,5 \times U_0$

Kabely jsou ve skutečnosti stále **v dobrém stavu**,
není třeba je vyměnit:

$\tan d (2 U_0) < 1,2 \text{ ‰}$

Kabely **s vysokým provozním rizikem**:

$\tan d (2 U_0) > 2.2 \text{ ‰}$



TD graph: Cable in good condition, $<1.2 \cdot 10^{-2}$ @ $2 U_0$, IEEE

Obr. 45: Vyhodnocení výsledků TD, kritéria průměrné hodnoty TD [19]

2. Delta Tan Delta DTD

DTD (Delta TD)

$[2 U_0] - [U_0]$ definováno v IEEE

Indikace

=> **aktivity částečných výbojů nebo vodní stromečky**

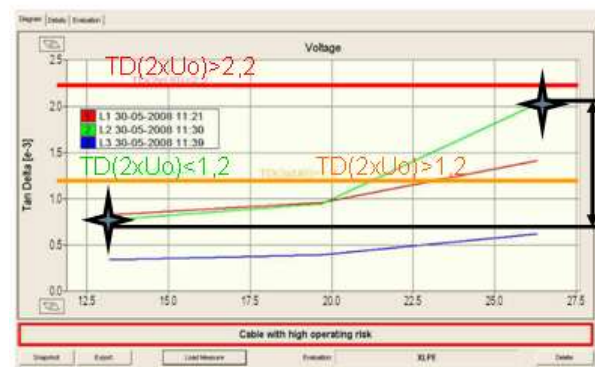
Kabely jsou ve skutečnosti stále **v dobrém stavu**:

$[\tan d (2 U_0) - \tan d (U_0)] < 0,6 \text{ ‰}$

Kabely **s vysokým provozním rizikem**:

$[\tan d (2 U_0) - \tan d (U_0)] > 1,0 \text{ ‰}$

Reference: EWE, dle IEEE 400.2



TD graph: Cable with high operating risk,
 $DTD (2U_0 - U_0) > 1.0 \cdot 10^{-3}$, IEEE 400.2

Obr. 46: Vyhodnocení výsledků TD, DTD [19]

3. Srovnání grafů

Srovnání L1, L2, L3

stejně podmínky ve všech fázích

=> stejný graf TD



TD graph: Cable in good condition, $<1.2 \cdot 10^{-2}$ @ $2 U_0$, IEEE

Obr. 47: Vyhodnocení výsledků TD, srovnání fází [19]

4. Stabilita – standardní odchylka

Details:

#	Time	Voltage kV	Current mA	Tan-Delta E-3
1	13:04:48	6.5	8.1	0.22
2	13:04:59	6.5	8.1	0.22
3	13:05:08	6.5	8.1	0.22
4	13:05:19	6.5	8.1	0.22
5	13:05:29	6.5	8.1	0.22
6	13:05:39	6.5	8.1	0.22
7	13:05:50	6.5	8.1	0.22
8	13:06:00	6.5	8.1	0.22

Phase: L1
Date/Time: 12-07-2007 13:06:01
Step: 1
Avg. Value Tan-Delta: 0.217 E-3
Standard Deviation: 0.001 E-3
No. of Tests: 8
Load: 1989.3 mF
Test sample VSE current: 36.0 uA
Generator VSE current: 2.0 uA

Definice standardní odchylky

Standardní odchylka je definována jako průměrná hodnota, o kterou se výsledky rozložení liší od průměru, bez ohledu na znaménko tohoto rozdílu.

$$s = \sqrt{\text{var}} = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N-1}}$$

Určená standardní odchylka TD je velmi užitečný údaj při analýze příčiny degradace.

Důležitý je rovněž směr vývoje!

Stabilita TD jako indikátor slabých míst v kabelu

Standardní odchylka / stabilita	Indikace	Požadované měření	Požadovaná akce	Poznámka
< 0,010	- Kabel v dobrém stavu - Vodní stromečky - Pouze málo PD	TD PD	Žádná okamžitá akce, kabel v dobrém stavu	DTD obvykle nízký Bez PD nebo bez intenzivních PD
0,010 až 0,100	Vodní stromečky + PD Pouze koncentrované PD	TD PD	Mírné stárnutí s vodními stromečky, nejsou-li PD; Analýza koncentrace PD	Mírné stárnutí s vodními stromečky => žádná okamžitá akce Jsou-li PD koncentrované, výměna spoje
0,100 až 0,500	Vniknutí vody do spojů	TD PD nemusí vykazovat vysoké hodnoty	Tento účinek může indikovat pouze TD Výsledky PD považovat za utlumené vzhledem k přítomnosti vody. Kritéria hodnot PD nelze aplikovat!	Lokalizace poruchy pláště může indikovat polohu spoje s průnikem vody. Vniknutí vody – svodový proud; spoje s nízkými PD je třeba prozkoumat, i když je hodnota PD nízká. Kalibrační graf PD může podávat informace o poloze spoje, do kterého vnikla voda.
> 0,500	Vniknutí velkého množství vody do spoje	TD PD jsou na postižených místech většinou potlačeny	Tento účinek indikuje pouze TD PD neukazuje žádné slabé místo; okamžitá výměna spoje Zkoumání kalibračního grafu PD	Lokalizace poruchy pláště může indikovat polohu spoje s průnikem vody. Vniknutí vody – svodový proud; Kalibrační graf PD může podávat informace o poloze spoje, do kterého vnikla voda

Tabulka 5: Interpretace stability TD, vhodná jako všeobecné vodítko [19]

5. Podrobné informace o TD – stabilita TD v průběhu času

#	Time	Voltage kV	Current mA	Tan Delta E-3
1	11:47:14	1.4	0.0	0.40
2	11:47:24	1.4	0.0	0.41
3	11:47:33	1.4	0.0	0.42
4	11:47:44	1.4	0.0	0.42
5	11:47:54	1.4	0.0	0.42
6	11:48:04	1.4	0.0	0.42
7	11:48:14	1.4	0.0	0.43
8	11:48:24	1.4	0.0	0.43

Phase : L1
 Date/Time : 04-11-2010 11:48:25
 Step : 1
 Avg. Value Tan Delta : 0.419 E-3
 Standard Deviation : 0.009 E-3
 No. of Tests : 8
 Load : 41.4 nF
 Test sample VSE current : 8.0 uA
 Generator VSE current : 0.0 uA

#	Time	Voltage kV	Current mA	Tan Delta E-3
1	11:49:45	2.9	0.1	2.55
2	11:49:55	2.9	0.1	2.65
3	11:50:05	2.9	0.1	2.73
4	11:50:15	2.9	0.1	2.81
5	11:50:25	2.9	0.1	2.80
6	11:50:35	2.9	0.1	2.86
7	11:50:45	2.9	0.1	2.90
8	11:50:55	2.9	0.1	2.94

Phase : L1
 Date/Time : 04-11-2010 11:50:56
 Step : 2
 Avg. Value Tan Delta : 2.781 E-3
 Standard Deviation : 0.124 E-3
 No. of Tests : 8
 Load : 41.0 nF
 Test sample VSE current : 16.0 uA
 Generator VSE current : 0.3 uA



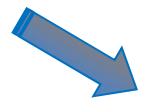
Vzestupný trend: 0.40 až 0.43 E-3 // 2.55 až 2.94
 Rozvoj ztrát, vodivých cest
 Rozvoj cest PD
 Přítomnost vodních stromečků

#	Time	Voltage kV	Current mA	Tan Delta E-3
1	11:52:16	4.3	0.1	5.27
2	11:52:26	4.3	0.1	4.90
3	11:52:36	4.3	0.1	4.65
4	11:52:46	4.3	0.1	4.46
5	11:52:56	4.3	0.1	4.46
6	11:53:06	4.3	0.1	4.26
7	11:53:16	4.3	0.1	4.08
8	11:53:26	4.3	0.1	3.92

Phase : L1
 Date/Time : 04-11-2010 11:53:27
 Step : 3
 Avg. Value Tan Delta : 4.500 E-3
 Standard Deviation : 0.412 E-3
 No. of Tests : 8
 Load : 40.8 nF
 Test sample VSE current : 24.0 uA
 Generator VSE current : 2.0 uA

#	Time	Voltage kV	Current mA	Tan Delta E-3
1	11:54:47	5.8	0.2	4.26
2	11:54:57	5.8	0.2	4.13
3	11:55:07	5.8	0.2	4.02
4	11:55:18	5.8	0.2	3.86
5	11:55:27	5.8	0.2	3.87
6	11:55:37	5.8	0.2	3.73
7	11:55:47	5.8	0.2	3.61
8	11:55:58	5.8	0.2	3.50

Phase : L1
 Date/Time : 04-11-2010 11:55:58
 Step : 4
 Avg. Value Tan Delta : 3.872 E-3
 Standard Deviation : 0.240 E-3
 No. of Tests : 8
 Load : 41.1 nF
 Test sample VSE current : 34.0 uA
 Generator VSE current : 2.0 uA



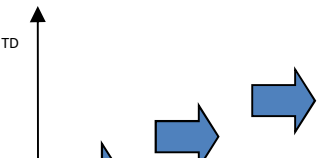
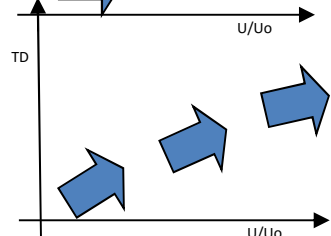
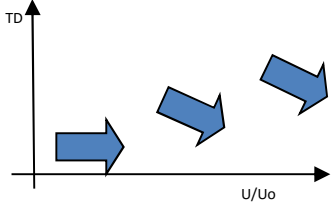
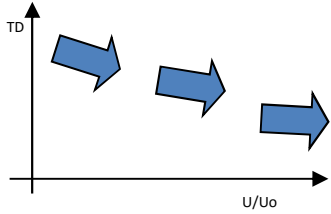
Sestupný trend
 5.27 až 3.92 E-3 // 4.26 až 3.50 E-3
 Vypařování vlhkosti během aplikace vysokého napětí
 ⇒ Měření TD je třeba opakovat.
 Po odpaření vody se hodnota stabilizuje.

Obr. 48: Výklad trendu stability TD [19]

7.5.2 Analýza trendu stability TD

Trend stability TD, jako indikace svodových vlastností

⇒ Možné indikace vývoje vlastností TD v XLPE kabelech

<ul style="list-style-type: none"> • Stabilní hodnoty během napěťových stupňů. • Nízká standardní odchylka. <p>⇒ Stabilní stav.</p> <p>⇒ Indikace aktivity PD, mírná přítomnost vodních stromečků.</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Stoupající TD během napěťových stupňů. • Nízká úroveň standardní odchylky. <p>⇒ Rozvoj svodových, vodivých, tepelných proudů.</p> <p>⇒ Rozvoj vodních stromečků do pokročilé fáze, elektrických stromečků.</p> <p>⇒ Indikace zvýšení svodů během aplikace napětí.</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Klesající TD během napěťových stupňů. • Vyšší rychlost klesání při vyšších napětích. • Nízká standardní odchylka. <p>⇒ Indikace přítomnosti vlhkosti.</p> <p>⇒ Indikace PD, TD se s napětím zvyšuje.</p> <p>⇒ Po určité době aplikace napětí se voda/vlhkost vypaří.</p> <p>⇒ Indikace přítomnosti vody / vlhkosti na koncovkách nebo spojích.</p> <p>⇒ Doporučuje se opakované měření.</p> <p>⇒ Při opakování měření TD se voda / vlhkost vypaří a hodnoty budou stabilnější.</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Negativní DTD, klesající hodnota TD přes napětí . • Klesající TD v průběhu napěťových stupňů. • Vyšší rychlost klesání při vyšších napětích. • Velká standardní odchylka. <p>⇒ Indikace přítomnosti vlhkosti / vody.</p> <p>⇒ Po aplikaci napětí se voda začne vypařovat.</p> <p>⇒ Indikace přítomnosti vody na koncovkách nebo spojích.</p> <p>⇒ Doporučuje se opakované měření.</p> <p>⇒ Voda se vypaří a hodnoty budou stabilnější.</p>	

Tabulka 6: Přehled vzorců vývoje TD

Z důvodu získání lepšího přehledu o trendu stability během každého napěťového stupně se používá indikační nástroj se šipkou. Šipky směřující nahoru indikují pozitivní trend hodnoty TD během jednoho napěťového kroku. Vodorovná šipka indikuje stabilní stav. Šipka směřující dolů udává klesající hodnotu TD během jedné napěťové úrovně. Díky zobrazení trendu stability je možné získat lepší přehled při srovnávání vlastností během každé fáze. Pro tři napěťové stupně se používají tři šipky. Šipka ve svislé poloze umožňuje zakreslení absolutní hodnoty průměru TD pro každou úroveň napětí.

7.5.3 Základní vzorec analýzy trendu TD založené na prvcích kabelu

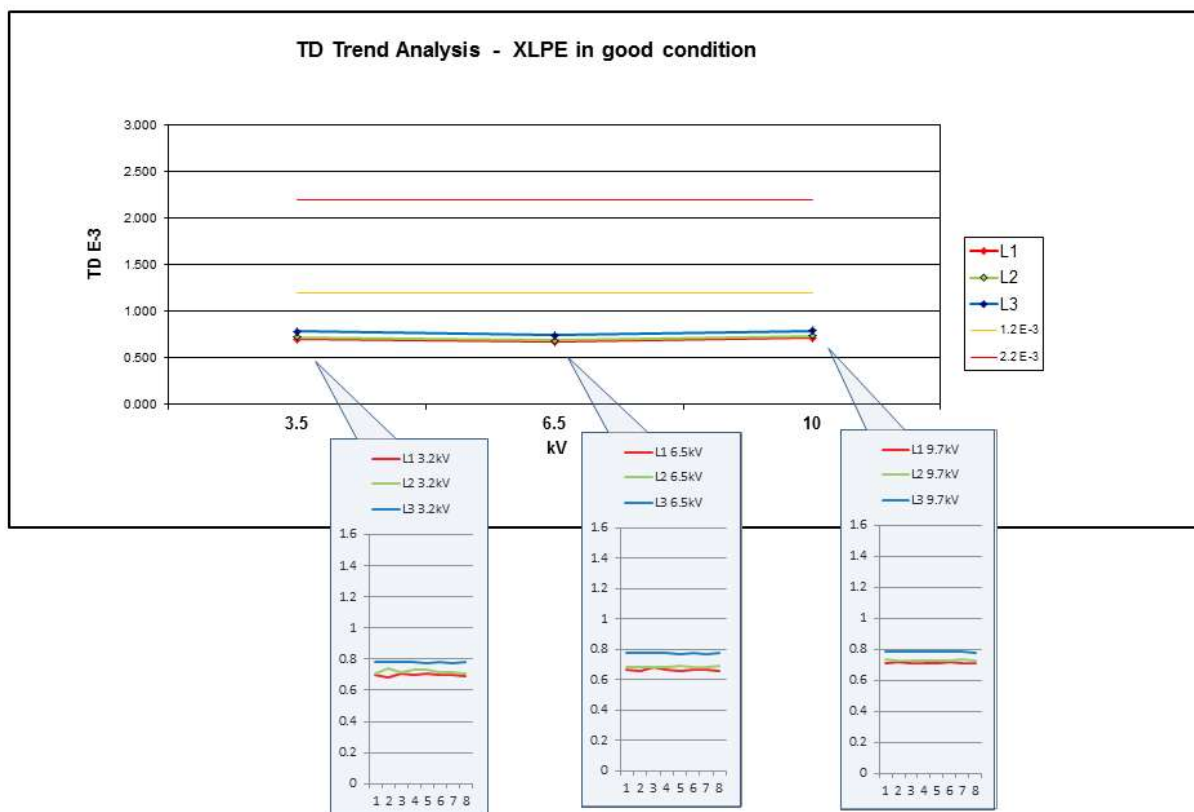
Níže uvedený vzorec trendu TD vychází z praktických provozních příkladů. Projekt byl vypracován ve spolupráci s asijským energetickým podnikem, který zahrnoval několik stovek středněnapěťových kabelů (11kV). Pro každý obvod byly k dispozici podrobné údaje o kabelech. Výsledky kombinované diagnostiky TD / PD a VLF zkoušek bylo spojeny a byla provedena podrobná případová studie. Databáze, v níž byly zaznamenány jednotlivé vzorce trendů TD, byla nakonec vyhodnocena s ohledem na výsledek případové studie. Níže uvedený vzorec trendu TD ukazuje průběh časové stability TD během každého napěťového stupně ve vztahu k absolutním hodnotám TD a aplikovanému napětí.

Klíčové vzorce umožňují pochopit trend TD pro každý z možných prvků, které mohou být zahrnuty do středněnapěťových kabelových sítí.

- XLPE kabel v dobrém stavu, bez stárnutí z důvodu vodních stromečků, bez aktivity PD ve spojích
- XLPE kabel se stárnutím z důvodu vodních stromečků, žádná aktivita PD ve spojích
- XLPE kabel v dobrém stavu, aktivita PD ve spojích
- XLPE kabel v dobrém stavu, s mírným průnikem vody do spojů, vodivé cesty ve spojích
- PILC kabel v dobrém stavu, bez aktivity PD
- PILC kabel v zestárlém stavu, s aktivitou PD
- PILC kabel s vodivými cestami ve spoji, mírná aktivita PD
- PILC kabel, vysoké provozní stárnutí, s mírnou aktivitou PD

Indikátor	Výpočet	Informace
stabilita $\tan \delta$ (SDTD)	Standardní odchylka 6-10 měření při U_0	<ul style="list-style-type: none"> - Částečné výboje - Vlhké spoje
delta $\tan \delta$ (Δ TD)	Rozdíl průměrných hodnot při $1,5 U_0$ a $0,5 U_0$	<ul style="list-style-type: none"> - Vodní stromečky - Částečné výboje - Účinky vypařování
střední $\tan \delta$ (MTD)	Průměrná hodnota 6-10 měření při U_0	<ul style="list-style-type: none"> - Vodní stromečky - Účinky stárnutí (tepelné, chemické)

7.5.3.1 Vzorec trendu TD – XLPE kabel v dobrém stavu



Obr. 49: Vzorec trendu TD - XLPE v dobrém stavu [19]

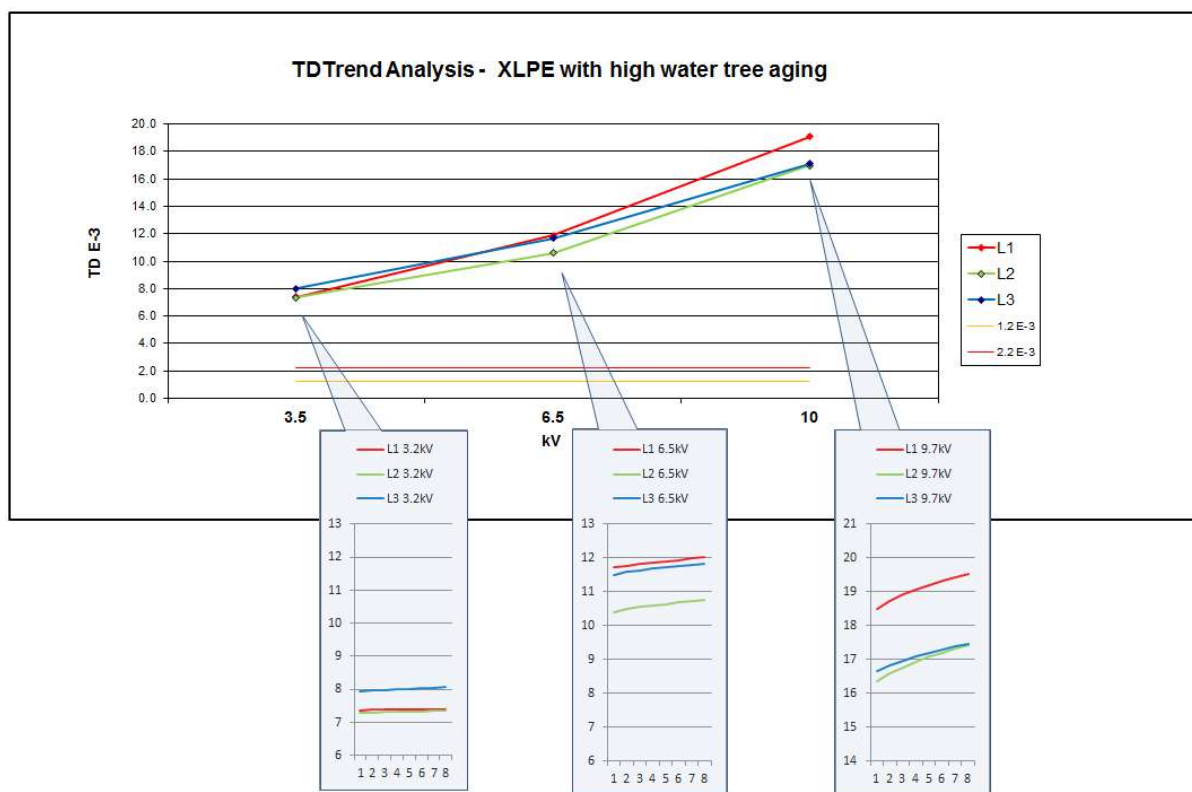
XLPE v dobrém stavu

- Nízké hodnoty TD
- Nízké DTD
- Malá standardní odchylka < 0.010 E-3
- Stabilní vývoj trendu na všech 3 napěťových úrovních

Další informace:

- Bez aktivit PD
- Celková délka kabelu 1688 m
- 14 spojů
- (7943S10)

7.5.3.2 Vzorec trendu TD – XLPE s vysokým stárnutím s vodními stromečky



Obr. 50: Vzorec trendu TD, XLPE s vysokým stárnutím s vodními stromečky [19]

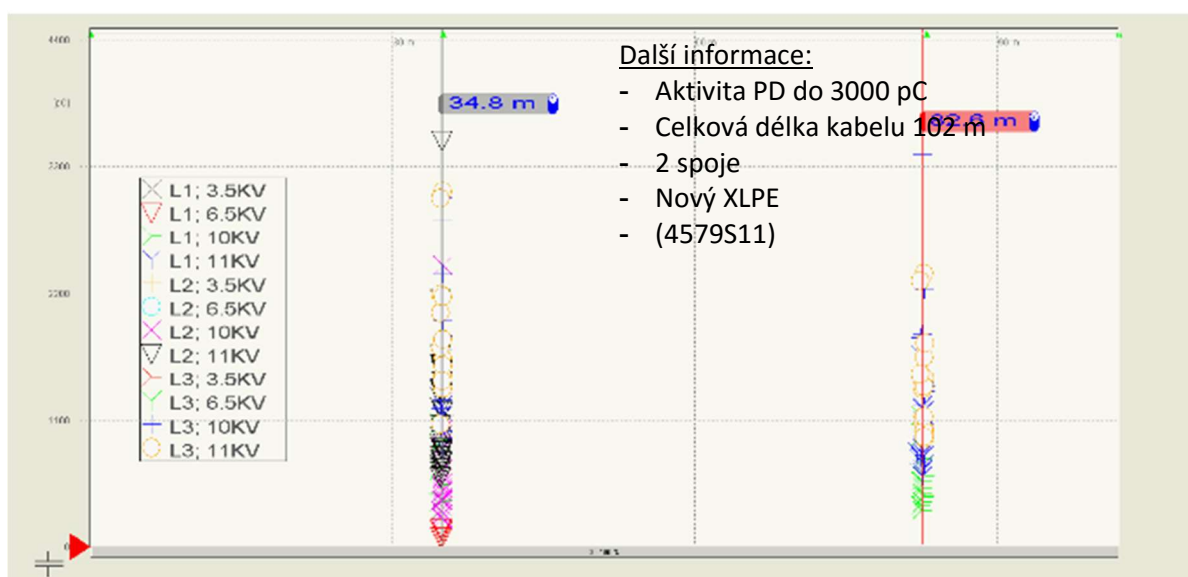
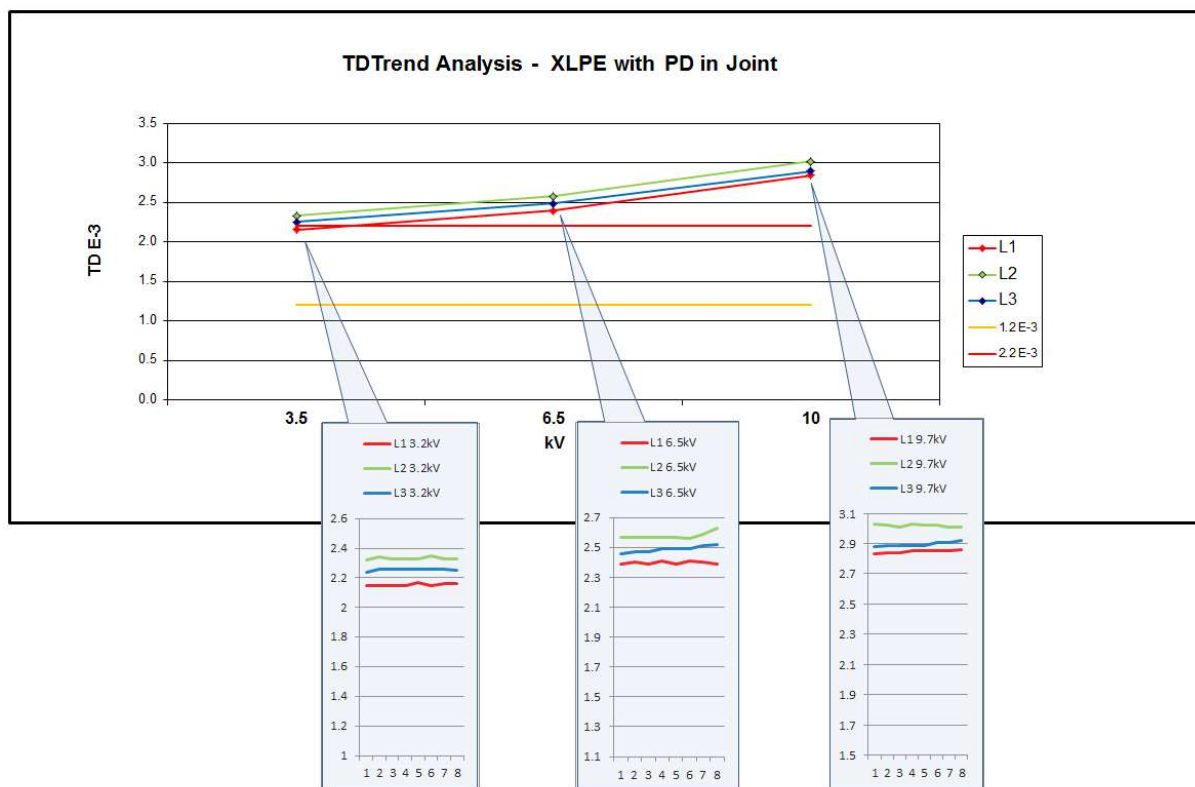
XLPE s vysokým stárnutím s vodními stromečky

- Rostoucí hodnoty TD
- Vysoké DTD
- Zvýšená standardní odchylka < 0.500 E-3
- Stoupající vývoj trendu při vyšším napětí

Další informace:

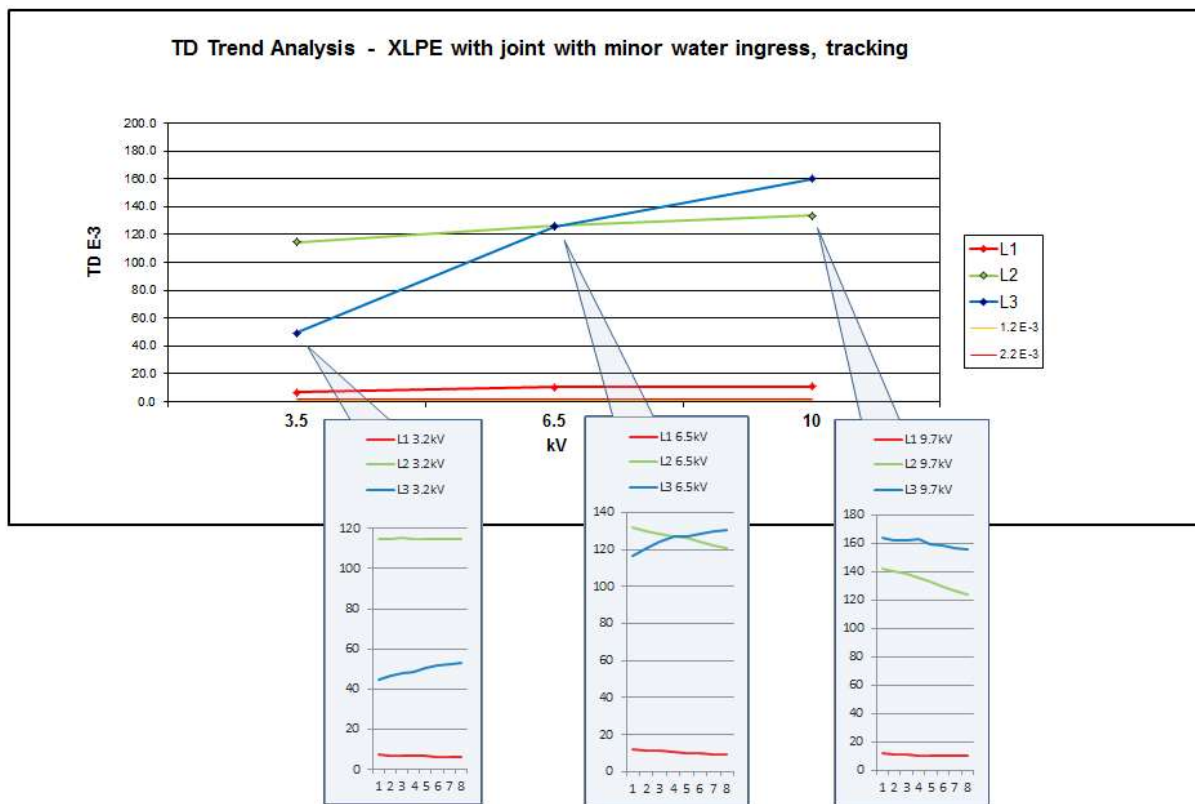
- Bez aktivit PD
- Celková délka kabelu 933m
- 15 spojů
- Úsek kabelu náchylný k tvorbě vodních stromečků (90 %)
- (3814S03)

7.5.3.3 Vzorec trendu TD – XLPE kabel s aktivitou PD ve spojích



Obr. 51: Vzorec trendu TD, XLPE s aktivitou PD ve spojích [19]

7.5.3.4 Vzorec trendu TD – XLPE kabel se spoji s mírným průnikem vody, vodivými cestami ve spoji



Obr. 52: Vzorec trendu TD, XLPE se spoji s mírným průnikem vody, vodivými cestami [19]

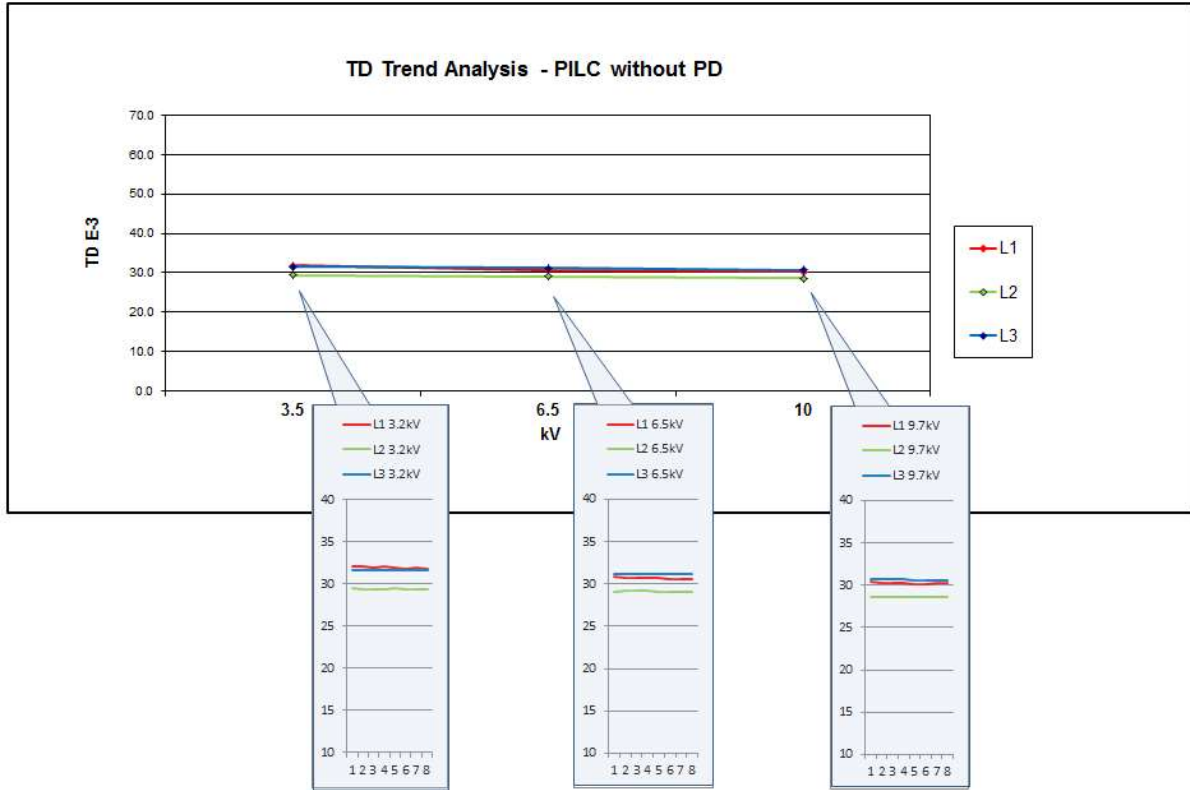
XLPE se spoji s mírným průnikem vody, vodivými cestami ve spoji

- Vysoké hodnoty TD
- Velmi vysoké DTD
- Vysoká standardní odchylka > 0.500 do 5.0 E-3
- Možný klesající vývoj trendu při vyšších úrovních napětí

Další informace:

- Aktivity PD pouze do 300 pC
- Celková délka kabelu 186 m
- 2 spoje
- (12070S07)

7.5.3.5 Vzorec trendu TD – PILC kabel bez aktivit PD



Obr. 53: Vzorec trendu TD, PILC bez aktivit PD [19]

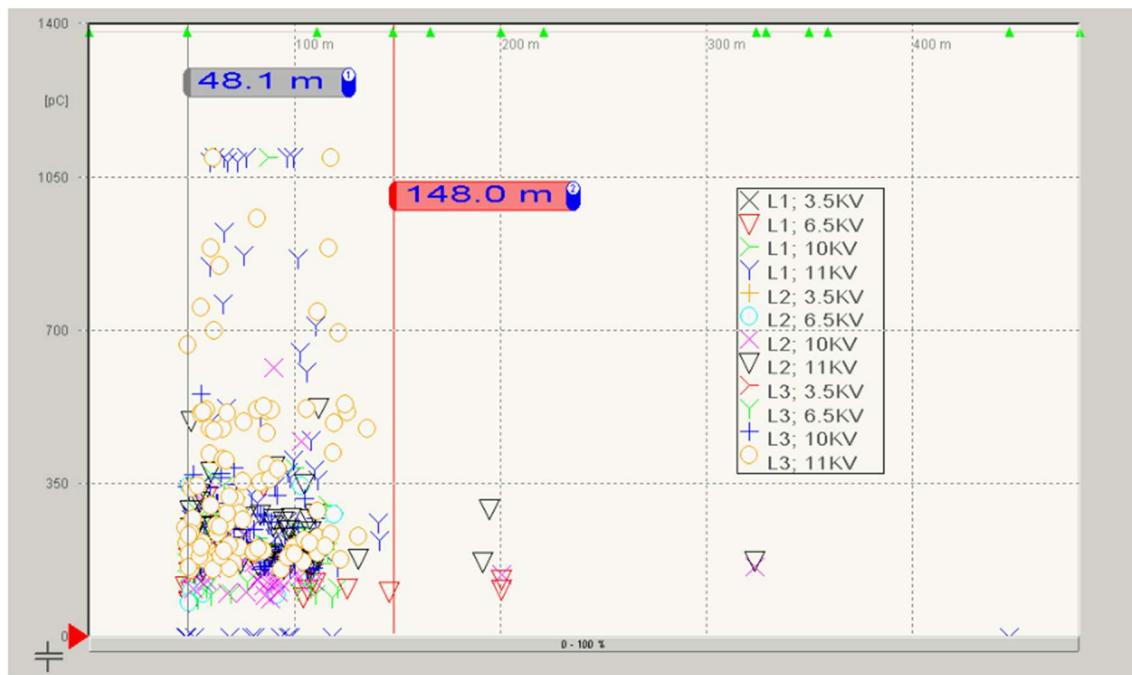
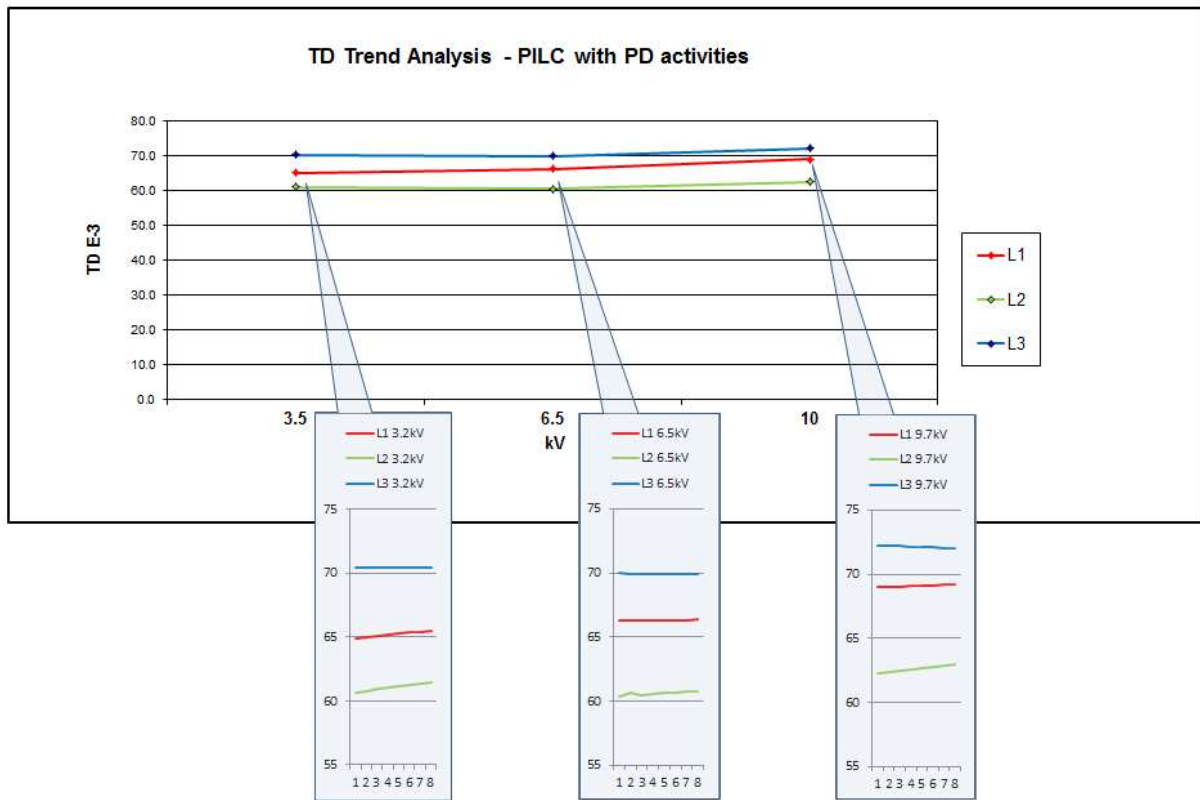
PILC kabel bez PD

- Nízké hodnoty TD (~30 E-3)
- Velmi nízké DTD
- Malá standardní odchylka < 0.120 E-3
- Stabilní vývoj trendu na všech napěťových úrovních

Další informace:

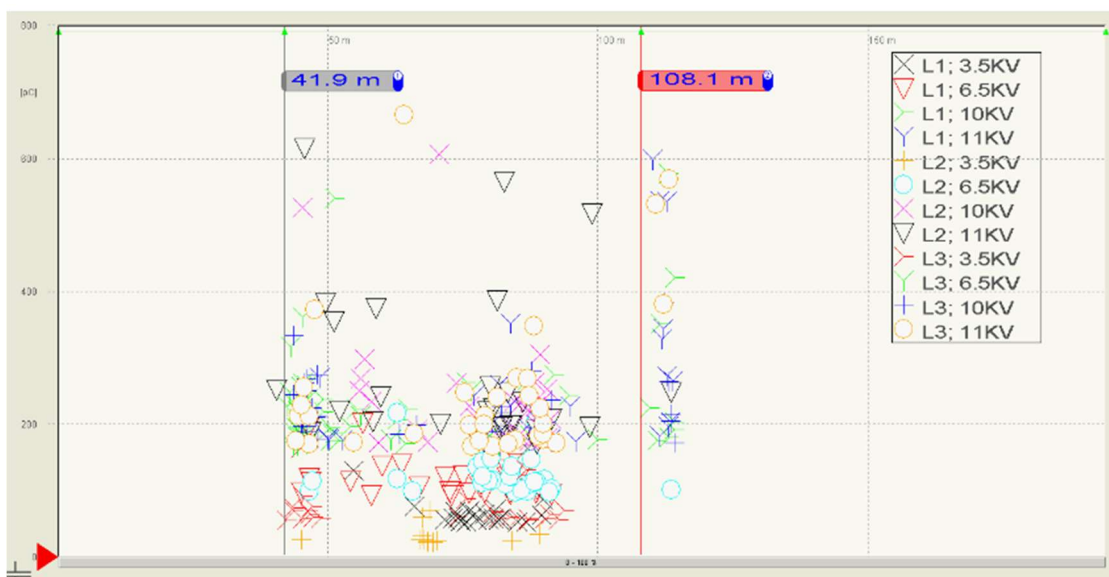
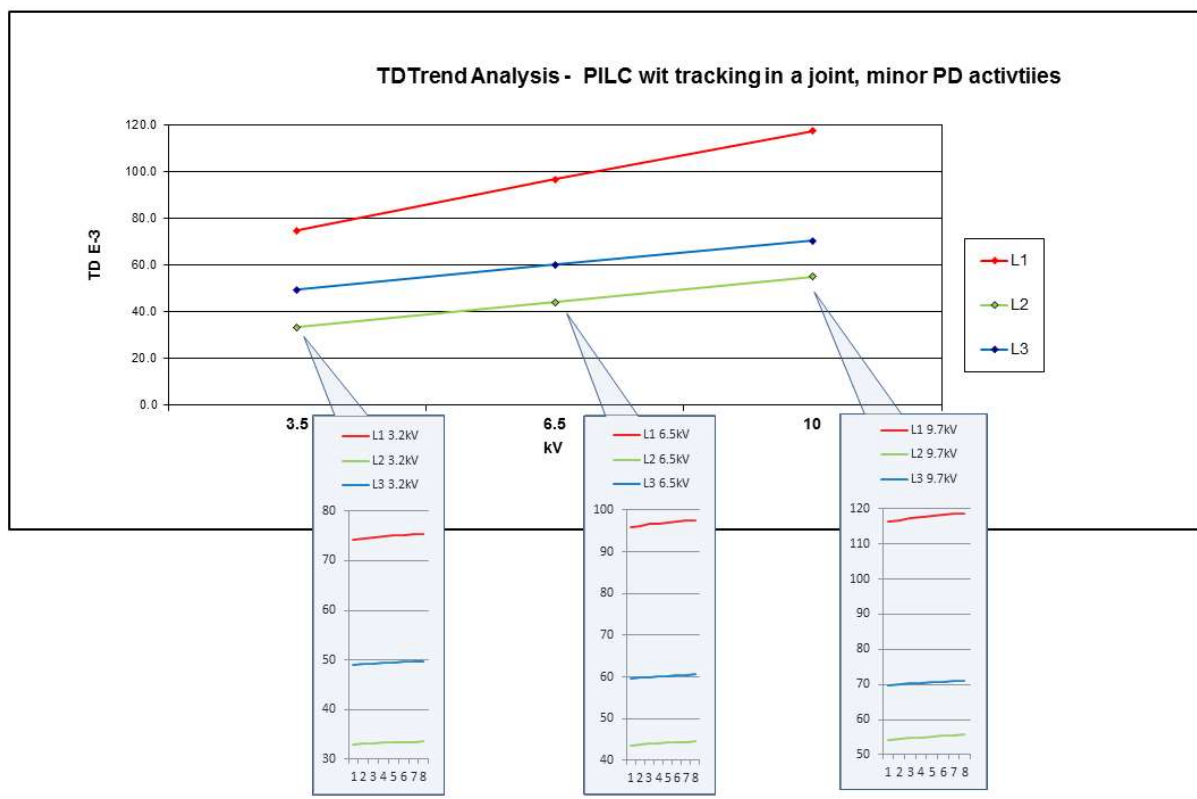
- Aktivity PD do 1000 pC v jednom spoji
- Celková délka kabelu 1681 m
- 12 spojů
- (SS10850)

7.5.3.6 Vzorec trendu TD – PILC kabel s aktivnimi PD



Obr. 54: Vzorec trendu TD, PILC kabel s aktivnimi PD [19]

7.5.3.7 Vzorec trendu TD – PILC kabel s vodivými cestami ve spoji, mírné aktivity PD



Obr. 55: Vzorec trendu TD, PILC kabel s vodivými cestami ve spoji, mírné aktivity PD [19]

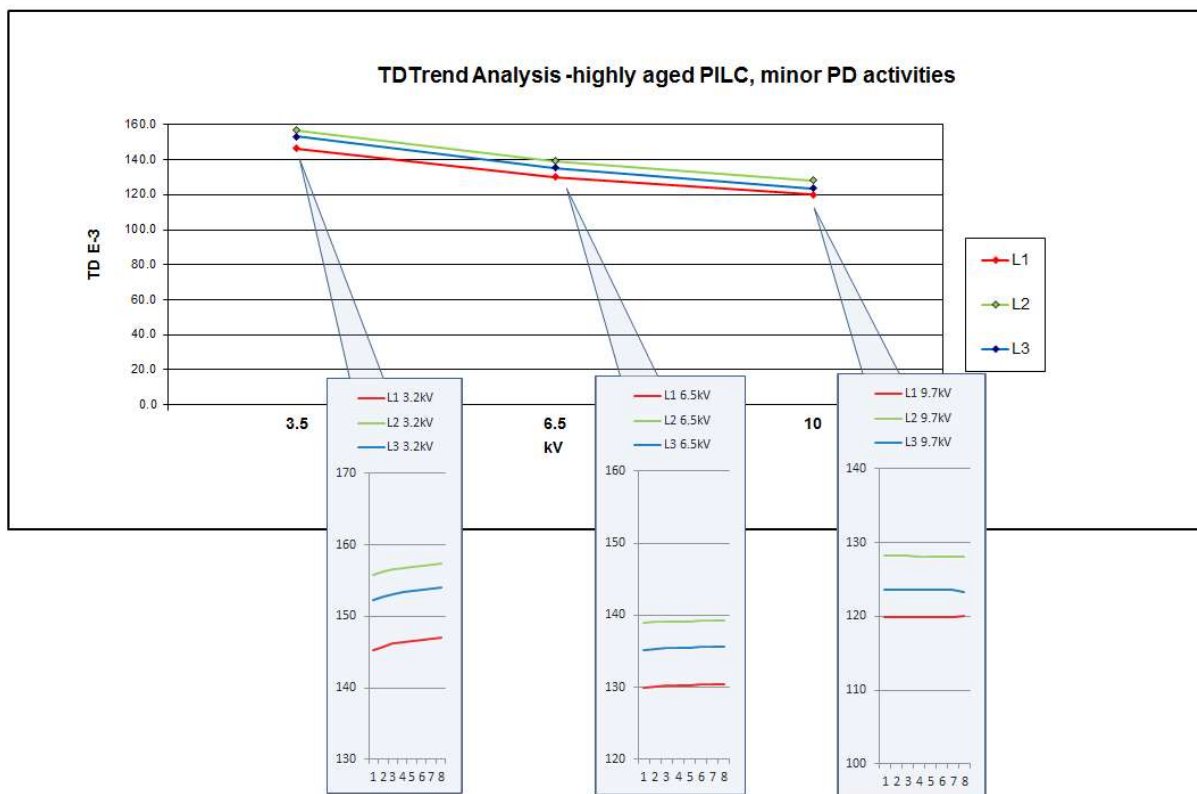
Další informace:

- Aktivity PD v úseku PILC do 400 pC
- Celková délka kabelu: 195 m (smíšený kabel, 30% PILC AP)
- 2 spoje
- (4892S12)

Side information:

- PD activities in PILC section up to 400pC
- Total cable length: 195m (mixed cable, 30% PILC AP)
- 2 joints
- (4892S12)

7.5.3.8 Vzorec trendu TD – PILC kabel s vysokým provozním stárnutím, s mírnými aktivitami PD



Obr. 56: Vzorec trendu TD, kabel PILC, vysoké provozní stárnutí, mírné aktivity PD [19]

PILC kabel s vysokým stárnutím, mírnými aktivitami PD

- Střední až vysoké hodnoty TD > 70 E-3
- Klesající DTD
- Vysoká standardní odchylka > 0.500 E-3
- Stoupající trend na nižší úrovni napětí, stabilní nebo klesající trend na vyšší úrovni napětí

Další informace:

- Aktivity PD v úseku PILC do 300 pC
- Celková délka kabelu: 557 m (smíšený kabel, 30% PILC AP)
- 2 spoje
- (5525S04)

7.5.3.9 Shrnutí výsledků analýzy TD

Analýza TD je komplexní téma. Musí v sobě zahrnovat různá hlediska:

- 1. Absolutní hodnota TD
- 2. Delta Tan Delta DTD
- 3. Srovnání fází
- 4. Analýza stability na všech úrovních napětí
- 5. Analýza vývoje trendu na všech úrovních napětí

Velmi obvyklá je kombinace komponent s různými vlivy. Vzorce TD představují souhrn všech těchto ovlivňujících komponent.

Jako každá jiná diagnostická metoda určená pro silové kabely, ani Tan δ není bez problémů. Tyto problémy jsou významné, protože mohou mít vliv na výsledek diagnostického posouzení, a tím vést k chybnému vyhodnocení. Proto je mimořádně důležité jasně pochopit, jak mohou tyto problémy ovlivnit měření a tím i diagnostiku.

Tento oddíl se zabývá některými důležitými otázkami měření Tan δ v terénních aplikacích. Jak bylo uvedeno výše, lze Tan δ považovat za měřítko neporušeného stavu kabelu.

Postupný nárůst hodnoty Tan δ v průběhu času je známkou přítomnosti postupně rostoucích vodních stromečků, a tím i degradace kabelu. Aby bylo možné tento trend rozeznat, je proto nutné vést dlouhodobé záznamy, typicky po několik let.

V tomto případě, kdy měření Tan δ překročí historicky dané mezní hodnoty a mění se s napětím (tip-up) podle určitého typu izolace, provedení kabelu a úrovní napětí, lze kabel vyhodnotit jako narušený, a proto naplánovat jeho výměnu.

Naměřené hodnoty Tan δ mohou být výrazně ovlivněny příslušenstvím kabelů, jako jsou spoje a koncovky. Samotné příslušenství může být ve skutečnosti pro měření rozhodující, jelikož jsou ztráty u některých druhů příslušenství mnohem vyšší než ztráty v izolaci kabelů. Z tohoto důvodu je třeba při provádění měření Tan δ vzít do úvahy počet a druhy příslušenství, aby bylo možné posoudit jejich vlivy na měření.

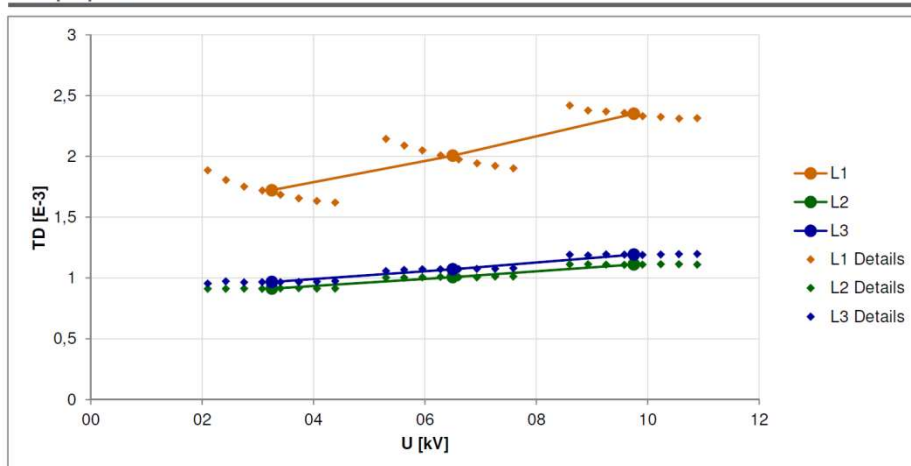
7.5.4 Příklady měření TD – trend stability

Příklad 1:

L2, L3: stabilní stav

L1: průnik vody do spoje, klesající trend

Ramp-up curve



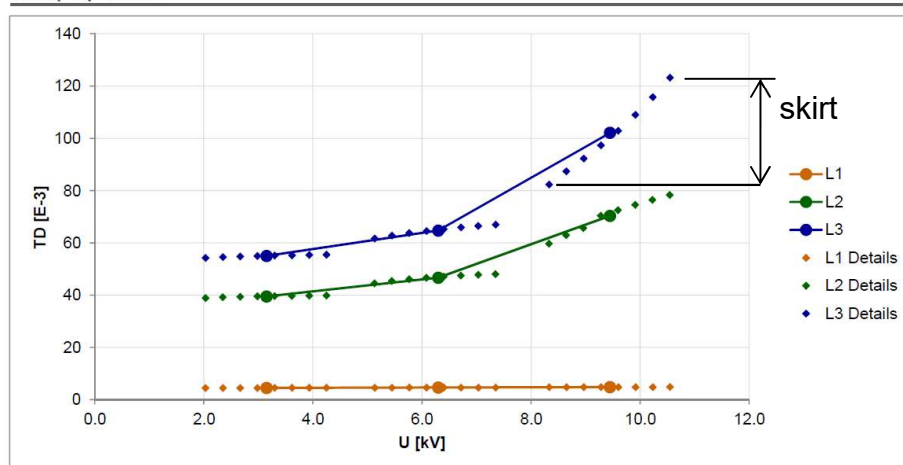
Obr. 57: Ref. 2215CM, příklad - L2, L3: stabilní stav, L1: průnik vody do spoje

Příklad 2:

L2, L3: indikace vodivých cest nejméně v jednom spoji

L1: stabilní stav

Ramp-up curve



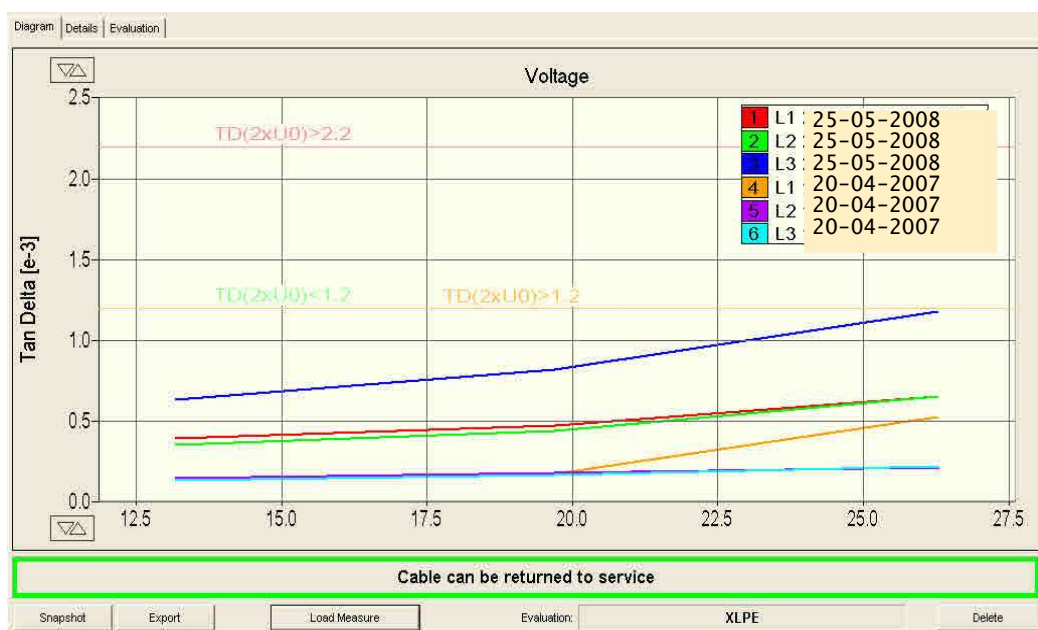
Obr. 58: Ref. 8444CM, příklad - L2, L3: vodivé cesty ve spoji, L1: stabilní stav

7.5.5 Měření TD – porovnání výsledků v průběhu času

Měření Tan Delta lze jako nedílnou součást měření izolačního výkonu využít jako jedinečný nástroj ke sledování průběhu stárnutí kabelových rozvodů. Vývoj dielektrických ztrát v průběhu času lze použít jako metodu k rozpoznání postupně se měnících charakteristik.

Hodnoty TD jsou velmi často vyhodnoceny v kategorii „doporučeno další zkoumání“. Není-li možné zřetelně určit zdroj degradace, doporučuje se opakovat zkoušku po 6 měsících, 1 roce nebo po 3 letech.

Porovnání hodnot z různých časových okamžiků umožní pochopit příčinu degradace a bude možné snadněji stanovit naléhavost dalších akcí.



Obr. 59: Srovnání TD stejného XLPE kabelu po 1 roce; viditelné účinky stárnutí

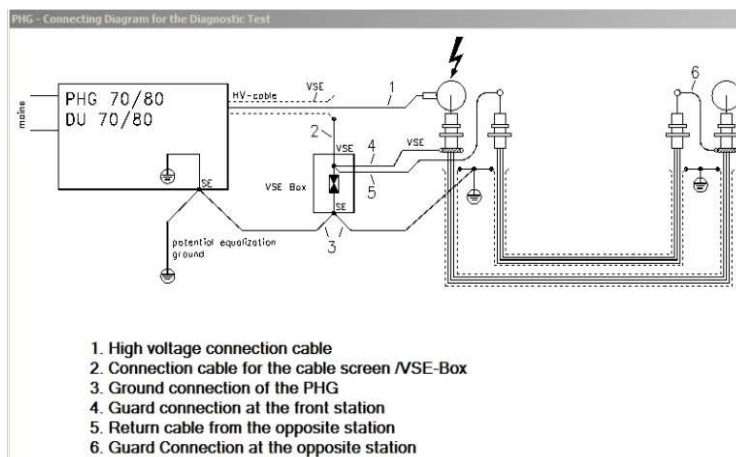
7.5.6 Vliv povrchových proudů v otevřených koncovkách

Otevřené koncovky jsou vystaveny znečištění, vlhkosti a mechanickému poškození. Tyto vlivy jsou hlavní příčinou velkých povrchových proudů, které mohou při měření TD fungovat jako velké svodové proudy, které mohou značně ovlivnit výsledek měření.

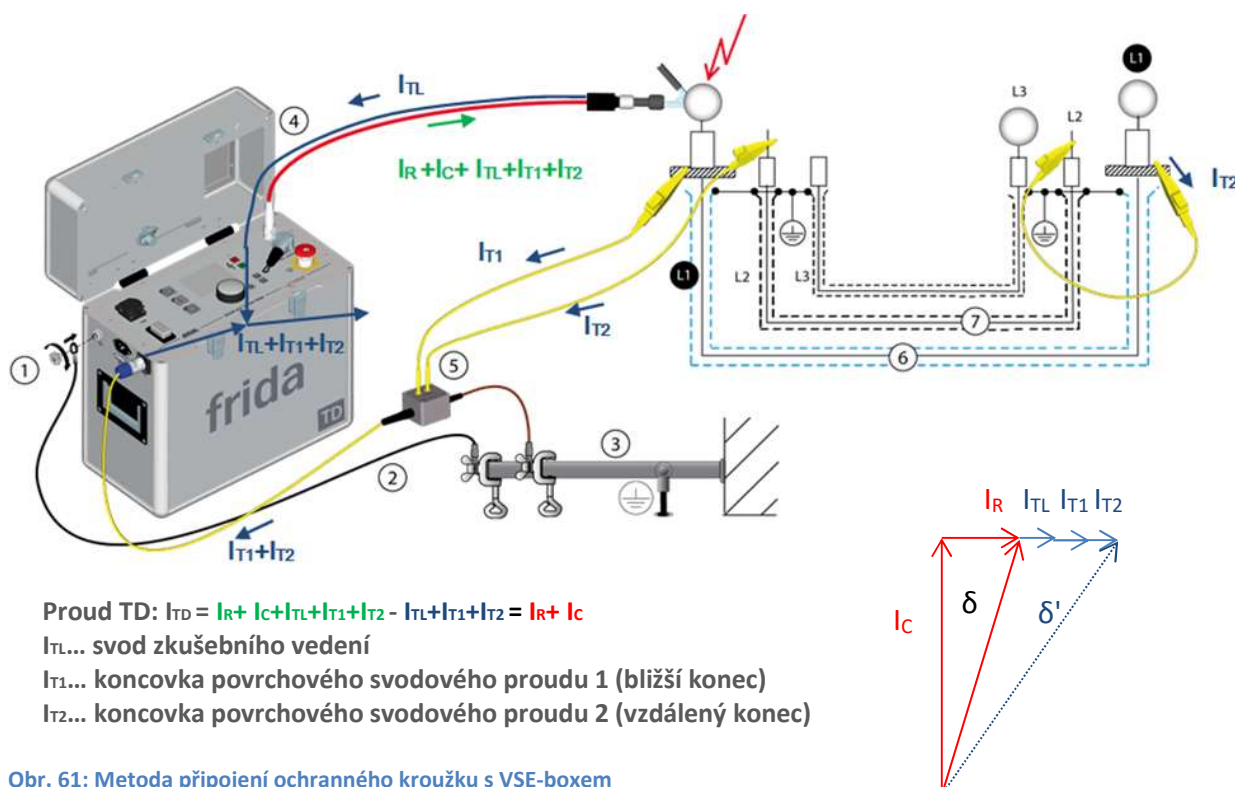
Řádné čištění může v mnoha případech pomoci snížit povrchovou vodivost koncovky, avšak pouze do určité míry. V určitých prostředích nelze tento vliv zcela potlačit z důvodu vysoké relativní vlhkosti.

Úplná a konečná eliminace vlivu povrchových proudů je velmi důležitá. Využívá se aplikace spojovací metody s použitím ochranných kroužků a VSE-boxů (uspořádání spojení s virtuálním ochranným uzemněním).

V závislosti na úrovni aplikovaného napětí je dále třeba homogenizovat elektrické pole na přípojkách koncovek pomocí korónových krytů.



Obr. 60: Schéma zapojení programovatelného vysokonapětového generátoru (PHG) pro TD s použitím ochranného kroužku



Obr. 61: Metoda připojení ochranného kroužku s VSE-boxem

Zobrazený graf TD znázorňuje příklad řádně čištěných koncovek. Relativní vlhkost byla velmi vysoká. Skutečný ztrátový činitel kabelu bylo možné měřit pouze pomocí ochranného kroužku.



Obr. 62: Přímé srovnání hodnoty TD při použití ochranného kroužku a bez použití ochranného kroužku



Obr. 63: Uspořádání zapojení s ochranným kroužkem a korónovými kryty (vlevo), bez ochranného kroužku (vpravo); relativní vlhkost 80 %, 30 °C



Obr. 64: Uspořádání zapojení s ochranným kroužkem a korónovými kryty, VSE-box, připojení přístroje Frida TD

7.6 Doporučený přístup k hodnocení TD

7.6.1 Měření ztrátového činitele v kabelech XLPE

Hodnoticí kritéria jsou stanovena v IEEE400.2-2013 [10]. Nová směrnice rozlišuje mezi kabelem „provozně zestárlými“ a nově nainstalovanými kabelem.

Pro **provozně zestárlé** izolované kabely na bázi PE jsou úrovně aplikovaného napětí stanoveny pouze ve 3 krocích od $0,5xU_0$ do $1,5xU_0$. Kritéria VLF-TD jsou určena pro střední hodnotu při $1,0U_0$.

- Je-li $\tan \delta$ naměřený při $1,0x U_0 < 4 \times 10^{-3}$ a rozdíl $\tan \delta$ naměřený při $1,5x U_0$ a $0,5x U_0$ je $< 5 \times 10^{-3}$, je kabel v **dobrém stavu a „žádná akce není potřebná“**.
- Je-li $\tan \delta$ naměřený při $1,0x U_0 > 50 \times 10^{-3}$ nebo je rozdíl $\tan \delta$ naměřený při $1,5x U_0$ a $0,5xU_0 > 80 \times 10^{-3}$, je kabel ve **špatném stavu a je „potřebná akce“**.

7.6.2 Měření ztrátového činitele u PILC

Na rozdíl od kabelů XLPE neexistuje pro kabely PILC jediné hodnotící kritérium vzhledem k rozdílným typům jejich konstrukcí a použitých izolačních kapalin. Ze zkušenosti je známo, že by se všechny 3 žíly PILC kabelu měly chovat podobně a nárůst hodnoty $\tan \delta$ u starých kabelů naměřený při $0,5x U_0$ a $1,5x U_0$ by měl být malý.

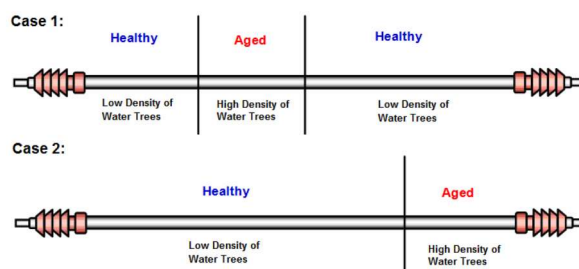
Zkušenosti z evropských zemí, které používaly množství kabelů s papírovou izolací, například Francie, Španělsko a Portugalsko, ukazují, že jsou absolutní hodnoty TD do 70×10^{-3} a rozdíly mezi měřeními 10 až max. 20 % při U_0 a $2x U_0$ považovány za přijatelné. Některé podniky omezují max. hodnotu na 50×10^{-3} či ještě méně. U vysoce zastaralých obvodů je třeba omezit aplikované napětí pro měření ztrátového činitele TD na $0,5x U_0$ až $1,5x U_0$, což je podobné kabelům XLPE.

7.6.3 Měření ztrátového činitele u obvodů se smíšenými kabelem:

Výsledky měření ztrátového činitele u smíšených kabelových tras je třeba vyhodnotit s ohledem na poměr délek (kapacity) části XLPE a části PILC. Rozhodujícím faktorem je ztrátový činitel úseku PILC, který je mnohem vyšší než ztrátový činitel úseku XLPE.

Pro přibližný výpočet lze kapacitu/km u XLPE i PILC považovat za stejnou. Například ztrátový činitel naměřený u kabelového obvodu tvořeného 50 % XLPE a 50 % PILC má poloviční hodnotu části PILC ($\tan \delta = 1/(\omega \cdot C \cdot R)$).

Je-li úsek XLPE dvojnásobný oproti úseku PILC, je naměřený ztrátový činitel roven 1/3 ztrátového činitele papírového úseku a naopak.



Obr. 65: Některé možné případy kabelových úseků s nerovnoměrnou degradací vodními stroměčky [17]

7.6.4 Hlediska / definice použité k hodnocení:

- „1.5U₀ hodnocení smíšeného kabelu“ hodnotící kritéria použitá na **smíšené kabely**
- „1.5U₀ hodnocení kabelu XLPE“ hodnotící kritéria použitá na **XLPE a WTP-XLPE kabel (kabely náchylné k tvorbě vodních stromečků)**
- Průměrná hodnota ... dle IEEE 400.2-2013 [10]
- Delta Tan Delta DTD ... dle IEEE 400.2-2013 [10]
- Standardní odchylka / stabilita ... dle IEEE 400.2-2013 [10] & směrnice BAUR pro diagnostiku TD V4 03.2013 [19]
- Analýza trendu TD směrnice BAUR pro diagnostiku TD V4 03.2013 [19]

Standardní odchylka / stabilita je posuzována dle interní „směrnice BAUR pro diagnostiku tan delta V4 03.2013“. Uvedené hodnoty blízce odpovídají IEEE400.2- návrhu 12 (leden 2012) a nové provozní směrnici IEEE400.2-2013.

Výňatek z IEEE400.2-2013, Tabulka I.1 pro XLPE (mimo Severní Ameriku) nebo nové kabely

Posouzení stavu	Stabilita TD (měřená dle standardní odchylky) při U ₀ [10 ⁻³]		Diferenční TD (rozdíl středního TD) mezi 2.0U ₀ a U ₀ [10 ⁻³]		Střední TD při 2U ₀ [10 ⁻³]
Není potřebná žádná akce	<0.1	a	<0.6	a	<1.2 až <2,2
Doporučeno další zkoumání	0.1 až 0.5	nebo	0.6 až 1	nebo	1.2 až 2
Požadovaná akce	>0.5		>0.6 nebo >1		>2.2

Tabulka 7: IEEE400.2-2013 pro kabely XLPE 1.0 - 2.0 U₀ [10, p. 48]

Zmíněné hodnoty uvedené v IEEE400.2-2013 (Tabulka I. 1) se týkají měření TD od 1.0U₀ do 2.0U₀. Jelikož se hlavní studie praktických výsledků zaměřily na podniky v Severní Americe, shrnuje IEEE výše uvedená kritéria jako „mimo Severní Ameriku“.

Rozsáhlé zkušenosti společnosti BAUR potvrzují, že hodnoty dle IEEE400.2-2013 stanovené pro Ameriku lze rovněž s dobrými výsledky aplikovat po celém světě.

Výňatek z IEEE400.2-2013, Tabulka I.4 pro papírovou izolaci PILC, aplikovatelný rovněž na smíšené kabely

Posouzení stavu	Stabilita TD (měřená dle standardní odchylky) při U_0 [10^{-3}]		Diferenční TD (rozdíl středního TD) mezi $2.0U_0$ a U_0 [10^{-3}]		Střední TD při $2U_0$ [10^{-3}]
Není potřebná žádná akce	<0.5	a	-20 až 20	a	<50
Doporučeno další zkoumání	0.5 až 1	nebo	-20 až -50 nebo 20 až 50	nebo	50 až 100
Požadovaná akce	>1		< -20 nebo >50		>100

Tabulka 8: IEEE400.2-2013, mezinárodní hodnoty pro kabely PILC ($1.0U_0$ až $2.0U_0$) [10, p. 49]

Upravená hodnoticí kritéria pro měření TD od $0.5U_0$ do $1.5U_0$:

Posouzení stavu	Stabilita TD (měřená dle standardní odchylky) při U_0 [10^{-3}]		Diferenční TD (rozdíl středního TD) mezi $1.5U_0$ a $0.5 U_0$ [10^{-3}]		Střední TD při $1.5U_0$ [10^{-3}]
Není potřebná žádná akce	<0.1	a	<0.6	a	<1.2 až <2,2
Doporučeno další zkoumání	0.1 až 0.5	nebo	0.6 až 1	nebo	1.2 až 2
Požadovaná akce	>0.5		>0.6 nebo >1		>2.2

Tabulka 9: Tabulka I.1 dle IEEE400.2-2013 upravená dle zkušeností společnosti BAUR pro $0.5U_0$ až $1.5U_0$, kabely XLPE

Hodnoty dle IEEE 400.2-2013 pro nové XLPE kabely jsou přímo aplikovány na hodnoty naměřené od $0.5U_0$ do $1.5U_0$. Drobné rozdíly nejsou vzaty do úvahy.

Použitá hodnoticí kritéria:

Název hodnocení XLPE $1,5U_0$

Kritérium

TD($1.0 \times U_0$) > 2.2

TD($1,5 \times U_0$) - ($0.5 U_0$) > 1.0

TD($1.0 \times U_0$) > 1.2

TD($1.0 \times U_0$) < 1.2

TD($1.5 \times U_0$) - ($0.5 U_0$) < 0.6

Poznámka

Kabel s vysokým provozním rizikem

Kabel s vysokým provozním rizikem

Kabel vysoce zestárlý v provozu

Kabel lze vrátit do provozu

Kabel lze vrátit do provozu

Posouzení stavu	Stabilita TD (měřená dle standardní odchylky) při U_0 [10^{-3}]		Diferenční TD (rozdíl středního TD) mezi $1.5U_0$ a $0.5U_0$ [10^{-3}]		Střední TD při $1.5U_0$ [10^{-3}]
Není potřebná žádná akce	<0.5	a	-10 až 10	a	<50
Doporučeno další zkoumání	0.5 až 1	nebo	-10 až -20 nebo 10 až 20	nebo	50 až 70
Požadovaná akce	>1		< -20 nebo >20		>70

Tabulka 10: Tabulka I.4 dle IEEE400.2-2013 upravená dle zkušeností společnosti BAUR pro $0.5U_0$ až $1.5U_0$, PILC & smíšené kabely

Použitá hodnoticí kritéria:

Název hodnocení PILC, smíšeného kabelu $1,5U_0$

<i>Kritérium</i>	<i>Poznámka</i>
$TD(1.0xU_0) > 70.0$	Kabel s vysokým provozním rizikem
$TD(1.5xU_0) - (0.5xU_0) > 20.0$	Kabel s vysokým provozním rizikem
$TD(1.0xU_0) > 50.0$	Kabel vysoce zestárlý v provozu
$TD(1.5xU_0) - TD(0.5xU_0) > 10.0$	Kabel vysoce zestárlý v provozu
$TD(1.0xU_0) < 50.0$	Kabel lze vrátit do provozu
$TD(1.5xU_0) - TD(0.5xU_0) < 10.0$	Kabel lze vrátit do provozu

7.6.5 TanDelta jako nástroj k měření vlhkosti kabelového příslušenství

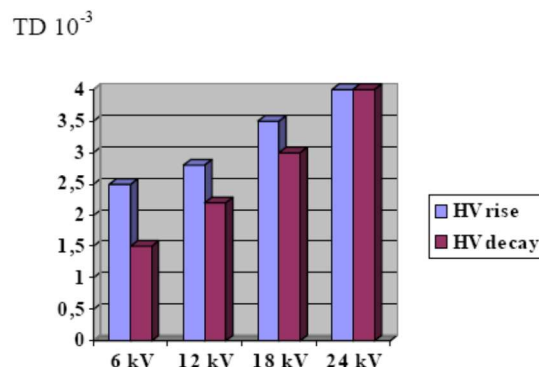
VLF TD hystereze při nárůstu a útlumu napětí

V roce 1999 byl objeven nový účinek TD s využitím VLF delta TD při postupně rostoucím napětí k lokalizaci chybně nainstalovaného příslušenství. Pomocí metody delta TD mohli Brincourt et al. EDF, z Francie a NEETRAC jasně prokázat průnik vody nebo vlhkosti do příslušenství.

Pokles hodnot TD při nárůstu napětí je obvykle způsoben vlhkostí, která se může rychle vypařovat. V důsledku toho lze účinek vysoušení během krátké doby měřit – obvykle během jedné či dvou minut. Je-li měření TD prováděno při rostoucích i klesajících úrovních napětí, může hystereze TD souviset s vyšším obsahem vlhkosti v izolaci.

S možností nesprávně namontovaných spojů a průniku vody lze počítat. V mnoha praktických případech může tento problém vyřešit měření TD před výměnou spojů a po ní. Závady způsobené vlhkostí uvnitř izolace kabelů nevykazují žádné nebo jen velmi malé hysterezní účinky. Jelikož dlouhodobé zatížení již narušené izolace vysokým napětím není žádoucí, zavedla společnost BAUR novou praktickou metodiku hystereze TD.

Vyhodnocení hystereze ztrátového činitele se provádí pomocí nárůstu a poklesu VLF napětí v rámci jediného procesu dle Obr. 66. [1]



Obr. 66: Hystereze ztrátového činitele TD při nárůstu a útlumu VLF napětí [1]

Hodnoty TD u jiných typů izolací, např. PILC, EPR, TR-XLPE nebo kopolymerů, vykazují odlišné počáteční (nové) úrovně TD, jejichž vývoj během stárnutí je však velmi podobný jako u XLPE. Velmi užitečným nástrojem pro kvalifikaci jsou individuální úrovně kritérií pro jednotlivé typy izolace a srovnání TD mezi fázemi.

Další, velmi cenné poznatky přináší vyhodnocení stability TD. Negativní trend stability indikuje malý průnik vody do spojů nebo vliv vlhkosti v koncokách. Negativní průběh DTD (Delta Tan Delta) navíc signalizuje menší vliv svodů v průběhu času. Velké množství vody proniklé do spojů nemusí být nutně ovlivněno napětím aplikovaným v průběhu měření TD. Jediným významným faktorem je vysoké kolísání hodnoty TD během jednotlivých napěťových kroků.

7.6.6 Nově zavedená kritéria hodnocení při měření ztrátového činitele TanDelta dle IEEE 400.2-2013

Příloha I: kritéria Tan Delta používaná mimo Severní Ameriku [10, p. 48]

Tabulky 4 až 6 v této příručce vycházejí z údajů získaných u konstrukcí a instalací kabelů v Severní Americe.

Tabulky I.1, I.2, I.3 a I.4 obsahují přehled rozsahů kritérií hodnocení TD pro různé izolace kabelů používané v různých zemích mimo Severní Ameriku, v průmyslu i službách. Spodní i horní mezní hodnoty TD i diferenční meze TD se aplikují individuálně. Počet zemí a zařízení není znám a nejsou k dispozici žádné informace o výskytu poruch nebo servisních podmínkách.

Tabulka I1: Různé hodnoticí údaje pro posouzení stavu izolací na bázi PE (např. PE, XLPE) při měření TD do 2U₀

Posouzení stavu	Stabilita TD (měřeno při standardní odchylce) při U ₀ [10 ⁻³]		Diferenční TD (rozdíl středního TD) mezi 2U ₀ a U ₀ [10 ⁻³]		Střední TD při 2U ₀ [10 ⁻³]
Není potřebná žádná akce	<0.1	a	<0.6	a	<1.2 až <2,2
Doporučeno další zkoumání	0.1 až 0.5	nebo	0.6 až 1	nebo	1.2 až 2
Požadovaná akce	>0.5		>0.6 nebo >1		>2.2

Table I2: Různé hodnoticí údaje pro posouzení stavu izolací na bázi PE s přísadami (např. TRXLPE, kopolymery) ¹⁾ při měření TD do 2U₀

Posouzení stavu	Stabilita TD (měřeno při standardní odchylce) při U ₀ [10 ⁻³]		Diferenční TD (rozdíl středního TD) mezi 2U ₀ a U ₀ [10 ⁻³]		Střední TD při 2U ₀ [10 ⁻³]
Není potřebná žádná akce	<0.5	a	<1.5	a	<8
Doporučeno další zkoumání	0.5 až 1	nebo	1.5 až 3	nebo	8 až 10
Požadovaná akce	>1		>3		>10

1) *Poznámka: Vzhledem k dlouhodobému polymerizačnímu účinku mohou být výsledky středního TD při 2U₀ měřeného bezprostředně po výrobě kopolymerových izolací výrazně vyšší. Po jednom či dvou letech mohou absolutní hodnoty TD klesnout na úroveň blízkou izolacím XLPE nebo PE.*

Tabulka 11: Tabulka I1/I2 IEEE400.2-2013,[10, pp. 48-49], ANNEX I, Hodnoticí kritéria mimo Severní Ameriku

Tabulka I3: Mezinárodní hodnoty izolace (např. EPR) - měření TD do 2U₀

Posouzení stavu	Stabilita TD (měřeno při standardní odchylce) při U ₀ [10 ⁻³]		Diferenční TD (rozdíl středního TD) mezi 2U ₀ a U ₀ [10 ⁻³]		Střední TD při 2U ₀ [10 ⁻³]
Není potřebná žádná akce	<0.5	a	<4	a	<10
Doporučeno další zkoumání	0.5 až 1	nebo	4 až 10	nebo	10 až 80
Požadovaná akce	>1		>10		>80

Tabulka I4: Mezinárodní hodnoty stavu papírových izolací (např. PILC) – měření TD do 2U₀

Posouzení stavu	Přechodná stabilita TD (měřeno při standardní odchylce) při U ₀ [10 ⁻³]		Diferenční TD (rozdíl středního TD) mezi 2U ₀ a U ₀ [10 ⁻³]		Střední TD při 2U ₀ [10 ⁻³]
Není potřebná žádná akce	< - 0.5	a	-20 až 20	a	<50
Doporučeno další zkoumání	0.5 až 1	nebo	-20 až -50 nebo 20 až 50	nebo	50 až 100
Požadovaná akce	>1		< - 50 nebo > 50		>100

Tabulka 12: Tabulka I3/ I4, IEEE400.2-2013, [10, pp. 48-49], ANNEX I, Hodnotící kritéria mimo Severní Ameriku

V normě IEEE400.2-2013 jsou dále uvedena různá kritéria, která se vztahují na kabelové sítě na základě zvláštních zkušeností, které shromáždil především NEERTRAC pro typy kabelů, jaké se používají v Severní Americe. Jelikož byl průzkum zaměřen především na severoamerický trh, tyto hodnoty možná nebudou plně přizpůsobitelné pro jiné země.

Tabulka 4: Užitečné historické údaje pro posouzení stavu provozně zestárlých izolací na bázi PE (tzn. PE, XLPE, a TRXLPE) pomocí měření TD 0,1 Hz do 1.5U₀

Posouzení stavu	Časová stabilita VLF-TD (VLF-TDTS měřeno při standardní odchylce) při U ₀ [10 ⁻³]		Diferenční VLF-TD (VLF-DTD) (rozdíl středního VLF-TD) mezi 0.5 U ₀ a 1.5 U ₀ [10 ⁻³]		Střední VLF-TD při U ₀ [10 ⁻³]
Není potřebná žádná akce	< 0.1	a	< 5	a	< 4
Doporučeno další zkoumání	0.1 až 0.5	nebo	5 až 80	nebo	4 až 50
Požadovaná akce	> 0.5	nebo	> 80	nebo	> 50

Tabulka 13, Tabulka 4, IEEE400.2-2013[10, p. 19] – Hodnotící kritéria pro provozně zestárlou izolaci na bázi PE

Tabulka 5: Užitečné historické údaje pro posouzení stavu provozně zestárlých plněných izolací (tzn. EPR & Vulkene)¹ pomocí měření TD 0.1 Hz do 1.5U₀

Posouzení stavu	Plněné izolační systémy	Časová stabilita VLF-TD (VLF-TDTS měřeno při standardní odchylce při U ₀ [10 ⁻³])		Diferenční VLF-TD (VLF-DTD) (rozdíl středního VLF-TD) mezi 0.5 U ₀ a 1.5 U ₀ [10 ⁻³]		Střední VLF-TD při U ₀ [10 ⁻³]
Není potřebná žádná akce	* Definitivní identifikace plněné izolace není možná.	<0.1	A	<5	A	<35
	EPR s uhlíkovou výplní (černý)	<0.1		<2		<20
	EPR s minerální výplní (růžový)	<0.1		<4		<20
	** EPR odolný výbojům	<0.1		<6		<100
	** XLPE s minerální výplní	-		-		<100
Doporučeno další zkoumání	* Definitivní identifikace plněné izolace není možná.	0.1 až 1.3	nebo	5 až 100	nebo	35 až 120
	EPR s uhlíkovou výplní (černý)	0.1 až 2.7		2 až 120		20 až 100
	EPR s minerální výplní (růžový)	0.1 až 1		4 až 120		20 až 100
	** EPR odolný výbojům	0.1 až 1		6 až 10		100 až 350
	** XLPE s minerální výplní	-		-		100 až 350
Požadovaná akce	* Definitivní identifikace plněné izolace není možná.	>1.3	nebo	>100	nebo	>120
	EPR s uhlíkovou výplní (černý)	>2.7		>120		>100
	EPR s minerální výplní (růžový)	>1		>120		>100
	** EPR odolný výbojům	>1		>10		>350
	** XLPE s minerální výplní	-		-		>350

* Zkušenosti ukazují, že je poměrně obtížné přesně identifikovat druh plněné izolace u kabelů nainstalovaných v terénu. Související problémy zahrnují: nesprávné nebo chybějící záznamy, nečitelné nebo nesrozumitelné značení na plášti kabelu, nezřetelné zbarvení apod. V těchto případech se doporučuje použít kritéria srovnatelných souborů dat.

** Pro přesné posouzení kritérií nebylo shromážděno dostatek údajů, z tohoto důvodu kritéria pravděpodobně obsahují závažné chyby, viz Přílohu G. Jsou zde však uvedena jako určité vodítko pro techniky, kteří se s těmito izolacemi v terénu setkají.

Tabulka 14, Tabulka 5, IEEE400.2-2013 [10, p. 20] - Hodnotící kritéria pro provozně zestárlé plněné kabely (EPR)

Velmi podobné hodnoty lze ve zjednodušené verzi najít v dokumentu „Příručka pro řídicí program stárnutí středněnapěťových kabelových systémů pro jaderné elektrárny“ zpracovaném Institutem pro výzkum elektrické energie prostřednictvím interaktivního procesu revizí Technické poradní komise. [20]

Table 5-1
Preliminary $\tan \delta$ Assessment Criteria for Butyl Rubber (in terms of $\times 10^{-3}$; 0.1 Hz test frequency) (Note 1)

Condition	$\tan \delta$		Absolute Value of the Difference in $\tan \delta$ Between $0.5 V_0$ and $1.5 V_0$ (Notes 2 and 3)
Good	≤ 12	and	≤ 3
Further study required	$12 < \tan \delta \leq 50$	or	3+ to 10
Action required	> 50	or	$> 10+$

Notes:

1. This is based on Figure C-13 in EPRI report *Plant Support Engineering: Medium-Voltage Cable Aging Management Guide* (1016689) [15] and in-plant test results and consultation with $\tan \delta$ testers.
2. Differentials may be taken at $1 V_0$ and $2 V_0$ at the user's option. See text preceding this table.
3. The difference in $\tan \delta$ is normally positive. Negative differences should be treated as very significant and may indicate a problem with a test or an indication of the presence of a significant defect.

Obr. 67: Tabulka 5-1 – Hodnoticí kritéria EPRI TanDelta pro EPR kabely z butylové pryže [20]

Table 5-2
Preliminary $\tan \delta$ Assessment Criteria for Black EPR (in terms of $\times 10^{-3}$; 0.1 Hz test frequency) (Note 1)

Condition	$\tan \delta$		Absolute Value of the Difference in $\tan \delta$ Between $0.5 V_0$ and $1.5 V_0$ (Notes 2 and 3)
Good	≤ 12	and	≤ 3
Further study required	$12 < \tan \delta \leq 50$	or	3+ to 10
Action required	> 50	or	$> 10+$

Notes:

1. This is based on Figure C-1 in EPRI Report 1016689 [15] and associated in plant results and consultation with $\tan \delta$ testers.
2. Differentials may be taken at $1 V_0$ and $2 V_0$ at the user's option. See text preceding these tables.
3. The difference in $\tan \delta$ is normally positive. Negative differences should be treated as very significant and may indicate a problem with a test or an indication of the presence of a significant defect.

Obr. 68: Tabulka 5-2 – Hodnoticí kritéria EPRI TanDelta pro kabely z černého EPR [20]

Table 5-3
Preliminary Tan δ Assessment Criteria for Pink EPR (Note 1) (in terms of $\times 10^{-3}$; 0.1 Hz test frequency) (Note 2)

Condition	Tan δ		Absolute Value of the Difference in Tan δ Between 0.5 V_0 and 1.5 V_0 (Notes 3 and 4)
Good	≤ 15	and	≤ 3
Further study required	$15 < \tan \delta \leq 30$	or	3+ to 8
Action required	> 30	or	$> 8+$

Notes:

1. This may also be used for "Gray" UniBlend® EPR (approximate time of manufacture from late 1970s on).
2. This is based on Figures C-3 and C-4 in EPRI Report 1016689 [15] and consultation with tan δ testers.
3. Differentials may be taken at 1 V_0 and 2 V_0 at the user's option. See text preceding these tables.
4. The difference in tan δ is normally positive. Negative differences should be treated as very significant and may indicate a problem with a test or an indication of the presence of a significant defect.

Obr. 69: Tabulka 5-3 - Hodnotící kritéria EPRI TanDelta pro kabely z růžového EPR [20]

Table 5-4
Preliminary Tan δ Assessment Criteria for Brown EPR (in terms of $\times 10^{-3}$; 0.1 Hz test frequency) (Note 1)

Condition	Tan δ		Absolute Value of the Difference in Tan δ Between 0.5 V_0 and 1.5 V_0 (Notes 2 and 3)
Good	≤ 50	and	≤ 5
Further study required	$50 < \tan \delta \leq 60$	or	5+ to 15
Action required	> 60	or	$> 15+$

Notes:

1. This is based on Figures C-3 and C-4 in EPRI Report 1016689 [15] and consultation with tan δ testers.
2. Differentials may be taken at 1 V_0 and 2 V_0 at the user's option. See text preceding these tables.
3. The difference in tan δ is normally positive. Negative differences should be treated as very significant and may indicate a problem with a test or an indication of the presence of a significant defect.

Obr. 70: Tabulka 5-4 - Hodnotící kritéria EPRI Tan Delta pro kabely z hnědého EPR [20]

Další informace o kritériích hodnocení TanDelta lze najít v IEEE400.2/D11, v pozdější fázi však byly z D12 odstraněny z důvodu nedostatečných údajů.

Tabulka 7: Užitečné historické údaje pro posouzení stavu provozně zestárlých papírových izolací (tzn. PILC) pomocí měření TD 0.1 Hz - TD do 1.5U₀

Posouzení stavu	Časová stabilita VLF-TD (VLF-TDTS měřeno při standardní odchylce při U ₀ [10 ⁻³])		Diferenční VLF-TD (VLF-DTD) (rozdíl středního VLF-TD) mezi 0.5 U ₀ a 1.5 U ₀ [10 ⁻³]		Střední VLF-TD při U ₀ [10 ⁻³]
Není potřebná žádná akce	<0.1	a	-35 až 10	a	< 85
Doporučeno další zkoumání	0.1 až 0.4	nebo	-35 až - 50 nebo 10 to 100	nebo	85 až 200
Požadovaná akce	>0.4	nebo	< - 50 nebo > 100	nebo	> 200

Posouzení stavu kabelového systému lze provádět s ohledem na charakteristiky VLF-TD v pořadí: dočasná stabilita VLF-TD, poté diferenční VLF-TD, a nakonec střední VLF-TD. Posouzení stavu je dáno nezávažnějším stavem kterékoli charakteristiky. Jakékoli stanovení priorit nebo zvláštní rozlišení mezi úseky zkoušeného kabelového systému lze provést s ohledem na posouzení různých charakteristik. Příklady posouzení stavu kabelových systémů jsou uvedeny v Tabulce 7 dle [10]

Tabulka 15: Tabulka 7, str. 21, IEEE400.2-2013 [10, p. 21] - Hodnotící kritéria pro provozně zestárlé PILC kabely

Poznámka: pro DTD u kabelů PILC

Obr. 5 dle [21] znázorňuje rozložení Tip Up údajů pro různé rozsahy Tip Up, kde je Tip Up rozdíl Tan Delta naměřeného při 1.5U₀ a 0.5U₀. Dle zjištění mnoha pracovníků je u kabelů PILC poměrně běžný negativní Tip Up, nadměrně negativní hodnoty se však považují za netypické stejně jako neobvyklé vysoké hodnoty.

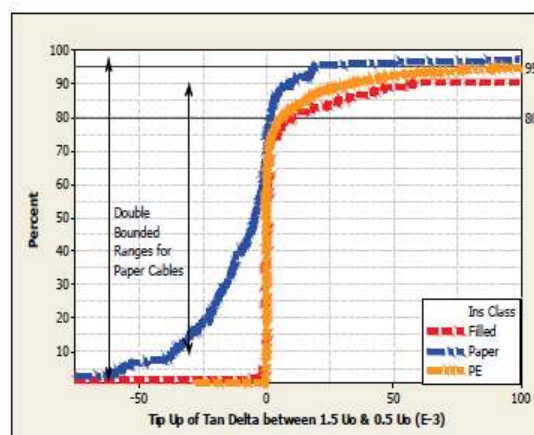


Figure 5: Cumulative Distribution of all Cable System Tip Up Criteria – scale has been expanded to show negative Tip Up on the Paper cables

Obr. 71: Rozložení TD Tip Up u plněných, PILC a PE kabelů [21]

8 Lokalizace a měření úrovně částečných výbojů PD

8.1 Základní informace



Obr. 72: BAUR PHG 70/80 TD PD



Obr. 73: BAUR Frida TD + PD TaD 60

Pomocí měření částečných výbojů s lokalizací zdroje je možné přímo stanovit aktivitu částečných výbojů v kabelových úsecích, spojích nebo koncokách. Měření částečných výbojů je založeno na napěťové křivce VLF truesinus®.

Průchod impulsů částečných výbojů závisí na tlumení v kabelu. Naměřená úroveň proto závisí na vzdálenosti od konce zdroje částečných výbojů. Pro lokalizaci zdroje částečných výbojů je důležitá pouze časová prodleva mezi prvním a odraženým impulsem.

U kabelů XLPE se zdroj částečných výbojů nelokalizuje v samotné izolaci kabelu, nýbrž v příslušenství. Pokud by se lokalizace zdroje částečných výbojů prováděla v izolaci kabelu, vedlo by to v normálním provozu velmi brzy k poruše (stavu elektrických stromečků). Jak ukázala praktická měření, nachází se většina zdrojů částečných výbojů ve spojích. Zdroje částečných výbojů mimo spoje jsou ojedinělé, v těchto případech se jedná většinou o závady pláště.

Z toho vyplývá, že pro diagnostiku částečných výbojů na místě jsou důležité pouze úrovně částečných výbojů v rozsahu několika 100 pC. Nejdůležitější je znalost umístění zdroje částečných výbojů.



Obr. 74: PD Lokalizační graf kabelu XLPE se 3 spoji s aktivitou PD

Teorie detekce PD

Diagnostika kabelů PE/XLPE a PILC

VLF zkouška a diagnostika stárnutí kabelů PE / XLPE pomocí měření ztrátového činitele jsou kritériem, z něhož může vycházet posouzení energetických kabelů. Měření částečných výbojů s lokalizací jejich zdroje pak uzavírá mezeru v diagnostice kabelů PILC a umožňuje posouzení plastových kabelů.

Pomocí zkoušky odolnosti lze posoudit aktuální stav dielektrické pevnosti v nejslabším místě s jednoduchým vyhodnocením „vyhovuje/nevyhovuje“. Tato zkouška se provádí po položení kabelů, po jejich opravách nebo za účelem posouzení provozní bezpečnosti stárnoucích kabelů.

Pomocí diagnostiky VLF měřením ztrátového činitele lze získat všeobecné informace o stavu stárnutí plastových kabelů.

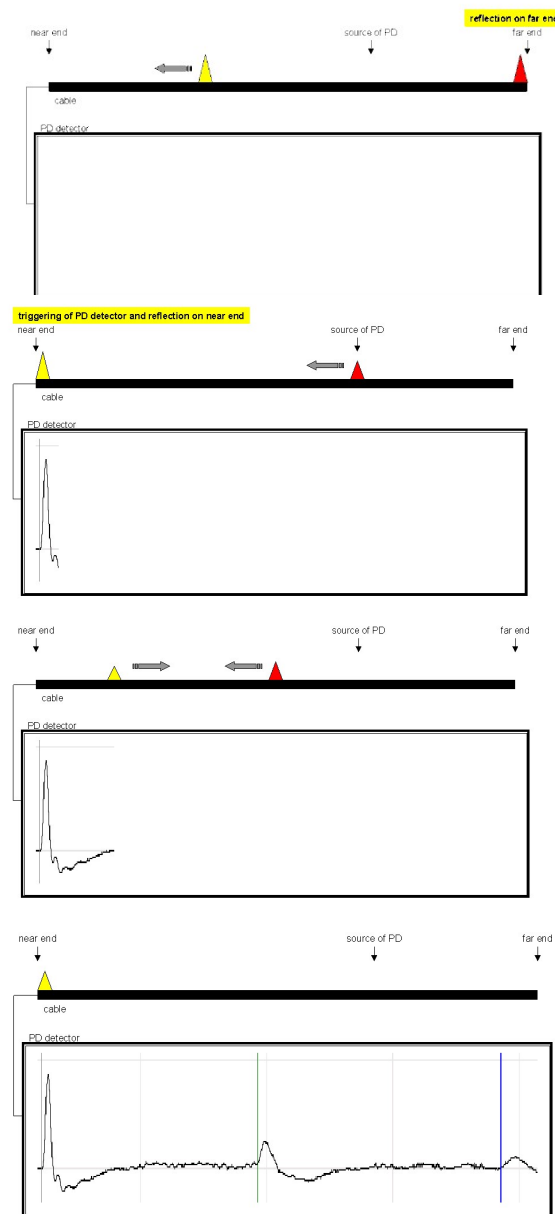
Metoda měření částečných výbojů poskytuje spolehlivé informace o případných chybách při instalaci nebo elektrických stromečcích na plastových kabelech, které nebyly způsobeny průrazem.

Lze odhadnout, zda mohlo být měření ztrátového činitele ovlivněno intenzivními částečnými výboji (například ve spojích).

Pomocí měření částečných výbojů s lokalizací zdroje je možné přímo přiřadit aktivitu částečných výbojů ke kabelovým úsekům, spojům nebo koncovkám. Díky tomu může odpovědná osoba přijmout preventivní opatření, a tím předejít místním poruchám v podniku.

Kromě aplikace na kabelech lze provádět měření úrovně částečných výbojů také na jiných vzorcích.

Měření úrovně částečných výbojů lze začlenit do systému PHG TD, a tím vytvořit systém PHG TD/PD ke zkoušení a diagnostice kabelů. Veškeré důležité údaje lze uložit do programu a tak postupně vytvořit databázi kabelů, díky níž bude možné provádět provozní vyhodnocení výsledků diagnostiky na základě vývoje kabelového systému v průběhu historie.

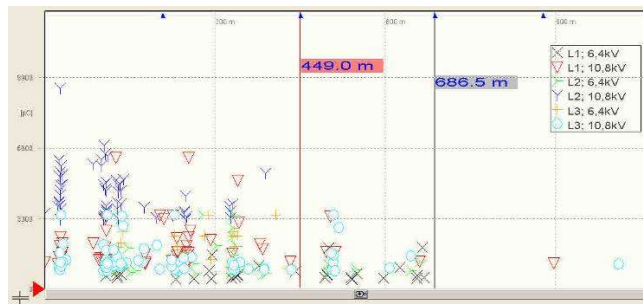


Obr. 77: Grafická posloupnost lokalizace impulsů PD

Zkušební s kabely PILC s papírovou impregnovanou hmotou

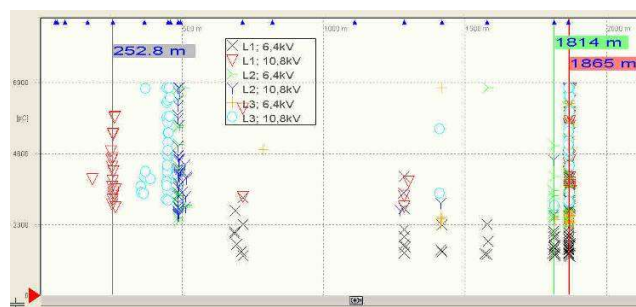
Pokud jde o měřicí techniku, je měření PD u kabelů s papírovou hmotou stejné jako u kabelů XLPE. Nejdůležitější rozdíl spočívá v interpretaci výsledků. Vzhledem ke své konstrukci se kabel s impregnovanou papírovou hmotou vyznačuje množstvím aktivit PD v izolaci. Na rozdíl od kabelu XLPE však nejsou pro izolaci škodlivé.

Vzhledem k tepelné roztažnosti a viskozitě izolační hmoty se v izolaci často otevírají a zavírají póry. Důkazem neškodnosti této charakteristiky jsou kabely s papírovou hmotou vykazující PD hodnoty v řádu nC (na Obr. 78 je to až 5000pC), které jsou však v provozu již více než 80 let. Tato základní úroveň PD samotného kabelu závisí na typu, výrobci, roku výroby a stavu kabelu, a její rozsah sahá řádově od 10 pC až po 1000 pC, aniž by to ohrožovalo provozní spolehlivost kabelu.



Obr. 78: Typický příklad rozptýlené aktivity PD na úseku PILC

Jak již bylo popsáno u kabelů XLPE, provádí se měření PD u kabelů s papírovou hmotou za účelem **lokalizace poruch ve spojích a koncovech** i v samotném kabelu. V některých případech byly detekovány poruchy plášťů (koroze olověných plášťů). Na rozdíl od kabelů XLPE se nikdy neprovádělo rutinní zkoušení PD kabelů s papírovou hmotou u výrobce. Ve srovnání s kabely XLPE je proto interpretace výsledků a provozních rizik mnohem obtížnější.



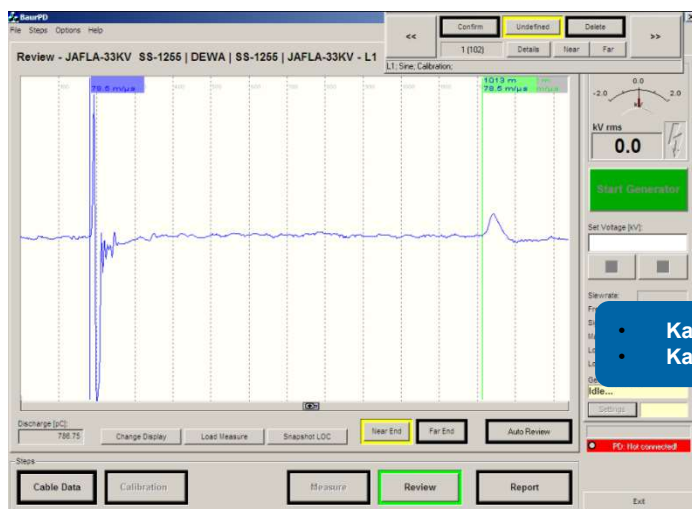
Obr. 79: Typický příklad kabelu XLPE s několika spoji vykazujícími PD aktivitu

Jasná interpretace je možná pouze na základě **porovnání** kabelů různých fází a stejného typu i roku výroby. Obtížnější je navíc i samotné měření. Měřicí systém zaznamená mnohé výboje v kabelu (které nejsou nebezpečné). Každý impuls ukazuje ekvivalentní pozici zdroje. Výsledkem je rozložení mnoha impulsů po celé délce kabelu. Aby bylo možné lokalizovat závadu, jejíž úroveň PD je vyšší než tato „rozptýlená aktivita“, je potřeba získat mnoho záznamů. Přednost je třeba dát měřicím systémům s automatickým rozpoznáním polohy. Praktické zkušenosti ze zařízení v Německu, Rakousku, Itálii, Rusku, na Ukrajině i v jiných zemích ukazují, že navzdory výše uvedeným potížím je možné spolehlivě identifikovat zdroje PD v kabelech PILC. identifikovat lze dokonce i poruchy plášťů.

Kromě toho byly detekovány četné poruchy při korozi vedení u železničních a říčních přejezdů. Z důvodu zvýšení spolehlivosti sítě lze proto lokalizaci a měření PD u kabelů PILC dokonce vřele doporučit.

8.3 Kalibrace

IEC 60270 stanoví způsob provádění kalibrace na místě u každé zkoušky. Jelikož dochází k utlumení amplitudy měřených částečných výbojů – vzhledem k délce kabelu, kterým procházejí – je třeba za účelem detekce zdánlivého náboje Q_a provést korekci činitelem útlumu. Do zkušební sestavy se proto odesílá známý náboj (kalibrační náboj v pC). Ze zaznamenaného grafu lze odvodit délku kabelu i náboj.



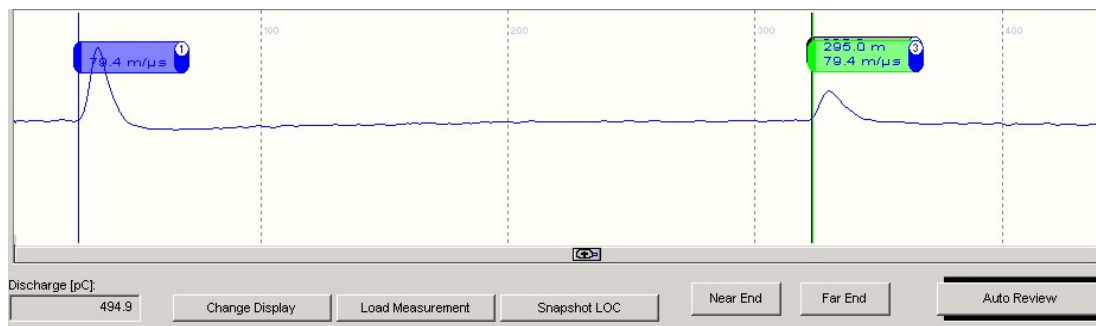
Obr. 81: Snímek softwaru BAUR PD – kalibrační graf



Obr. 80: Vazební prvek PD CU60 s kalibrátorem

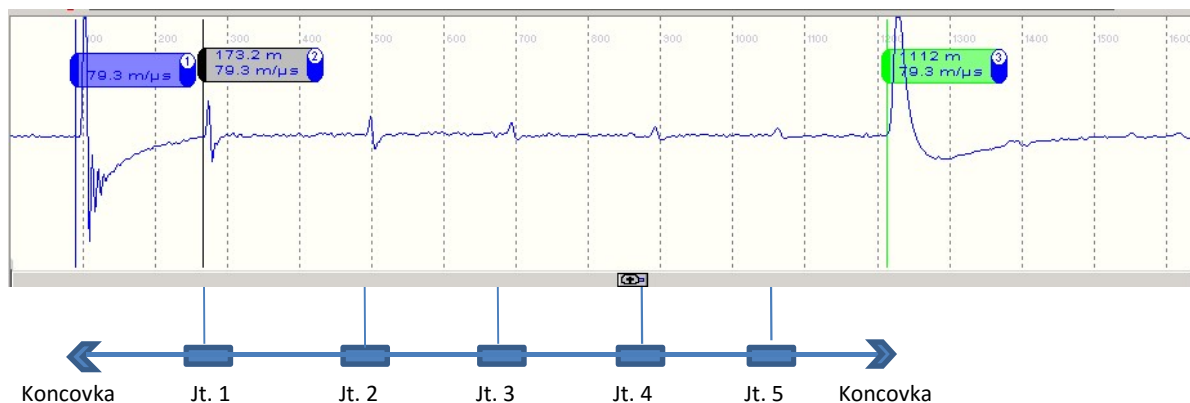
8.4 Využití kalibračního grafu

Kalibrační graf PD je nástroj k určení poloh spojů:



Obr. 82: Kalibrační graf kabelu délky 295 m bez spojů

Kalibrační posloupnost je součástí každého měření PD na místě. Kalibrační graf je velmi užitečný nástroj ke stanovení poloh spojů.



Obr. 83: Kalibrační graf nového kabelu XLPE se 6 stejnými úseky a 5 spoji

Další podrobné charakteristiky grafu vypracoval detailně NEETRAC. [22]. Podle těchto poznatků jsou kalibrační grafy v podstatě grafy TDR, které lze v závislosti na jejich impulsním vzorci použít k určení charakteristik spojů. [22]

3.2.4 Success Criteria

Typical waveforms and their meaning appear in Table 11. The actual appearance of the waveforms varies and will not exactly match those shown in references. Therefore, there are no unified success criteria for TDR testing.

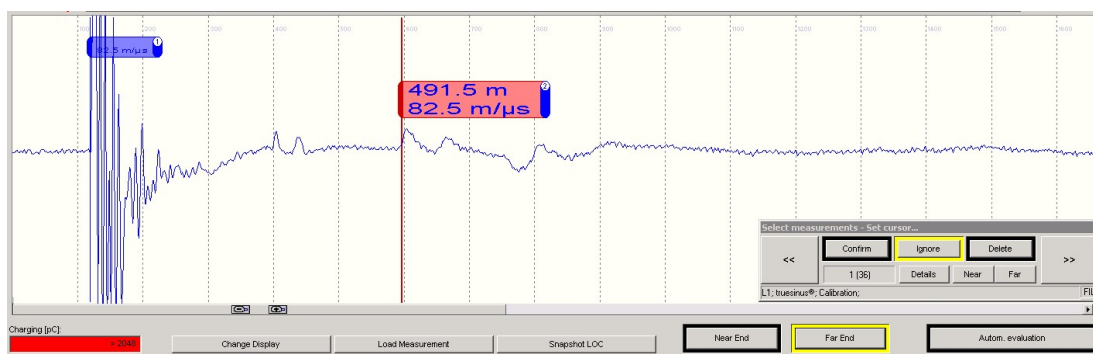
Case	TDR
Uniform cable segment with no joints.	Near End Far End
Uniform cable segment with no joints and shorted conductor at distance L from Near End.	Near End L Far End
Cable segment with a joint at a distance L from Near End.	Near End L Far End
Cable segment with a wet joint at a distance L from Near End.	Near End L Far End
Uniform cable segment with water ingress at a distance L from Near End.	Near End L Far End
Uniform cable segment with localized corroded neutrals at a distance L from Near End.	Near End L Far End

Prepared by NEETRAC under GIRC Project # E-21-RJ1 (incl DE-FC02-04CTH1237)

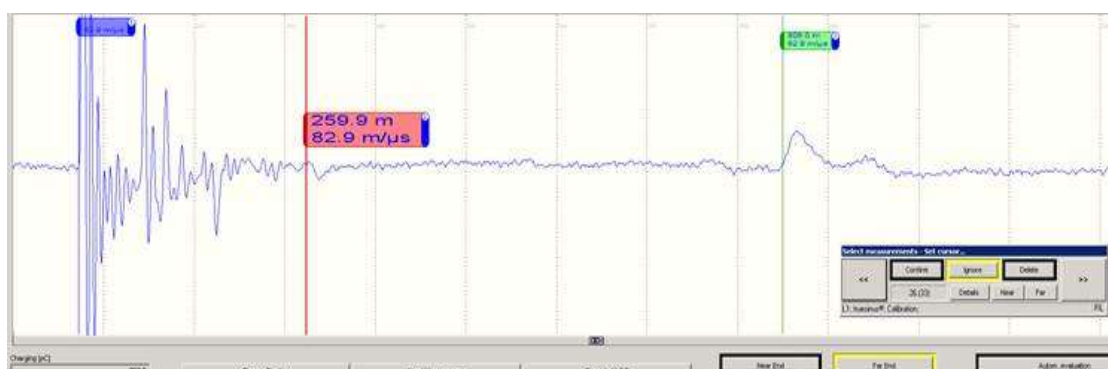
Page 59 of 323

Obr. 84: Tabulka 11 dle, Interpretace grafu TDR k identifikaci stavu kabelu [22]

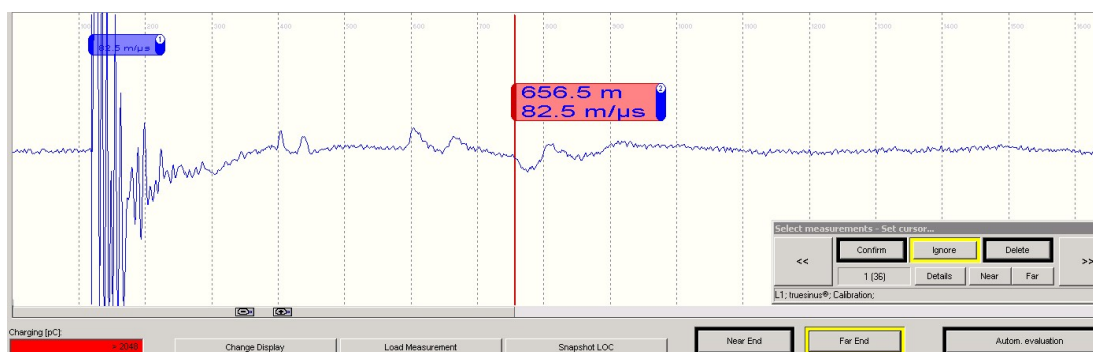
Příklady detekce spojů s nepravidelnou charakteristikou



Obr. 85: Kalibrační graf s identifikací několika spojů, např. 491,5 m



Obr. 86: Kalibrační graf s identifikací spoje s průnikem vody ve vzdálenosti 260 m.



Obr. 87: Kalibrační graf s identifikací spoje s průnikem vody ve vzdálenosti 656,5 m

Analýza TDR je široce používanou metodou lokalizace poruch. Zařízení je lehké a zkušební doba krátká. Postup diagnostiky PD zahrnuje kalibrační fázi. Kalibrační impuls je srovnatelný s impulsem TDR. U této metody však existují otevřené otázky. Aby bylo posouzení spolehlivé, je třeba historické údaje analýzy TDR podrobit dalšímu studiu. Impuls TDR je nízkonapěťový, a má na něj vliv délka kabelu, velký počet spojů i vysoký hluk prostředí. Pro rozlišení běžných změn impedance, které jsou způsobovány přechodovým spojem, a nepravidelnými změnami impedance v důsledku průniku vody jsou potřebné zkušenosti pracovníka. Pečlivé posouzení a interpretace jsou nezbytné k prevenci nesprávných závěrů.

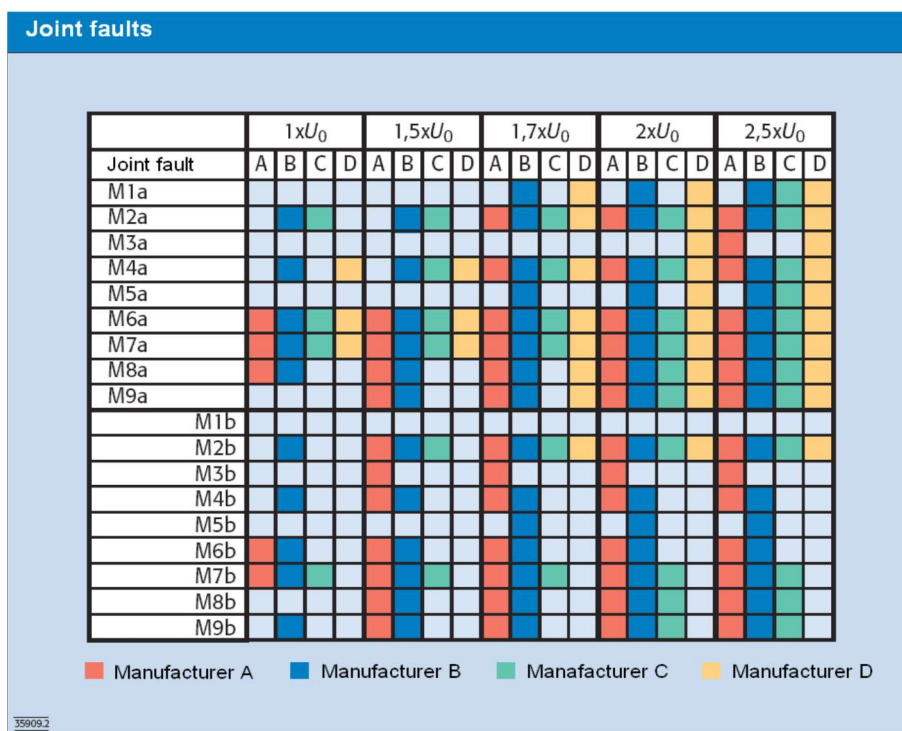
8.4.1 Měření částečných výbojů při VLF a jiných zkušebních napěťových křivkách

Trasování VLF PD a lokalizace poruch PD se v terénních podmínkách prakticky používá více než 10 let.

V roce 2007, byly při srovnávací zkoušce s **různými VN křivkami** u různých umělých poruch, provedené v RWE EUROTTEST v Německu, prokázány **nerovnoměrné výsledky** [19]. Interpretace výsledné velikosti a množství PD nejsou srovnatelné [9]. [23]

Klíčové otázky a výzvy:

- Uživatelé neznají pravidla pro vyhodnocení úrovně různých typů poruch.
- Velikost není známkou závažnosti poškození nebo méně nebezpečné situace v izolaci kabelu.
- Pokud nejsou kabely zkoušeny až k průrazu, není obvykle možné předvídat možné selhání.
- Poruchy na jednom místě lze snadněji lokalizovat použitím impulsních technik.
- Velikost PD někdy neodpovídá nejvážnější nebo nejnebezpečnější poruše, jelikož druh poruchy obvykle není znám.
- Pro lepší rozhodnutí o výměně nebo postupu opravy mohou postačit pouze historické údaje.



Výrobce A:	Systém BAUR VLF PD
Výrobce B:	Sinusové zkušební zařízení 50 Hz (laboratorní zařízení)
Výrobce C:	Oscilační napětí blízké provozní frekvenci, 50 Hz, vysoký útlum
Výrobce D:	Oscilační napětí proměnlivé frekvence s nízkým útlumem

Obr. 88: Matice všech měření provedených u modelových poruch spojů (barevně podbarvená pole označují detekovanou a lokalizovanou aktivitu výbojů) [23]

Na základě otázek a výzev bylo vytvořeno devět různých zdrojů PD, které byly zkoumány různými technikami z obou konců kabelu.

Jak ukazuje Obr. 88, lze všechny poruchy ve spojích, s výjimkou poruchy M1b, detekovat měřeními částečných výbojů. Úroveň lokalizace se však mezi různými měřicími systémy výrazně liší. Jak je vidět, zvyšuje se aktivita částečných výbojů s rostoucím zkušebním napětím, což usnadňuje detekci případné poruchy. Z rozložení zabarvených políček je rovněž patrné, že na vyvolání částečných výbojů má výrazný vliv tvar zkušebního napětí. Dále je možné vidět, že je úroveň měření prováděného na konci vzdálenějším od poruchy (M1b až M9b) nižší než u měření na konci, který je poruše bližší (M1a až M9a).

Měřicí technika VLF PD používaná společností BAUR vykazuje, obecně řečeno, nejlepší schopnost detekovat všechny druhy zdrojů PD ve srovnání s 50Hz systémy k detekci PD, které se používají v laboratořích. U oscilačního napětí (při 50 Hz a tlumené oscilační vlně) jsou patrné velké odchylky ve schopnosti detekovat slabá místa u různých typů spojů.

Další podrobnosti lze najít v úplné zprávě [23] (Srovnání dostupných měřících metod, RWE-Eurotest).

8.5 Výhody VLF PD diagnostiky

- Spojité měření částečných výbojů a TanDelta lze **během standardního zkušebního postupu** provádět po předepsané časové období (MWT- Monitorovaná zkouška odolnosti). **Opakovatelné zkušební podmínky** slouží k vyhodnocení napěťových charakteristik na začátku a vyhasnutí PD.
- Kalibrace dle IEC 60270.
- **Měření úrovně PD nezávislé na délce**
- Nejvyšší přesnost lokalizace PD
- Monitorování PD po **definovatelné časové období** umožňuje detekci zdrojů PD, které vznikají teprve po určité době aplikace vysokého napětí.
- Měření PD **během zkoušky při uvádění do provozu** s VLF zkušebním napětím (MWT)
- **Přesná lokalizace místa PD** pro potvrzení předběžné lokalizace v terénu.
- **Reprodukovatelné měření úrovně PD a lokalizace**
- Měření PD **nezávislé na hodnotě kalibračního náboje**
- **Automatické** i ruční vyhodnocení výsledných PD



Obr. 89: Přenosný terénní detektor PD s lokalizací PD (přenosný BAUR PD)

8.6 Napětí při vzniku PD (PDIV) a vyhasnutí PD (PDEV)

Charakteristika zdroje částečných výbojů je určena napětím při jeho vzniku a vyhasnutí.

Napětí při vzniku PD (PDIV) je definováno jako úroveň napětí, na níž začíná aktivita PD. Jedná se o nejdůležitější hodnotu. Obecně je důležité vědět, zda je zdroj PD aktivní při jmenovitém napětí U_0 , které je rovno jmenovitému provoznímu napětí. Je-li PDIV nižší nebo rovno U_0 (napětí mezi fází a zemí), je zdroj PD aktivní za běžného provozu kabelu.

V tomto případě jsou částečné výboje **trvale aktivní a dochází k permanentnímu poškozování izolace**. V závislosti na místě může být izolační materiál v jeho okolí více či méně odolný nepřetržitému jiskření. Jelikož aktivita PD způsobuje vývoj tepla a zuhelnatění, je třeba se zdroji PD, jejichž PDIV je rovno U_0 nebo nižší, zacházet jako s vážným ohrožením spolehlivého výkonu kabelu.

Je-li PDIV vyšší než U_0 , je třeba postupovat jinak. Tento zdroj PD nebude za normálního provozního napětí aktivní. K dočasnému zvýšení provozního napětí na úroveň PDIV může dojít při určitých spínacích cyklech nebo krátkodobých poruchových stavech.

Úroveň PDEV je třeba posoudit s ohledem na tyto podmínky.

Zhásecí napětí PD (PDEV) je definováno jako úroveň napětí, na níž skončí aktivita zdroje PD. Určité zdroje PD vykazují charakteristiky, kdy je **PDEV nižší než PDIV**. Leží-li PDIV pouze těsně nad U_0 , může dojít v rámci spínací sekvence, při níž se dočasně zvýší napětí, ke vzniku aktivity PD. Je-li PDEV nižší než U_0 , může zdroj PD tohoto druhu zůstat aktivní také poté, co se napětí v síti znovu vrátí na úroveň jmenovitého napětí U_0 . zdroj PD tohoto typu je třeba brát vážně, jsou však velmi ojedinělé.

8.7 Interpretace výsledků PD – pokyny

8.7.1 Měření PD u kabelů XLPE

U kabelů XLPE a EPR se aktivity PD vyskytují převážně v kabelovém příslušenství. V samotné XLPE izolaci lze detekovat PD velmi zřídka. Vyskytnou-li se PD v XLPE izolaci (elektrické stromečky), dojde během několika dnů či maximálně týdnů k selhání kabelu. Proto je velmi nepravděpodobné, že by byla diagnostika PD provedena přesně v tomto krátkém časovém rozmezí.

Další příčina aktivit PD k úseku kabelu XLPE může spočívat ve vážném poškození vnějšího ochranného pláště.



Obr. 90: Graf PD kabelu XLPE s aktivitou PD soustředěnou ve 3 spojích

Provedení s novým kabelem XLPE:

- Žádné přijatelné PD během uvádění do provozu;
- < 100pC úroveň PD do $1,7U_0$ musí být nižší než < 100pC
- S ohledem na všechny koncovky, spoje i celý kabel

Staré koncovky / spoje XLPE

PDIV > U_0 :

- 500pC Místo je třeba zaznamenat, akce není naléhavě potřebná.
Doporučeno opakované měření po 2 letech.
- 2000pC Je třeba zvážit výměnu daného místa ve středním časovém termínu.
Doporučeno opakované měření po 1 roce.

PDIV < U_0 :

- 500pC Místo je třeba znovu zkontrolovat po 6 měsících.
- 2000pC Vysoká možnost poruchy; je třeba naplánovat výměnu.
- 4000pC Velmi vysoké provozní riziko; nutná okamžitá výměna.

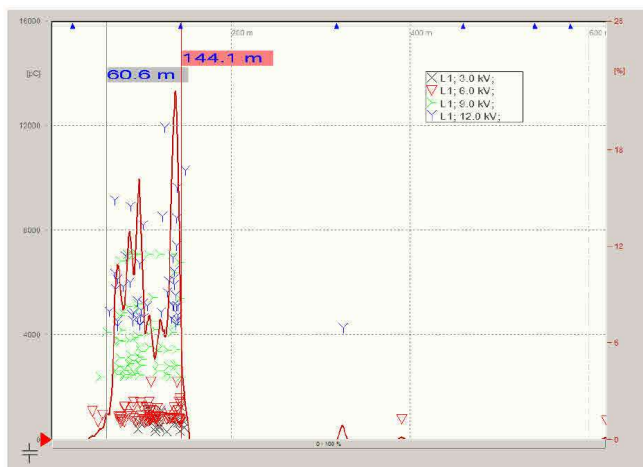
Poznámka: Je třeba uvážit rozdílné hodnoty pro

- Spoje / koncovky smršťované za tepla
- Spoje / koncovky smršťované za studena
- Přejížděvací spoje (XLPE- PILC ve smíšených kabelech)
- Různé výrobce spojů

8.7.2 Měření PD u obvodů s PILC a smíšenými kabely

PD detekované ve spojích a koncovkách vykazují v určitých místech vysokou koncentraci. Dva či dokonce tři spoje v délce několika metrů mají za následek menší koncentraci vzorku PD.

U kabelů PILC jsou zcela běžné nekoncentrované PD po celé délce (rozptýlené aktivity PD). Určitá úroveň není škodlivá, je dokonce běžným důsledkem konstrukce kabelu. Pokud se v určité délce kabelu vyskytnou koncentrovanější PD, může to být známkou poškození kabelu, např. koroze olověného pláště, vyschlých úseků apod. U vyschlých kabelových úseků, z nichž unikl olej, jsou patrné vyšší úrovně PD, které lze odpovídajícím způsobem identifikovat. K vysoušení často dochází u kabelů nainstalovaných na úbočích kopců, a to v závislosti na jejich svahu.



Obr. 91: Graf PD smíšeného kabelu s rozptýlenou aktivitou PD v úseku PILC

Aktivity PD **podél kabelu** (vyschlé úseky): ~ 9000pC

Aktivity PD **v příslušenství** (koncovky / spoje):

PDIV > U_o:

20.000pC	Místo je třeba zaznamenat, akce není naléhavě potřebná. Doporučeno opakované měření po 2 letech.
50.000pC	Je třeba zvážit výměnu daného místa ve středním časovém termínu. Doporučeno opakované měření po 1 roce.

PDIV < U_o:

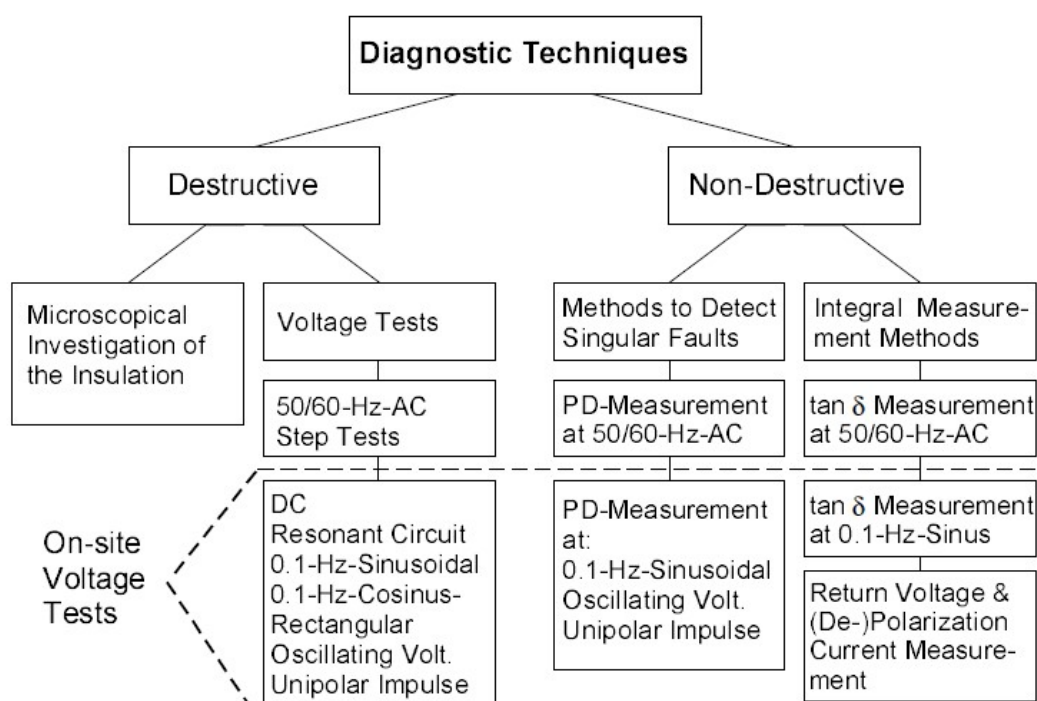
10.000pC	Místo je třeba znovu zkontrolovat po 6 měsících.
20.000pC	Vysoká možnost poruchy; je třeba naplánovat výměnu
40.000pC	Velmi vysoké provozní riziko; nutná okamžitá výměna.

Poznámka: Je třeba uvážit rozdílné hodnoty pro

- Koncovky plněné olejem
- Spoje s papírem/olejem
- Přechodové spoje (XLPE- PILC ve smíšených kabelech)
- Různé typy kabelů PILC

9 Další metody dielektrické diagnostiky – jejich teorie a vhodnost

Aby byla zajištěna vysoká spolehlivost během trvalého provozu, jsou před uvedením kabelových systémů do provozu mimořádně důležité zkušební postupy. Uživatelé kabelových systémů kromě toho zajímají podrobnější informace o stavu stárnutí izolace. Obrázek 92 obsahuje celkový přehled používaných a vysvětlených diagnostických technik.



Obr. 92: Přehled diagnostických technik [24]

Polarizační a vodivé procesy v izolačním materiálu, např. XLPE, jsou přímo závislé na struktuře materiálu. Na tyto procesy má rovněž vliv stárnutí, zhoršování stavu v důsledku vodních stromečků, obsah vlhkosti, tloušťka izolace apod. Měření ztrátového činitele u středněnapěťových kabelů XLPE prokázala, že je vyhodnocení stavu stárnutí možné.

Stav stárnutí kabelů na polymerové bázi lze navíc charakterizovat na základě měření zpětného napětí, které rovněž vychází z procesů polarizace a vodivosti a používá se ke zkoušení transformátorů izolovaných olejovým papírem. [25]

Obě metody je třeba krátce vysvětlit. Podrobný technický popis lze najít v příslušné dokumentaci.

Dále je vysvětlena aplikace metody rozkmitání frekvence na kabely.

9.1 Systém k diagnostice kabelů KDA 1 – IRC - Analýza

Přístroj KDA 1 (Seba-Dynatronic) k diagnostice kabelů je založen na měření depolarizačního proudu. Zkoušený kabel je po dobu 30 minut nabíjen napětím 1 kV DC. Poté je kabel na 5 sekund zkratován, a následujících 30 minut se měří depolarizační proudy (Obr. 93). Naměřené údaje se uloží a zpracují pomocí analýzy izotermního relaxačního proudu (IRC). Naměřený depolarizační proud je popsán jako souhrn tří experimentálních funkcí, přičemž parametry a_i , τ_i výrazně souvisejí s vlastnostmi materiálu. Časová konstanta τ_3 souvisí s degradací vlivem vodních stromečků v kabelové izolaci.

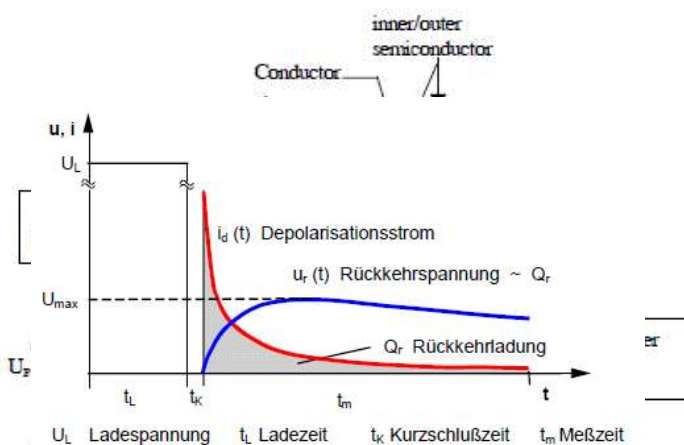


Bild 5: Prinzip ausgewählter zeitrechtsbasierter Diagnoseverfahren

Obr. 94: (Obr. 5 dle [24]): Princip vybrané diagnostické metody založené na časovém rozmezí
 Obr. 93: Základní měřicí obvod pro analýzu IRC, KDA1

Vypočítá se empirický činitel stárnutí (faktor A), který slouží ke klasifikaci stavu stárnutí kabelu. Tento činitel se vypočítá z depolarizačního proudu na základě časových konstant.

Vhodnost KDA1 pro podzemní kabely:

- Studie prokázaly, že výsledek IRC není zcela přesvědčivý s ohledem na výsledné detaily.
- Časově náročná diagnostická metoda

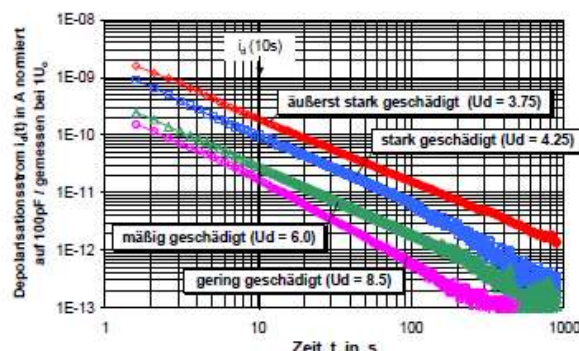
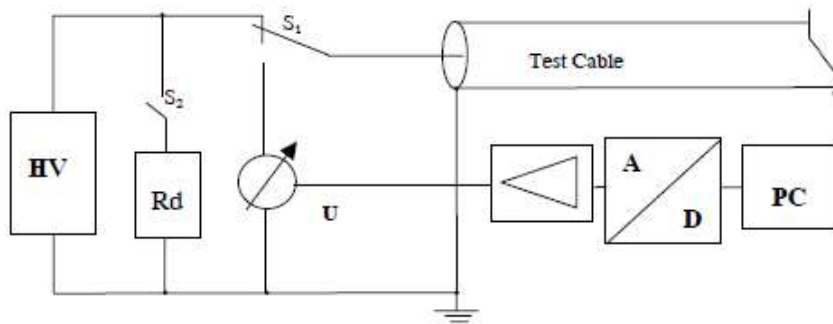


Bild 7: Depolarisationsströme normiert auf 100pF für unterschiedlich stark WT-geschädigte PE/VPE-Homopolymer-isolierte Kabel (sortiert nach elektr. Restfestigkeit U_d):
 Parameter: Ladedauer 15min, Kurzschlußdauer 1sec, Meßdauer 15min, Ladespannung $1U_0$

Obr. 95: (Obr. 7 dle [24]): Depolarizační proud u různých kabelů PE/VPE kabelů poškozených vodními stromečky

9.2 Systém k diagnostice kabelů CD30/31- Metoda zpětného napětí

Systém CD30 k diagnostice kabelů slouží k vyhodnocení stupně stárnutí a stavu poškození PE a XLPE kabelů od 1 kV do 30 kV. Model CD31 je určen pro kabely s olejovým papírem. Přístroje jsou založeny na měření **zpětných napětí** při různých nabíjecích napětích (Obr. 96). Zkoušený kabel je po dobu 5 minut (spínač S_1) nabíjen stejnosměrným napětím (0,5, 1, 1,5, $2U_0$). Poté je zdroj vysokého napětí vypnut a spínač S_2 na dvě sekundy sepnut, čímž se kapacitance kabelu vybije přes odpor R_D . (Hagenuk)



Obr. 96: Blokové schéma metody zpětného napětí [14]

Po uplynutí této doby se po dobu 10 až 40 minut, v závislosti na délce kabelu, měří zpětné napětí. Přitom je kabel připojen k měřicímu přijímači vysoké vstupní impedance U (spínač S_1). Naměřená hodnota zpětného napětí je digitalizována a odeslána do PC. Maximální hodnoty zpětných napětí jsou zakresleny jako funkce nabíjecího napětí. Tento vztah může být lineární nebo nelineární. Faktor linearity, který se vypočítá jako poměr maximální hodnoty zpětného napětí při $2U_0$ a U_0 , slouží jako indikátor stavu stárnutí. Činitel vyšší než 2 se považuje za nelineární odezvu, která signalizuje stárnutí kabelu; faktor 3 indikuje vážně zestárlý kabel. [14]

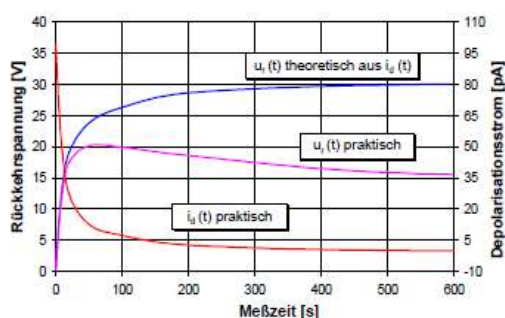


Bild 9: Vergleich zwischen der aus dem Depolarisationsstrom berechneten Rückkehrspannung und der praktisch erzielbaren Rückkehrspannung

Obr. 97: Obrázek 6 dle [24], Porovnání zpětného napětí vypočteného z depolarizačního proudu a prakticky

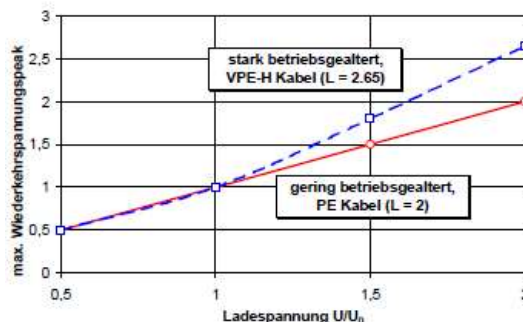


Bild 6: Rückkehrspannungsspeak in Abhängigkeit der Ladespannung für unterschiedlich stark geschädigte PE/VPE-Kabel (Meßbeispiel, $t_L = 5$ min, $t_K = 2$ sec.)

Obr. 98: Obrázek 9 dle [24], Špičkové zpětné napětí pro rozdílně zestárlé kabely PE/VPE.

9.3 Systém k diagnostice izolace IDA 200 – Sinusová korelační technika

Systém k diagnostice izolace IDA 200 je systém, který měří celkovou impedanci kabelu při **proměnlivém napětí a frekvenci** (kapacitanci a $\tan \delta$ při 0,0001-1000 Hz). Zařízení ke zpracování digitálního signálu (DSP) generuje zkušební signál požadované frekvence (Obr. 99).

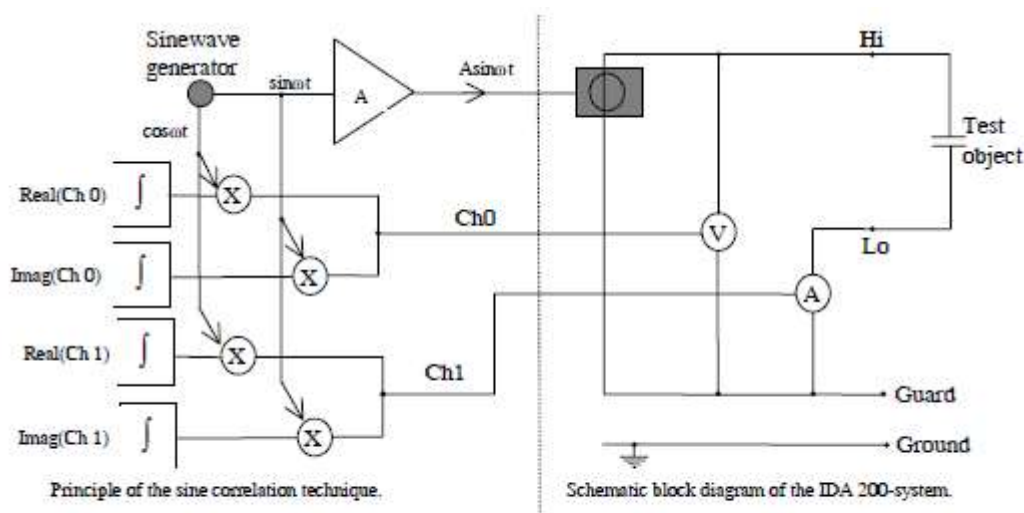


Fig. 10. Schematic block diagram of the IDA 200-system and the principle of the sine correlation technique.

Obr. 99: Obr. 10 dle [22] Blokové schéma systému IDA 200

Signál je zesílen ve vnitřním zesilovači, a poté odeslán do kabelu. Napětí nad vzorkem a protékající proud se měří s vysokou přesností pomocí děliče napětí a elektroměru.

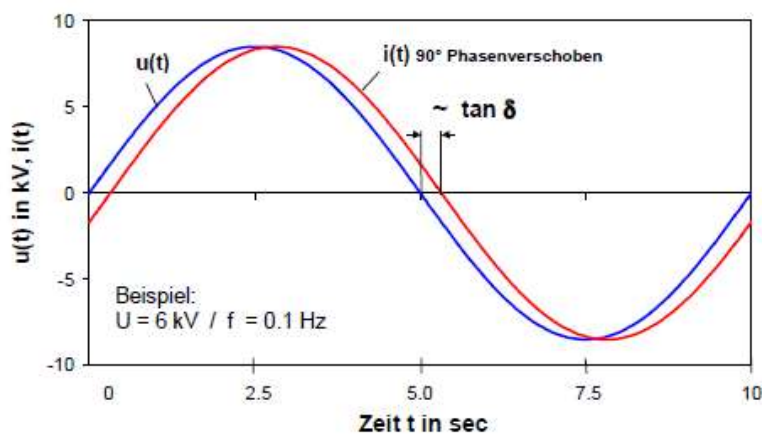
Na měřicím vstupu používá IDA 200 zařízení DSP, které násobí vstupní (měřicí) signál s referenčním sinusovým napětím, a poté zahrne výsledky do množství cyklů. Touto metodou lze potlačit šum a rušení – díky čemuž může IDA 200 pracovat s úrovní napětí do 200 V, a přesto stále dosahovat vysoké přesnosti a analytických detailů. (Programa) [14]

Vhodnost IDA 200 pro podzemní kabelové sítě

- Pomocí spektroskopie v kmitočtové oblasti nelze v kabelech XLPE identifikovat stárnutí vlivem vodních stromečků
- Určeno k analýze stavu stárnutí izolace s olejovým papírem
- Určení dielektrických ztrát v požadovaném rozsahu napětí vysokonapěťového zdroje
- Není určeno k analýze dielektrické odezvy kabelů XLPE
- Stav stárnutí XLPE a smíšených kabelů pomocí VLF zdroje 0.1 Hz

9.4 Systém PHG TD ke zkoušení a diagnostice kabelů

Přístroj PHG TD slouží k měření $\tan \delta$ při různých úrovních sinusového napětí udržovaného na 0,1 Hz. Jako diagnostická kritéria se používají hodnoty $\tan \delta$ při $2U_0$ a rozdíl mezi hodnotami $2U_0$ a U_0 . Hodnota $\tan \delta$ vyšší než $1.2 \cdot 10^{-3}$ při $2U_0$ nebo rozdíl mezi $\tan \delta$ při $2U_0$ a U_0 vyšší než $0.6 \cdot 10^{-3}$ signalizuje zhoršení stavu vlivem vodních stromečků. (Baur)



Obr. 100: Měření Tan Delta [14]

10 Příklad protokolu

10.1 Praktické příklady pro základní pochopení

10.1.1 Příklad 1: Požadavek na citlivost systému k měření TD

Nové kabely XLPE vykazují velmi nízké hodnoty TanDelta. Hodnota u takového kabelu může být nižší než 0.2 E-3 . Aby bylo možné porovnat výsledky TanDelta několik let starých kabelů a nových kabelů, je třeba použít zařízení s měřicím rozsahem 1 E-4 . Přesnost musí být navíc nižší než 1 E-5 . Protokol TD na Obr. 101 ukazuje poměrně nový kabel. Na L2 a L3 se částečné výboje nevyskytují a jejich stav TD je podobný jako u nového kabelu. Citlivé měření ukázalo, že je stav L1 stejný do 19.7 kV ($1,5U_0$). Hodnota $2U_0$ v porovnání s ostatními fázemi roste. Z uzavřeného měření PD (Obr. 102) vyplývá, že se na vzdáleném koncovce L1 vyskytuje aktivita PD se spouštěcím napětím $1,7U_0$.

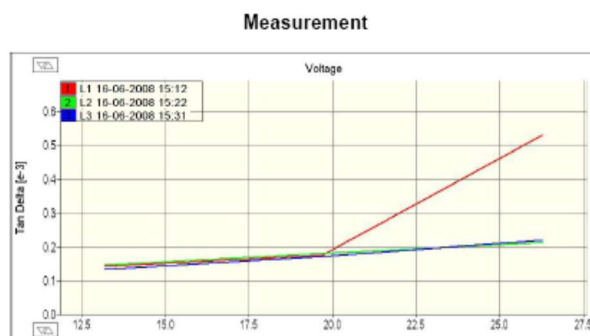
Shrnutí:

Vyplývají-li z výsledků TanDelta ploché grafy napětí, lze v zásadě říci, že se v kabelu pravděpodobně nevyskytuje žádná aktivita PD.

Z grafu TD (Obr. 101) vyplývá, že je třeba zejména u L1 provést analýzu zdrojů PD pomocí měření PD.

Použije-li se jakýkoli přístroj s nevhodným měřicím rozsahem, rozdíl L1 pravděpodobně nebude možné rozeznat a stav kabelu bude vyhodnocen jako vynikající.

Z výsledku trasování PD vyplývá aktivita PD na vzdálené koncovce L1. 450pC při $1,7U_0$. Tato koncovka byla zkontrolována a byla naplánována její výměna.



Cable can be returned to service

Evaluation

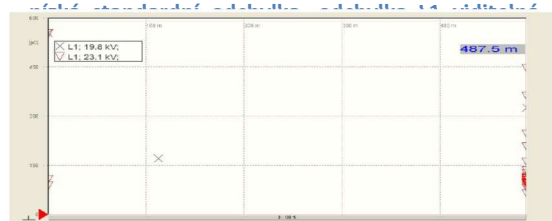
Evaluation Name	XLPE
Expression	Comment
TD(2xU0)-(U0)>1.0	Cable with high operating risk
TD(2xU0)>2.2	Cable with high operating risk
TD(2xU0)=1.2	Cable can be returned to service
TD(2xU0)-(U0)>0.6	Cable can be returned to service
TD(2xU0)>1.2	Highly service aged cable

#	Time	Voltage kV	Current mA	Tan Delta E-3
1	15:26:14	19.7	1.8	0.18
2	15:26:24	19.7	1.8	0.18
3	15:26:34	19.7	1.8	0.18
4	15:26:44	19.7	1.8	0.18
5	15:26:55	19.7	1.8	0.18
6	15:27:04	19.7	1.8	0.18
7	15:27:15	19.7	1.8	0.18
8	15:27:25	19.7	1.8	0.18

Phase : L2
 Date/Time : 16-06-2008 15:27:26
 Step : 2
 Avg. Value Tan Delta : 0.182 E-3
 Standard Deviation : 0.001 E-3
 No. of Tests : 8
 Load : 147.4 nF
 Test sample VSE current : 110.5 uA
 Generator VSE current : 10.0 uA

Phase	Step	Voltage kV	Avg. Value Tan Delta	Std. Dev. [e-3]	Amount
L1	1	13.2	0.145	0.002	8
L1	2	19.7	0.177	0.001	8
L1	3	26.3	0.531	0.012	8
L2	1	13.2	0.148	0.002	8
L2	2	19.7	0.182	0.001	8
L2	3	26.3	0.215	0.010	8
L3	1	13.2	0.136	0.001	8
L3	2	19.7	0.173	0.002	8
L3	3	26.3	0.221	0.011	8

Obr. 101: Příklad hodnot TD u nového kabelu XLPE,



Obr. 102: Aktivita PD v L1, spouštěcí napětí 19kV , 450pC při $1,7U_0$, vzdálená koncovka

10.1.2 Příklad 2: Měření TD ovlivněné vniknutím vody do spojů

- Podmořský kabel 22.9kV XLPE
- Rok instalace: 1985
- Přibližná délka: 4400 m

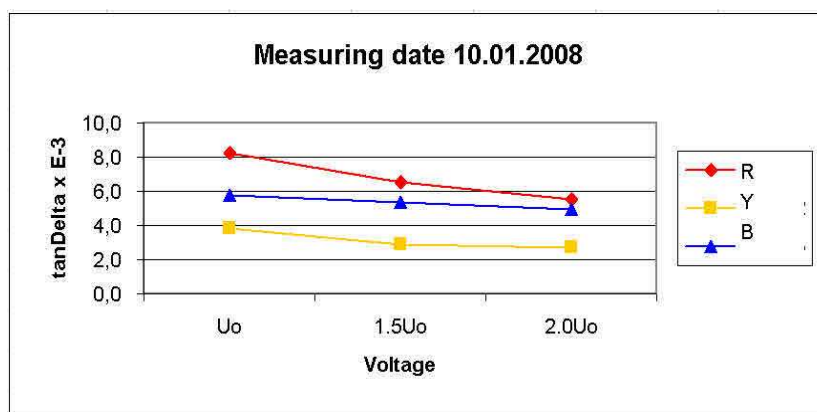
V tomto příkladu byla 1. diagnostika TanDelta provedena v lednu 2008. Hodnoty TD u všech 3 fází vykazují negativní hodnoty DTD (Obr. 104). Vysoká standardní odchylka má hodnotu 0.110 E-3. Negativní hodnota DTD je známkou toho, že se v průběhu měření TD mění svodový proud v kabelu včetně veškerého příslušenství.

Nejpravděpodobnější příčinou tohoto chování je spoj, do kterého vnikla voda. Během měření TD se může voda vypařovat a spoj do určité míry vysychat. Vysoká standardní odchylka (představující nestabilní svodové podmínky) je jako vedlejší účinek jasnou známkou vody ve spoji. Z tohoto důvodu tento první výsledek zatím neznamena hodnotu TD kabelu. V takovém případě je třeba opakovat měření TD v každé fázi bez přerušení. Opakovaný výsledek bude s největší pravděpodobností mnohem nižší než hodnota U_0 z prvního měření.

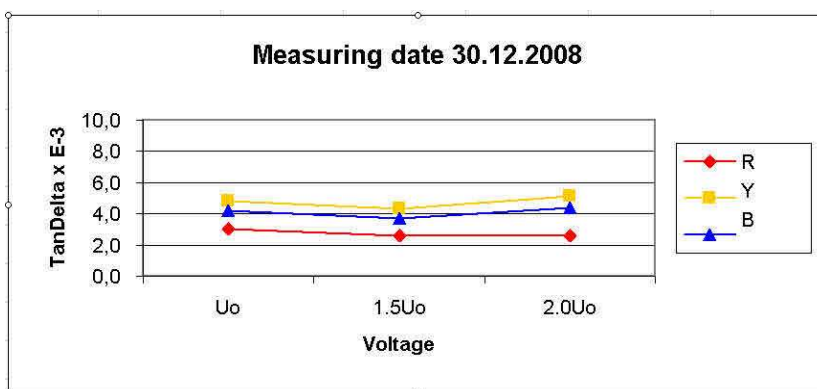
Po prvním měření v lednu 2008 byl kabel ponechán v provozu bez jakéhokoli zásahu. Opakované měření po jednom roce vykazuje mnohem vyšší hodnoty TD. Mírně negativní tendence mezi U_0 a $1,5U_0$ je nejspíše způsobena malou zbytkovou vlhkostí ve spoji. Další hodnoty mezi $1,5U_0$ a $2U_0$ ukazují skutečnou hodnotu TD v kabelu.

Proč začíná první měření na mnohem vyšší hodnotě než druhé? Jaký je během diagnostiky rozdíl mezi kabelem pod napětím a aplikací VLF napětí?

Tyto otázky nemají souvislost s aplikovaným napětím. Jak síťové napětí, tak VLF napětí aplikovaná během měření TD způsobují vypařování vody. Důležitou roli hraje v tomto případě doba mezi vypnutím kabelu a provedením měření TD. V prvním případě byl kabel vypnut několik hodin a do spoje mohla proniknout voda, zatímco ve druhém případě byla 30. 12. 2008 zkouška provedena bezprostředně po vypnutí.



Obr. 104: Výsledek TD z 10. 1. 2008, vysoké provozní riziko, klesající DTD, vliv vody, která vnikla do spoje

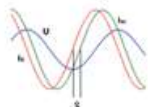


Obr. 103: Výsledek TD z 30. 12. 2008, vysoké provozní riziko, bez vlivu vody

Shrnutí:

V tomto praktickém příkladu nepředstavovalo první měření hodnotu ztrátového činitele kabelu. Měření bylo vysoce ovlivněno vniknutím vody do spoje. Ani měření PD neukázalo žádnou aktivitu. Voda brání vzniku aktivit PD. Druhé měření představuje kabel, a tento kabel byl nakonec vyhodnocen jako kabel s vysokým provozním rizikem. Jelikož se jedná o podmořský kabel, který je v provozu již více než 20 let, je vzat do úvahy účinek vodních stromečků po délce kabelu. Hodnota TD při $2U_0$ přesáhla $2.2E-3$ a byla naplánována výměna kabelu.

10.2 Příklad protokolu o kombinované diagnostice TD / PD

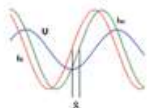


BAUR VLF Testing and Diagnosis Report
Combined TanDelta & Partial Discharge Diagnosis



Protokol č. H1011025

HEC zn.:	EHT 423
Datum zkoušky:	27. 10. 2011
Počasí:	Dobré
Vlhkost:	60 %
Žadatel:	Energetické zařízení
Umístění kabelu:	Z místa: Zone Terrace Z/S, Sw. #31 Do místa: Hiller St 7, Sw. #1
Typ kabelu:	XLPE
ID měření:	
Bližší konec (od):	Zone Terrace Z/S, Sw. #31
Vzdálený konec (k):	Hiller St 7 Sw1, Sw. #1
Rychlost impulsu (m/μs)	88.0
Délka kabelu:	1183 m
Jmenovité napětí::	11 kV
Výrobce:	
Rok výroby:	
Počet fází:	3
Stav půdy:	n/a
Polohy spojů:	18 spojů
Místo zkoušky:	Zone Terrace Z/S, Sw. #31



BAUR VLF Testing and Diagnosis Report
Combined TanDelta & Partial Discharge Diagnosis



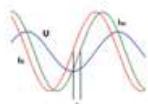
Rated Voltage	Material Code	Size	Length(m)
11	AX	300sqmm	651
11	CX	300sqmm	465
11	CXS	300sqmm	67

Jnt	MAKE	DATE	WEATHER	LUG	ENGINEER	JOINTER	SWITCH	REMARKS	MAP	CO-ORDINATE	SKETCH NO
X	RAYR	08-JUN-1995	FINE			5542		1			
1	RAYR	08-JUN-1995	FINE			5542	J 713		11SW15B2	837263.657,815545.966	0600/1995
							J1393		11SW15B2	837270.382,815521.578	0600/1995
2	RAYR	08-JUN-1995	FINE			5542	J 713		11SW15B2	837297.962,815550.756	0600/1995
							J1297				
							J1393				
3	RAYR	24-MAR-1993	UNKNOWN			4392	J 839		11SW15B2	837337.785,815556.677	290/1994
4	RAYW	01-SEP-2006	CLOUDY			4388	S5079		11SW15B2	837360.844,815579.569	2270/2006
							S5006				
5	RAYW	01-SEP-2006	CLOUDY			4388	S4995		11SW15B2	837363.599,815582.470	2270/2006
							S6158				
6	RAYW	03-SEP-2000	CLOUDY			4238	J5001		11SW15B2	837405.580,815559.358	2265/2000
							J5686				
7	RAYW	20-AUG-2003	FINE			4243	S5637		11SW15B2	837408.714,815556.776	1928/2003
8	RAYW	14-AUG-2003	RAIN			5963	W1299		11SW15B2	837441.388,815546.672	2147/2003
9	RAYW	20-AUG-2003	FINE			4243	S6297		11SW15B2	837497.537,815533.381	1928/2003
10	RAYR	09-DEC-1994	UNKNOWN			4228	J1250		11SE11A1	837527.192,815537.379	0516/1995
							J 934				
11	RAYW	21-JUL-2005	RAIN			2994	S5686		11SE11A1	837610.954,815517.753	2168/2005
							S5191				
12	RAYW	21-JUL-2005	RAIN			2994	S5004		11SE11A1	837614.570,815516.965	2168/2005
							S5014				
13	RAYR	09-DEC-1994	UNKNOWN			4228	J1250		11SE11A1	837628.291,815510.023	0516/1995
							J 934				
14	RAYW	21-JAN-2002	FINE			5542	S6297		11SE11A1	837778.936,815424.549	0716/2002
15	RAYW	18-JUL-2000	RAIN			5542	S5446		11SE11A1	837739.534,815468.068	2210/2000
							S5047				

Jnt	MAKE	DATE	WEATHER	LUG	ENGINEER	JOINTER	SWITCH	REMARKS	MAP	CO-ORDINATE	SKETCH NO
16	RAYW	26-MAR-2003	FINE		5850	W1297			11SE11A1	837714.288,815530.492	0712/2003
17	RAYW	25-FEB-2003	FINE		5850	W 407			11SE11A1	837735.084,815545.155	0712/2003
18	RAYW	07-JAN-2003	FINE		5850	W 407			11SE11A1	837727.767,815559.969	0712/2003
Y	RAYR	26-FEB-2003	FINE		5850	W1239	31		11SE11A1	837700.071,815569.544	0712/2003

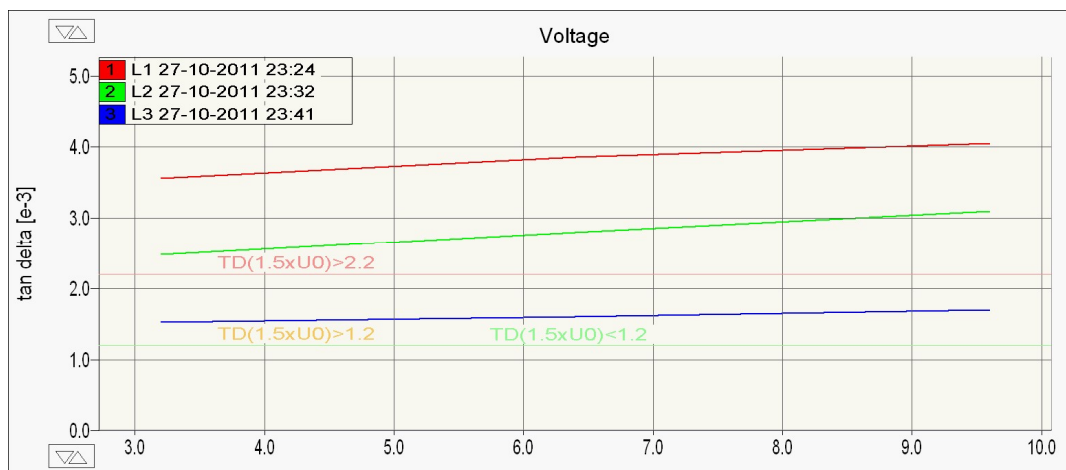
X	0	1	2	3	4	5	6	7	8							
R-	48	-	70	-	58	-	37	[1-3]	4	[3-2]	80	[3-]	3	[1-3]	67	[3-
Y-								[2-1]		[1-1]				[2-2]		[2-
B-	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	[3-2]	300 SQMM CX	[2-3]	300 SQMM AX	[2-]	300 SQMM CX	[3-1]	300 SQMM CXS	[1-
	JUN-1995		OCT-1993		MAR-1993		MAR-1993		01-SEP-2006		MAR-1993		03-SEP-2000		10-JUL-2003	
	BICC 0		BICC 0		BICC 0		BICC 0		PIRE2004		BICC 0		BICC2000		PIRE2003	
8		9		10		11		12		13		14		15		16
Z		Z A				Z A		Z				Z A		A A		Z
3	66	[3-2]	47	-	97	[2-1]	4	[1-2]	22	-	192	[1-1]	113	[1-2]	115	[2-
2		[2-1]				[1-3]		[3-3]				[2-2]		[2-1]		[3-
1	300 SQMM CX	[1-3]	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	[3-2]	300 SQMM CX	[2-1]	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	[3-3]	300 SQMM CX	[3-1]	300 SQMM CX	[1-
	01-AUG-2003		DEC-1994		DEC-1994		21-JUL-2005		DEC-1994		DEC-1994		16-JUN-2000		28-APR-2000	
	PIRE2003		BICC 0		BICC 0		PIRE2004		BICC 0		BICC 0		BICC1999		BICC1999	
16		17		18		Y										
A		Z A		Z Z		A										
1	35	[1-1]	39	[1-2]	86	[2-R										
2		[2-2]		[2-1]		[1-Y										
3	300 SQMM CX	[3-3]	300 SQMM CX	[3-3]	300 SQMM CX	[3-B										
	18-FEB-2003		20-DEC-2002		01-AUG-2002											
	PIRE2002		PIRE2002		TAIH2002											

Note: FW - Free Water Ingress; WT - Water Tree.
 %RPT-I-NORMAL, normal completion - end of report



Měření TD & PD dne 27. října 2011

Výsledek TD zaznamenaný dne 27. října 2011:



Analýza TD byla provedena dne 27. října 2011:

Byly získány výsledky pro L1, L2 a L3. Na základě vyhodnocení XLPE kabelu při 1.5U₀ vyplývá z výsledků, že L2 a L3 přesáhly mezní hodnotu (vysoké provozní riziko) a L1 dosáhla stavu vysokého provozního zestárnutí. Stejně charakteristiky lze pozorovat u všech kabelů. Při zvyšování napětí se zvyšují průměrné hodnoty TD. Standardní odchylky TD jsou u L1, L2 i L3 v poměrně dobrém stavu (<0.01E-3). Lehce rozkolísaný trend stability může naznačovat přítomnost malého množství vlhkosti v L1, L2 a L3 (v koncokách). Hodnoty delta TD v L1, L2 a L3 indikují dobrý stav kabelu (<0.6x E⁻³). Potenciální známky vodních stromečků (rostoucí delta TD) mohly být viditelné v důsledku délky kabelu.

Tabulka průměrných hodnot tan delta (E-3):

Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L1	3.560	3.859	4.046
L2	2.476	2.803	3.094
L3	1.526	1.605	1.700

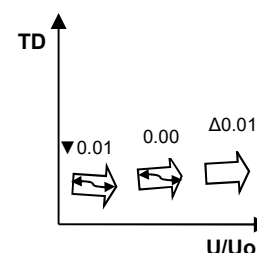
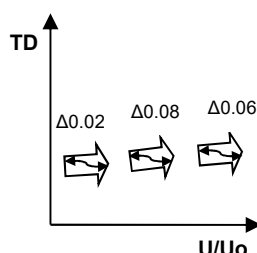
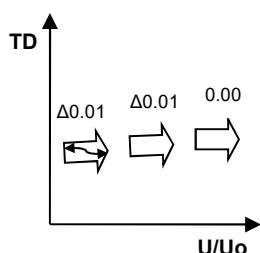
Tabulka standardních odchylek:

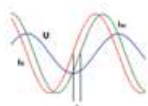
Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L1	0.005	0.004	0.006
L2	0.023	0.024	0.024
L3	0.003	0.003	0.004

Shrnutí:

Fáze	Krok	Napětí kV	Pr. hodn. tan delta	St. odch. [e-3]	Zatížení nF
L1	1	3.2	3.560	0.005	8
L1	2	6.4	3.859	0.004	8
L1	3	9.6	4.046	0.006	8
L2	1	3.2	2.476	0.023	8
L2	2	6.4	2.803	0.024	8
L2	3	9.6	3.094	0.024	8
L3	1	3.2	1.526	0.003	8
L3	2	6.4	1.605	0.003	8
L3	3	9.6	1.700	0.004	8

Trend stability TD:

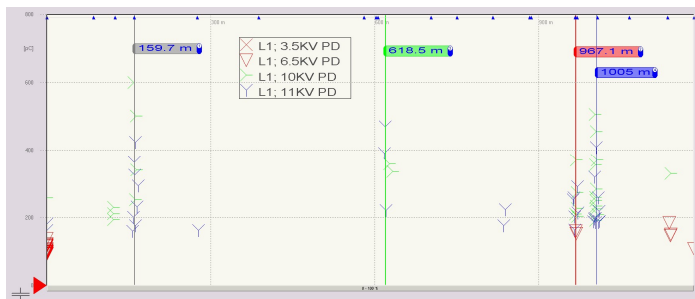




BAUR VLF Testing and Diagnosis Report
Combined TanDelta & Partial Discharge Diagnosis



Výsledek PD zaznamenaný dne 27. října 2011:

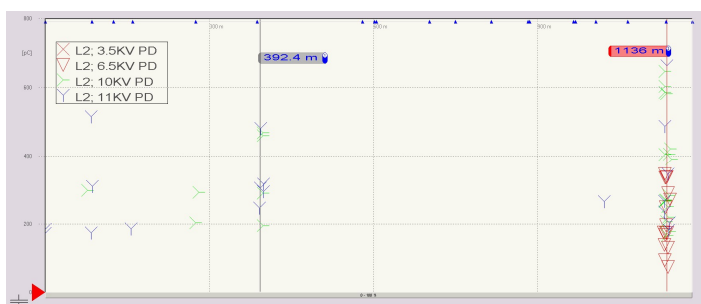


Popisy

- 1 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:14:21; 3.5KV PD
- 2 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:18:04; 6.5KV PD
- 3 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:22:15; 10KV PD
- 4 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:23:54; 11KV PD

Aktivita PD v L1:

- Koncentrované PD (do ~150pC) na bližším konci, se spuštěním PDIV při 1.0U_o.
- Koncentrované PD (do ~300pC) v místě spoje ve vzdálenosti **160 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.
- Koncentrované PD (do ~400pC) v místě spoje ve vzdálenosti **619 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.
- Koncentrované PD (do ~300pC) v místě spoje ve vzdálenosti **967 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.0U_o (uzavřené spoje).
- Koncentrované PD (do ~300pC) v místě spoje ve vzdálenosti **1005 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.

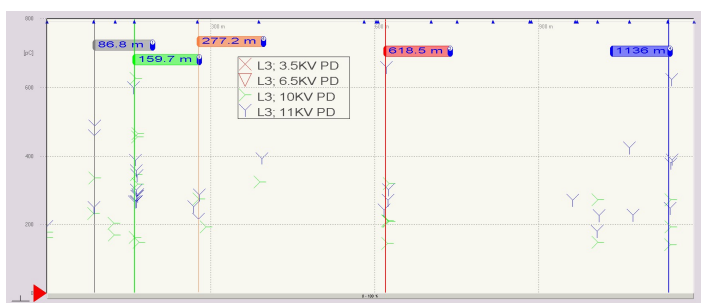


Popisy

- 1 L2; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:40:40; 3.5KV PD
- 2 L2; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:43:16; 6.5KV PD
- 3 L2; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:45:22; 10KV PD
- 4 L2; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:46:35; 11KV PD

Aktivita PD v L2:

- Koncentrované PD (do ~300pC) v místě spoje ve vzdálenosti **392 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.
- Koncentrované PD (do ~400pC) v místě spoje ve vzdálenosti **1136 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.0U_o.

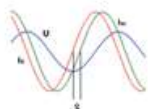


Popisy

- 1 L3; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:49:28; 3.5KV PD
- 2 L3; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:53:08; 6.5KV PD
- 3 L3; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:54:24; 10KV PD
- 4 L3; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:55:13; 11KV PD

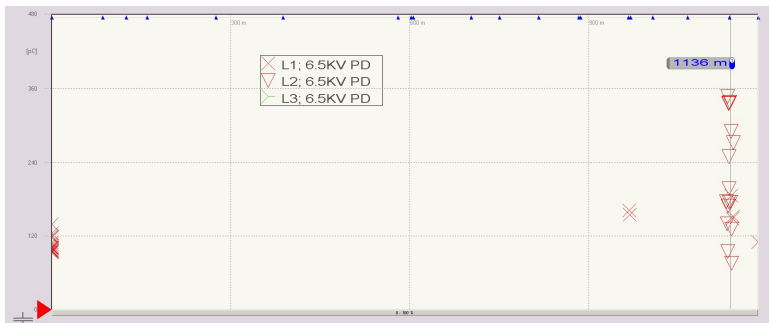
Aktivita PD v L3:

- Koncentrované PD (do ~300pC) v místě spoje ve vzdálenosti **87 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.
- Koncentrované PD (do ~400pC) v místě spoje ve vzdálenosti **160 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.
- Koncentrované PD (do ~300pC) v místě spoje ve vzdálenosti **277 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.
- Koncentrované PD (do ~300pC) v místě spoje ve vzdálenosti **619 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.
- Koncentrované PD (do ~300pC) v místě spoje ve vzdálenosti **1136 m** od bližšího konce, se spuštěním PDIV při 1.5U_o.



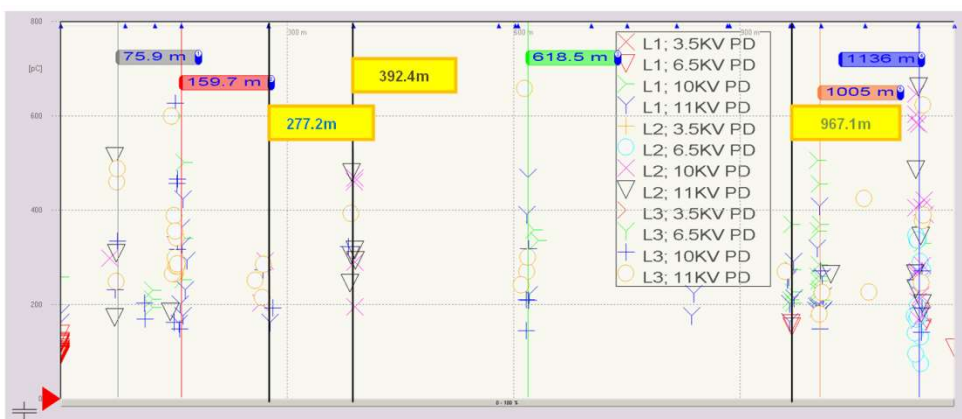
Aktivita PD za denního provozu, 1.0U_o:

- Koncentrované PD (do ~120pC) na bližším konci, Moreton Terrace Z/S, v L1.
- Koncentrované PD (do ~240pC) v místě spoje ve vzdálenosti **1136 m** od bližšího konce v L1 a L2.



Popisy

- 1 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:18:04; 6.5KV PD
- 2 L2; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:43:16; 6.5KV PD
- 3 L3; truesinus@; 0.1 Hz; 28.10.2011 00:53:08; 6.5KV PD



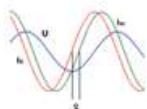
Přehled PD pro L1, L2 a L3:

Souhrnně se koncentrované PD vyskytují ve spoji ve vzdálenosti **160 m** a **1005 m** od bližšího konce, s PDIV při **1.5U_o (10kV)** přibližně do **300 pC v L1**. Koncentrované PD se dále vyskytují ve spoji vzdáleném **619 m** od bližšího konce, s PDIV při **1.5U_o (10kV)** přibližně do **400 pC v L1**. Koncentrované PD se dále vyskytují ve spoji vzdáleném **967 m** (uzavřené spoje) od bližšího konce, s PDIV při **1.0U_o (6.5kV)** přibližně do **300 pC v L1**.

Koncentrované PD se vyskytují v místě spoje ve vzdálenosti **392 m** od bližšího konce, s PDIV při **1.5U_o (10kV)** přibližně do **300 pC v L2**. Koncentrované PD se dále vyskytují ve spoji vzdáleném **1136 m** od bližšího konce, s PDIV při **1.0U_o (6.5kV)** přibližně do **400 pC v L2**.

Koncentrované PD se vyskytují v místě spoje ve vzdálenosti **87 m, 277 m, 619 m a 1136 m** od bližšího konce, s PDIV při **1.5U_o (10kV)** přibližně do **300 pC v L3**. Koncentrované PD se dále vyskytují ve spoji vzdáleném **160 m** od bližšího konce, s PDIV při **1.5U_o (10kV)** přibližně do **400 pC v L3**.

Koncentrované PD (do ~150pC) na bližším konci jsou rovněž patrné při záznamu **L1 s PDIV** při **1.0U_o**.



Požadovaný zásah a závěr

Vyhodnocení PD:

Závěrem lze říci, že úroveň PD $\sim 120\text{pC}@1.0U_0$ na bližším konci v L1 nemá za normálního provozu na kabel XLPE žádný vliv. Ani běžný spoj s úrovní PD $\sim 240\text{pC}@1.0U_0$ ve vzdálenosti 1136 m od bližšího konce v L1 a L2 nemá za normálního provozu žádný vliv. Aktivity PD obecně neovlivňují výsledné TD.

Vyhodnocení TD:

Z výsledků TD vyplývá, že podle vyhodnocení kabelu XLPE při $1,5U_0$ existuje v L2 a L3 vysoké provozní riziko, zatímco stav L1 je vysoce zestárlý v provozu. Standardní odchylky TD jsou u L1, L2 a L3 v poměrně dobrém stavu. Lehce kolísavý trend stability může být známkou přítomnosti malého množství vlhkosti v L1, L2 a L3 (koncovky).

Z důvodu všeobecného vysokého stárnutí je doporučeno všechny tři fáze po několika měsících znovu odzkoušet nebo provést VLF zkoušku s cílem rozpoznání konkrétních míst vysokého stárnutí.

13. 1. 2012
TN/GIC

11 Nejnovější projekty diagnostických služeb BAUR

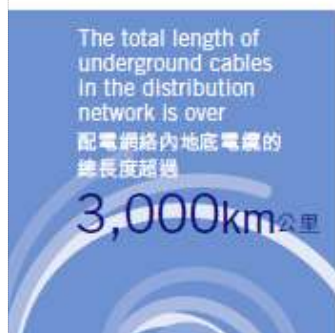
11.1 Hong Kong Electric

Společnost Hong Kong Electric začala realizovat myšlenku Modern Asset Management v roce 2008. Základní motivace HK Electric je výsledkem běžného dilematu, jak zajistit spolehlivou dodávku energie ve městě Hong Kong, která zahrnuje několik tisíc podzemních kabelů 11 kV. Kabelová síť je tvořena starými kabely PILC instalovanými od roku 1950, první generací XLPE kabelů náchylných k tvorbě vodních stromečků i kabely XLPE odolnými tvorbě vodních stromečků, instalovanými od roku 1986.

22kV / 11kV Distribution Network

HK Electric's 22kV / 11kV network comprises cables buried directly underground. The total length of cables is over 3,000km. The Company has adopted the use of XLPE insulation for all its cables since 1980. As a standard, all cables use 300mm² copper conductor with corrugated aluminium metal sheath/steel wire armour and PVC/MDPE outer-jacket.

Electricity supply network at 22kV / 11kV level is in the form of a close or an open ring. Any 22kV / 11kV substation is normally fed from one source zone substation. Alternative route is always available from another source substation in case of fault or cable taken out of service.



Obr. 105: Profil společnosti HK Electric k 10/2010 [26]

Shromažďování praktických diagnostických zkušeností započalo v Hongkongu v roce 2010. Rozhodujícím krokem bylo rozhodnutí Electric Asset Management provést údržbu středněnapěťových kabelových sítí s cílem zvýšit spolehlivost dodávky energie ve městě Hongkong, které je finančním centrem Asie.

Díky zavedení nové technologie k diagnostice podzemních kabelových sítí bylo možné vypracovat strategii a koncepci preventivní údržby středněnapěťových sítí. Obtíže vyvstaly v souvislosti s interpretací výsledků diagnostiky, které se staly klíčovou otázkou provádění údržby na základě daného stavu.

Společnost HK Electric zakoupila řadu přenosných zkušebních přístrojů i přístrojů do zkušebních vozidel, určených k měření VLF TD /PD. Na základě školení obsluhy byl zřízen diagnostický tým. Technici prováděli diagnostiku kabelů v rámci posouzení stavu při velmi vysokých frekvencích. Od roku 2010 byla provedena diagnostika více než 1500 kabelů.

Klíčovou výzvou byla pro tým řízení aktiv situace, kdy bylo třeba provést analýzu výsledků diagnostiky a stanovit opatření. Tým společnosti BAUR poskytl týmu řízení aktiv podporu formou četných školicích setkání a průzkumů v terénu. V řadě případů byly vypracovány akční plány a provedeny zásahy. Míru úspěšnosti správně identifikovaných slabých kabelových úseků a spojů XLPE i PILC komponent výrazně podpořily rozborů i vizuální kontroly vyměněných komponent.

Výsledkem intenzivní spolupráce je podpora, kterou společnost BAUR poskytla společnosti HK Electric při zavedení koncepce zkoušení kabelů, která stanoví požadovaný akční plán údržbářských prací s ohledem na stav jednotlivých kabelů.

THE HONGKONG ELECTRIC CO.,LTD. 香港電燈有限公司 T&D DIVISION	Effective Date: 14 April 2012
Departmental Technical Manual	11kV & 22kV Distribution Plant
Part 0	Work Instruction
T&D/WI/HV/52	HIGH VOLTAGE TESTING FOR 11KV AND 22KV CABLE
Note: Major parts of this instruction is revised based on the experience gained on VLF diagnostic testing of 11kV cables since its introduction in early 2010.	
	Action
1. <u>TESTING PHILOSOPHY</u>	
11kV cable system comprises of PILC cables (as early as 1950's), XLPE cables with water tree prone cable sections (WTPCS) and water tree retardant XLPE cables introduced since 1986.	

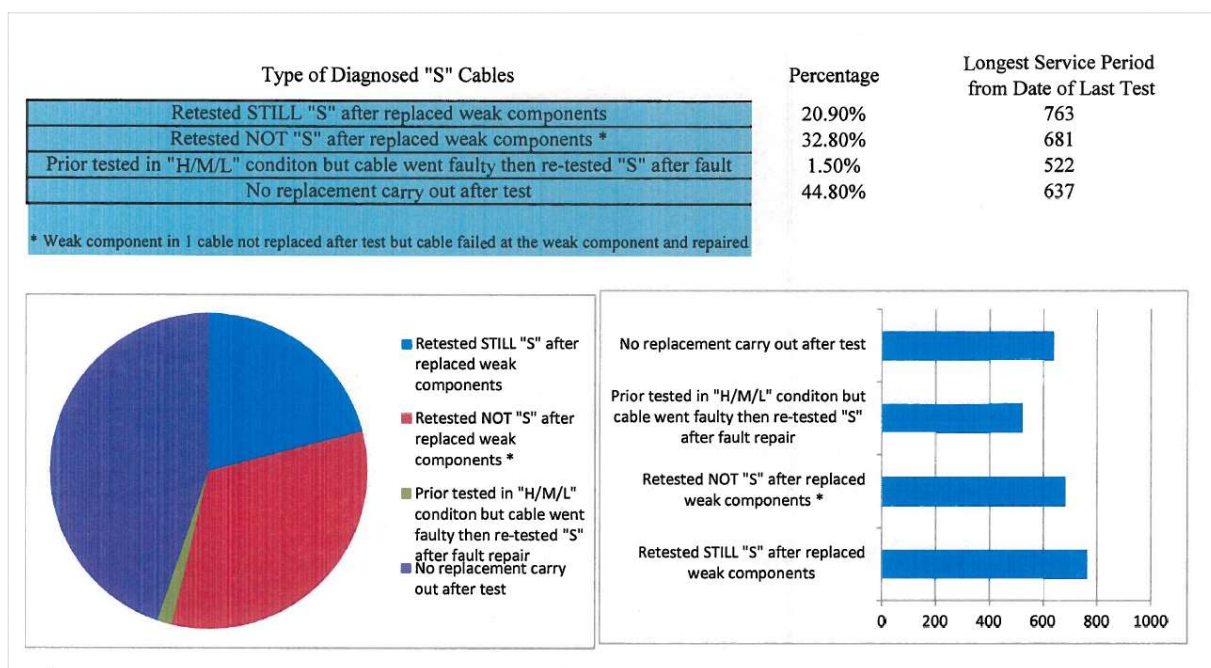
Obr. 106: Koncepce zkoušení ve společnosti HK Electric z roku 2012

Důvěra v profesionální podporu společnosti BAUR se rozvíjela a vedla k uzavření poradenských servisních smluv.

Smlouva 1:	2010	50	kabelů
Smlouva 2:	2011	100	kabelů
Smlouva 3:	2012	250	kabelů
Smlouva 4:	2013	350	kabelů
Smlouva 5:	2014-2015	350	kabelů / rok

Kromě diagnostických služeb společnosti BAUR provedli diagnostiku více než 1000 kabelů pracovníci HK Electric.

Ze statistického vyhodnocení roztríděných údajů vyplývá, že bylo pouze 1,5 % diagnostikovaných kabelů posouzeno chybně nebo u nich došlo k poruchám v důsledku neočekávaných / neidentifikovaných vad. Rozvinutá koncepce údržby kabelů tak byla potvrzena úrovní spolehlivosti 98,5 %.



Obr. 107: Statistický přehled kategorií kabelů HKE



Obr. 108: Používané systémy BAUR VLF TD / PD

11.2 KEPCO Korea

Společnost Korean Electric Power Company (KEPCO) se zabývá výrobou elektrické energie, jejím přenosem i distribucí v Jižní Korejské republice. Spolupráce mezi společnostmi BAUR a KEPCO začala v roce 2005, kdy výzkumný ústav KEPCO, nazvaný KEPRI, zahájil vyhodnocování správného nástroje k měření dielektrických ztrát a k detekci vodních stromečků. KEPRI je velmi známý výzkumný ústav. Prostřednictvím úzké spolupráce a podpory se mohl KEPRI spojit s výzkumnými ústavem po celém světě. Díky trvalé podpoře a zkušenostem společnosti BAUR vzrůstala důvěra k diagnostické VLF technologii, kterou BAUR vyvinul. V roce 2010 objednalo KEPCO 10 měřících kabelových vozů k VLF zkouškám a diagnostice. V roce 2012 bylo dodáno dalších 5 zkušebních vozů. Při nákupu první sady diagnostického příslušenství byl v každém operačním kraji ustaven diagnostický tým KEPCO. V ústřední společnosti KEPCO pak byl vytvořen tým diagnostických expertů. Všechny kraje podávaly zprávy o výsledcích diagnostiky expertům v ústředí. Společnost BAUR podporovala diagnostický tým řadou návštěv a uživatelských seminářů. Na mezinárodních konferencích byly doposud publikovány tři odborné práce společnosti KEPCO, které dokládají zkušenosti a profesionální hodnocení stavu kabelů v celé Jižní Koreji. Podle poslední studie bylo diagnostikováno a uloženo v databázi 14000 kabelů.

Na základě tohoto obrovského objemu diagnostických výsledků pokračují další studia vývoje diagnostických kritérií. Spolupráce se společností BAUR by měla přinést další poznatky o užitečných nástrojích k údržbě kabelů na základě jejich stavu.



Obr. 109: Zkušenosti s diagnostikou v KEPCO

ABSTRACT

Recently, diagnostic on Medium Voltage Cables using $\tan \delta$ measurement that measures dissipation factor with 0.1Hz VLF (Very Low Frequency) high voltage source has emerged as an efficient way to assess water tree aging of MV (Medium Voltage) cables. This study verified the validity diagnostic evaluation criteria defined by IEEE400.2-2013 and it's pervious drafts of DTD (Delta $\tan \delta$) and STDEV (Standard Deviation) - indicating voltage-stability and time-stability of $\tan \delta$ respectively - by applying $\tan \delta$ measurement to KEPCO (Korea Electric Power Corporation)'s power distribution system and suggested a new assessment factor being defined as Skirt, and its new formula in order to identify the precursor of insulation breakdown with patterns of $\tan \delta$. By visualizing complex correlations between various assessment factors and proposing a 3-dimensional assessment standard that can normalize the deterioration condition of a cable into a uniform value, this study has established a foundation to calculate the remaining life time of a cable through VLF $\tan \delta$ diagnostic.

Index Terms — VLF, $\tan \delta$, TD, DTD, STDEV, Skirt, 3-dimensional matrix

Obr. 110: Výňatek z nedávné zprávy KEPCO 2013 [27] [28]

11.3 Western Power / Austrálie

Spolupráce společností BAUR a Western Power začala v roce 2007 dodávkou prvního zařízení k diagnostice kabelů v Austrálii. V té době nebyly k dispozici zkušenosti s diagnostikou a byla potřebná podpora. Díky četným návštěvám a průzkumům v rámci případových studií bylo možné zkombinovat zkušenosti z evropských energetických zařízení s místními podmínkami v Austrálii. Společnost Western Power velmi brzy získala sebedůvěru díky porozumění úspěšnému hodnocení stavu kabelů a začala budovat novou divizi, která nyní nabízí služby při diagnostice kabelů jiným organizacím a podnikům v Austrálii. Baur podporoval Western Power v pokračujícím sdílení zkušeností na manažerské bázi a zahájil spolupráci s německým energetickým podnikem a publikoval společnou odbornou práci na mezinárodní konferenci IEEE 2010 o sledování stavu a diagnostice na Tchaj-wanu.

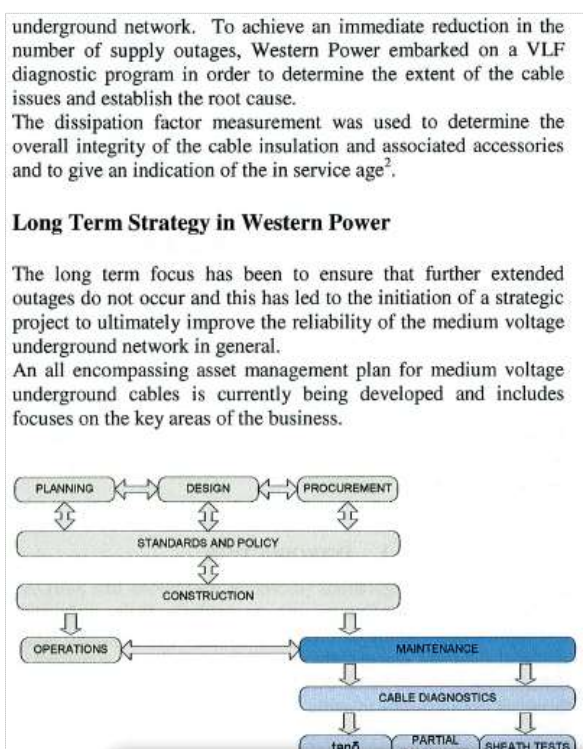
III. CASE STUDY IN WESTERN POWER PERTH AUSTRALIA

A. Strategic Plan

Background
Western Power operates its distribution network in an open ring configuration and the normal arrangement is achieved predominantly by the use of underground 22kV distribution feeder circuits. The circuits inter-connect either with panels in other zone substations or to panels in the same zone substation with a normally open point present.
Two main types of medium voltage underground cables are utilized to achieve this inter-connection:

- PILC- normally steel wire armored multi-core (in service for more than 50 years with a high level of reliability)
- XLPE- single core cross linked polyethylene¹ cables installed in trefoil configuration (in service for less than 15 years with questionable reliability in some geographic areas)

Short Term Strategic Plan
Objectives were resolved into short term and long term goals and the initial focus was to urgently improve the reliability of the



Obr. 111: Výhody kombinované diagnostické metody CMD 2010 [29]

11.4 Další spolupráce

- BAUR Německo
 - Dceřiná společnost BAUR Austria, fungující jako poskytovatel služeb v oblasti posouzení stavu kabelů a poradenství pro energetické podniky i soukromé organizace v Německu od roku 2005. Zkušenost s diagnostikou přibližně 100 kabelů za rok.

- Gasenzer AG Švýcarsko
 - Gasenzer AG funguje od roku 2004 jako poskytovatel diagnostických služeb pro energetické podniky, všechny jaderné elektrárny, letiště a jiné soukromé zákazníky po celém Švýcarsku. Až do dnešního dne je Gasenzer AG jediným důvěryhodným partnerem a poskytovatelem služeb v rámci posouzení stavu podzemních kabelů ve Švýcarsku.

11.5 Diagnostická platforma BAUR

Během posledních let byly nashromážděny zkušenosti s diagnostikou z celého světa. Diagnostická platforma BAUR je fórum, na němž experti z celého světa sdílejí své zkušenosti, díky čemuž je možné sdílet nové poznatky a zjištěn, a tak těžit ze zkušeností získaných ze všech možných praktických podmínek. Experti společnosti BAUR jsou považováni za nejzkušenější s ohledem na způsobilost a flexibilitu při analýze podzemních kabelových sítí.

12 Příloha – Případové studie kombinované diagnostiky

12.1 Případová studie A 1 - 11153

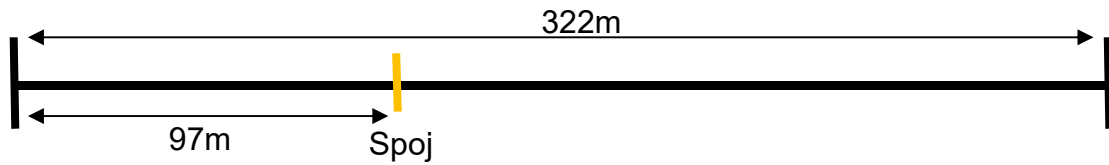
Klíčové body:

- 322 m, 22 kV, XLPE kabel, 1 spoj
- Aktivity PD ve spoji
- Vniknutí vody do spoje
- Zjištěné poškození v blízkosti spoje
- Po výměně spoje patrné zlepšení hodnoty TD

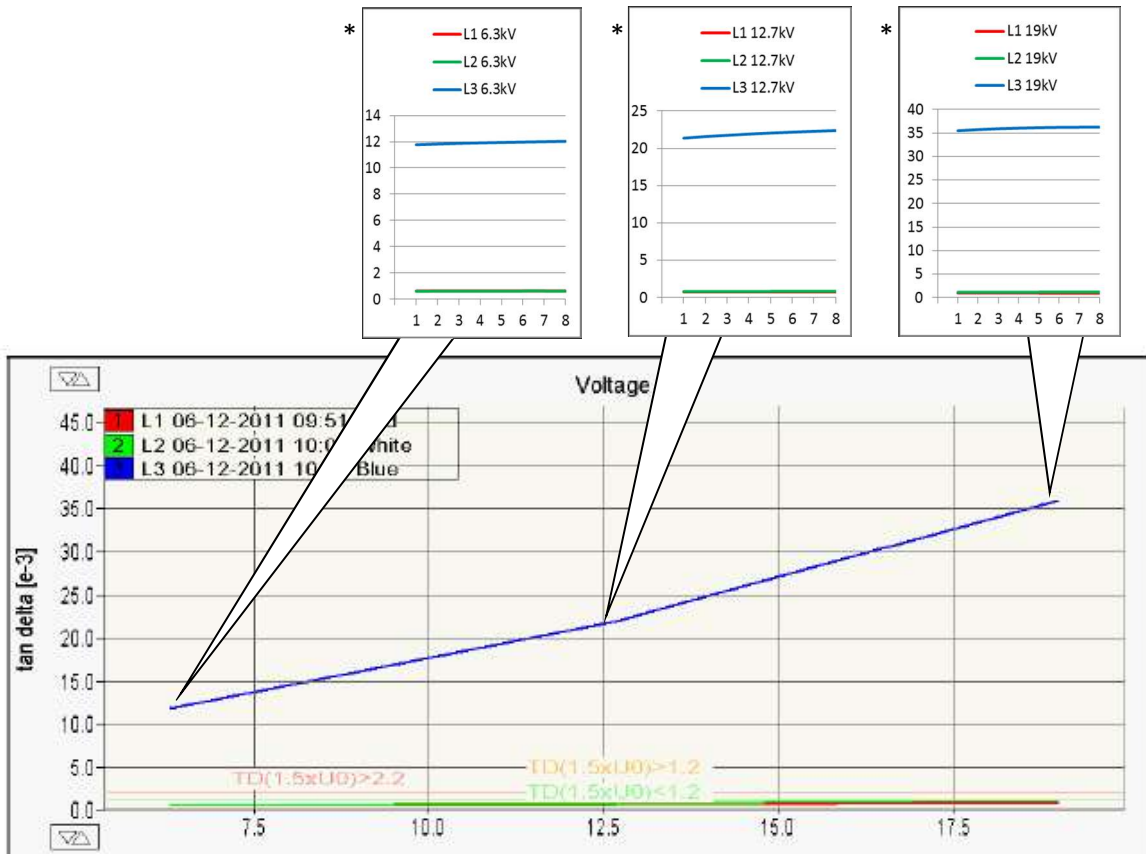
Naše zn.:	A1 - 11153
Datum zkoušky:	6. 12. 2011 / 31. 1. 2012
Počasí:	Slunečné
Vlhkost:	60 %
Žadatel:	Electricity Company Austrálie
Umístění kabelu:	VIC, Lakeside
Typ kabelu:	XLPE 22 kV
ID měření	Č. 11153
Bližší konec (od):	Lakeside 12
Vzdálený konec (k):	Queens Road 3
Rychlost impulsu (m/μs)	81.8
Délka kabelu:	322m
Jmenovité napětí:	22 kV
Rok výroby:	2002 (rok instalace)
Počet fází:	3
Stav půdy	Vlhká
Poloha spoje	97 m
Místo zkoušky:	Lakeside 12
Použité zkušební zařízení	BAUR Frida TD (k měření TD) Přenosný BAUR PD (k měření PD)



12.1.1 Uspořádání kabelu



12.1.2 Výsledné TD ze dne 6. 12. 2011



Cable with high operating risk

Evaluation

Name of Evaluation	XLPE 1,5U ₀
Criterion	Comment
TD(1.5xU ₀)>2.2	Cable with high operating risk
TD(1,5xU ₀)-(0.5U ₀)>1.0	Cable with high operating risk
TD(1.5xU ₀)>1.2	Highly service aged cable
TD(1.5xU ₀)<1.2	Cable can be returned to service
TD(1.5xU ₀)-(0.5U ₀)<0.6	Cable can be returned to service

Tabulka průměrných hodnot tan delta:

Napětí:	6.3kV	12.7kV	19kV
L1	0.632	0.772	0.979
L2	0.621	0.837	1.177
L3	11.914	21.929	35.980

Tabulka standardních odchylek:

Napětí:	6.3kV	12.7kV	19kV
L1	0.002	0.002	0.006
L2	0.005	0.006	0.010
L3	0.085	0.328	0.251

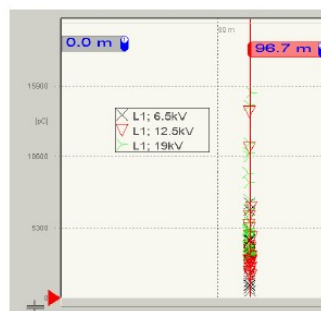
Summary:

Phase	Step	Voltage kV	Avg. value tan delta	Std. Dev. [e-3]	Amount	Load nF
L1	1	6.3	0.632	0.002	8	80.6
L1	2	12.7	0.772	0.002	8	80.4
L1	3	19.0	0.979	0.006	8	80.8
L2	1	6.3	0.621	0.005	8	81.1
L2	2	12.7	0.837	0.006	8	80.8
L2	3	19.0	1.177	0.010	8	81.3
L3	1	6.3	11.914	0.085	8	80.4
L3	2	12.7	21.929	0.328	8	80.1
L3	3	19.0	35.980	0.251	8	80.6

Interpretace výsledků TD:

- Celkový stav kabelu... vysoké provozní riziko
- Absolutní hodnoty TD
TD u L1, L2 velmi nízké ... dobrý stav
TD u L3 velmi vysoké ... vysoké provozní riziko
- Standardní odchylka TD
STD L1, L2 velmi nízká, stabilní stav ... suchý stav
STD L3 velmi vysoká, nestabilní stav ... známka vniknutí vody do jednoho ze spojů
- DTD (Delta TD)
DTD u L1, L2 bez nárůstu TD v rozsahu napětí
DTD u L3 vysoká hodnota, vysoký nárůst hodnoty TD při vyšším napětí, známka svodového stavu souvisejícího s napětím, přibližně 24.0×10^{-3}
- Analýza trendu TD*
L1 a L2 Velmi stabilní stav trendu
L3 Vzrůstající vývoj trendu (viz grafy trendu *TD)
- Je potřebné zkoumání L3

12.1.3 Výsledné PD zaznamenané dne 6. 12. 2011

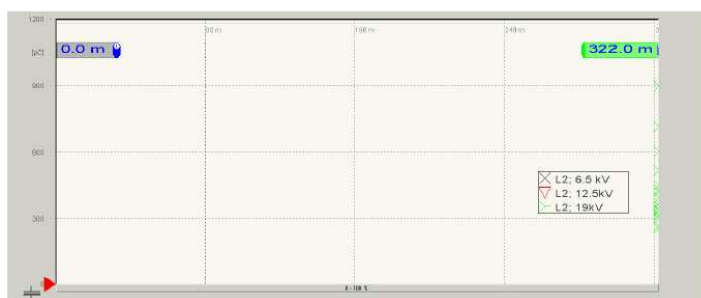


Aktivita PD v L1:

- Velmi vysoká aktivita PD v L1 na 97m.
- Spouštěcí napětí PD při $0.5U_0$
- PD do 15.000 pC při $1.5U_0$
- Aktivita PD nemá vliv na výsledné TD
- Je potřebné zkoumání.

Snapshot details

- 1 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 10:59:54; 6.5kV
- 2 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:01:33; 12.5kV
- 3 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:04:05; 19kV

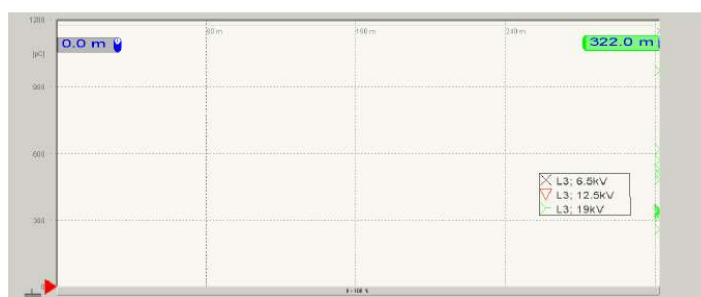


Snapshot details

- 1 L2; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:10:42; 6.5 kV
- 2 L2; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:17:06; 12.5kV
- 3 L2; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:18:20; 19kV

Aktivita PD v L2:

- Žádné zjevné PD při 0.5U_o.
- Žádné zjevné PD při 1.0U_o.
- Koncentrované PD (do ~900pC) u vzdálené koncovky na 322 m při 1.5U_o.



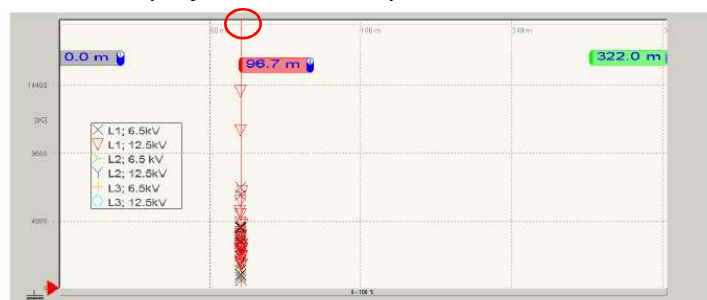
Snapshot details

- 1 L3; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:23:20; 6.5kV
- 2 L3; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:24:53; 12.5kV
- 3 L3; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:26:01; 19kV

Aktivita PD v L3:

- Žádné zjevné PD při 0.5U_o.
- Žádné zjevné PD při 1.0U_o.
- Koncentrované PD (do ~900pC) u vzdálené koncovky na 322 m při 1.5U_o.

Aktivita PD při jmenovitém napětí 1.0 U_o a nižším

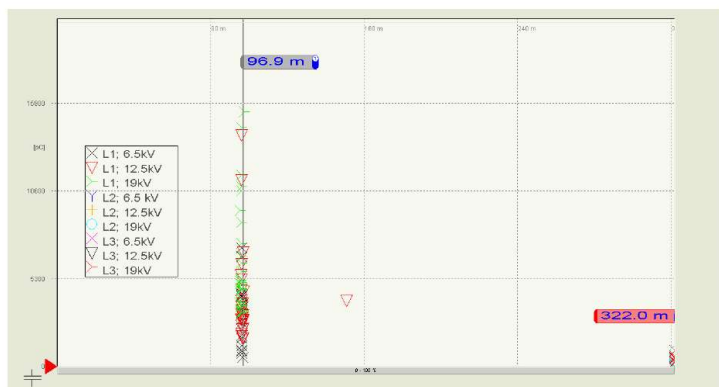


Snapshot details

- 1 L1; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 10:59:54; 6.5kV
- 2 L1; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:01:33; 12.5kV
- 3 L2; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:10:42; 6.5 kV
- 4 L2; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:17:06; 12.5kV
- 5 L3; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:23:20; 6.5kV
- 6 L3; truesinus®; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:24:53; 12.5kV

Aktivita PD při jmenovitém napětí 1.0 U_o a nižším

- Koncentrované PD (do 6.000pC) ve spoji na 97 m v L1



Celková aktivita PD

- Koncentrované PD (do 6.000pC) ve spoji na 97 m v L1
- Aktivity PD v L2 a L3 u vzdálené koncovky

Snapshot details

- 1 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 10:59:54; 6.5kV
- 2 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:01:33; 12.5kV
- 3 L1; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:04:05; 19kV
- 4 L2; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:10:42; 6.5 kV
- 5 L2; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:17:06; 12.5kV
- 6 L2; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:18:20; 19kV
- 7 L3; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:23:20; 6.5kV
- 8 L3; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:24:53; 12.5kV
- 9 L3; truesinus@; 0.1 Hz; 06.12.2011 11:26:01; 19kV

Interpretace PD

- L1: Aktivita PD na 97 m u PDIV při 0.5xU₀, do 7.000 pC při 0.5xU₀ a do 15.000 pC při 1.5xU₀
- L2 a L3: Aktivita PD u vzdálené koncovky u PDIV při 1.5xU₀, do 1.000pC.

Jelikož aktivita PD v L1 neodpovídá výsledku TD, dají se očekávat **povrchové výboje** ve spoji. Je třeba zkontrolovat obloukovou koncovku na vzdáleném konci. Tyto aktivity PD se rovněž projevují u STD na úrovni napětí 1.5xU₀ ve všech fázích.

PD u spoje v L1 je nohem vyšší než PD u koncovky. Po výměně spoje se předpokládá zřetelné PD u koncovky v L1.

Vysoká hodnota TD u L3 nesouvisí s aktivitou PD.

12.1.4 Požadovaný zásah a závěr – krok 1

Spoj u L1 je nutno neprodleně vyměnit.

Zkoumání a rozbor spoje pomohou najít zdroj takto vysoké aktivity PD.

Hodnoty TD, DTD i STD jsou známkou dobrého stavu kabelu kromě uvedeného spoje v L1.

U L2 a L3 se doporučuje provést kontrolu vzdálených koncovek.

L3 vykazuje velmi vysokou hodnotu TD. Podrobnosti STD i rostoucí trend TD během každého napěťového skoku jsou známkou **vodivých cest, které nejpravděpodobněji souvisejí se spojem nebo koncovkou**.

Doporučený přístup:

Doporučeným způsobem zkoumání je v tomto případě výměna spoje v L1 ve vzdálenosti 97 m. Z důvodu vyhledání zdroje degradace v L3 je třeba vyříznout stejný spoj ve vzdálenosti 97 m. Je-li chování TD určeno spojem, musí mít obě části kabelu podobnou hodnotu TD.

Část 1: bod vyříznutí ve vzdálenosti 97 m od bližšího konce;

Část 2: bod vyříznutí ve vzdálenosti 97 m od vzdáleného konce

Analýzu obou kabelových úseků je třeba provést měřením TD. Pokud svodový proud nesouvisí se spojem, mělo by být v jednom z úseků stejně vysoké výsledné TD, jaké bylo patrné u celkového výsledku kabelu pro L3.

Vyskytne-li se tato charakteristika, je třeba zaměřit další zkoumání na příslušnou koncovku kabelu.

Po dokončení výměny je třeba před opětovným uvedením kabelu do provozu provést opakovanou diagnostiku TD a PD.

12.1.5 Rozbor kabelu

Výkopy ve vzdálenosti 97 m byly provedeny následující týden.



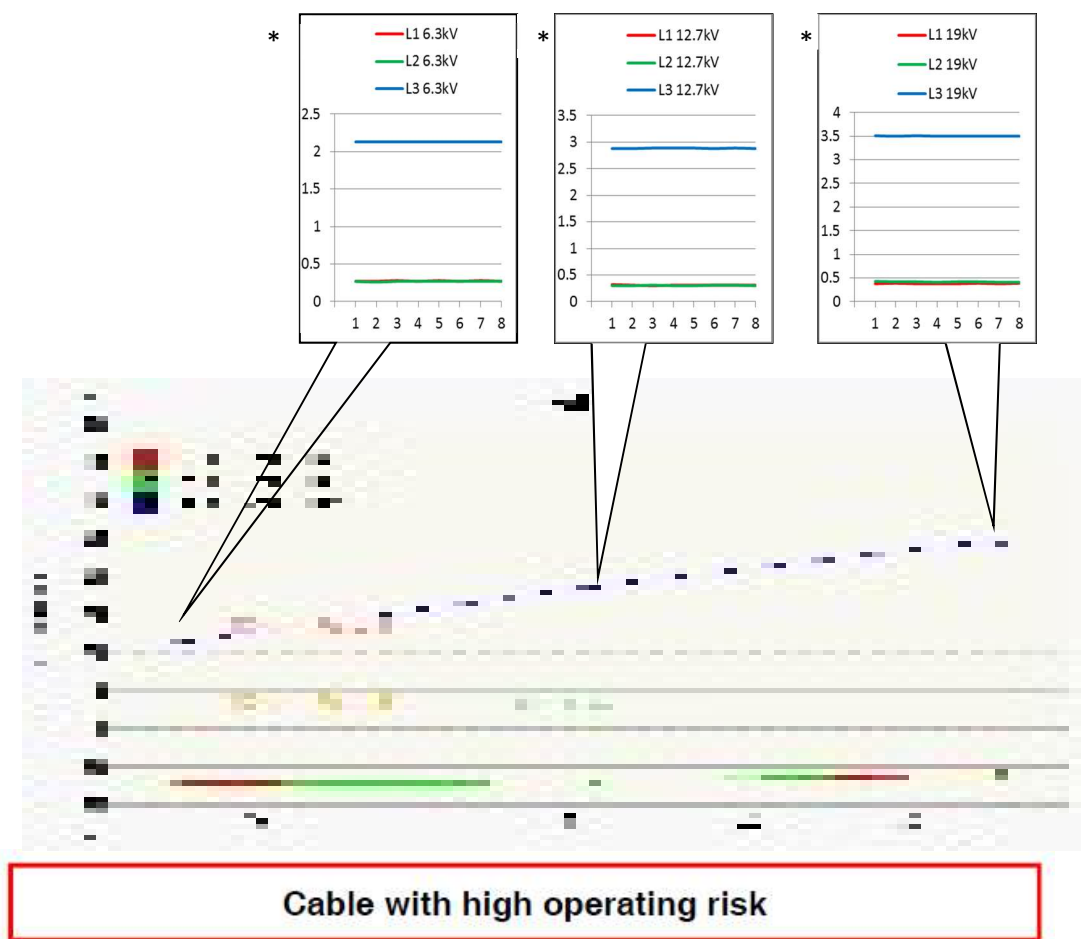
Bylo zjištěno poškození ve spoji; tepelně smrštelná trubička; voda pod vnější ochrannou tepelně smrštelnou vrstvou; silná koroze kabelového pláště.

Po odstranění **poškozených spojů** byly nainstalovány spoje nové.

Opakovaná zkouška dne 31. 1. 2012



12.1.6 Výsledné TD dne 31. 1. 2012



Evaluation

Name of Evaluation	XLPE 1,5U ₀
<i>Criterion</i>	<i>Comment</i>
TD(1.5xU ₀)>2.2	Cable with high operating risk
TD(1,5xU ₀)-(0.5U ₀)>1.0	Cable with high operating risk
TD(1.5xU ₀)>1.2	Highly service aged cable
TD(1.5xU ₀)<1.2	Cable can be returned to service
TD(1.5xU ₀)-(0.5U ₀)<0.6	Cable can be returned to service

- Celkový stav kabelu... vysoké provozní riziko
- Absolutní hodnoty TD
TD u L1, L2 velmi nízké ... dobrý stav
TD u L3 velmi vysoké ... vysoké provozní riziko
(pokles z 21.929 na 2.886 @1.0Uo(12.7kV))
- Standardní odchylka TD
STD L1, L2 velmi nízká, stabilní stav ... suchý stav
STD L3 velmi nízká (pokles z 0.328 na 0.003)
- DTD (Delta TD)
DTD u L1, L2 bez nárůstu TD v rozsahu napětí
DTD u L3 vysoká hodnota, rostoucí hodnota TD při vyšším napětí
- Analýza trendu TD*
L1, L2, L3 velmi stabilní stav trendu
stabilní vývoj trendu
(viz grafy trendů *TD)

12.1.7 Porovnání výsledků, před výměnou spoje a po ní

(Před) Tabulka průměrných hodnot tan delta

Napětí:	6.3kV	12.7kV	19kV
L1	0.632	0.772	0.979
L2	0.621	0.837	1.177
L3	11.914	21.929	35.980

(Po) Tabulka průměrných hodnot tan delta:

Napětí:	6.3kV	12.7kV	19kV
L1	0.273	0.309	0.384
L2	0.268	0.302	0.417
L3	2.131	2.886	3.503

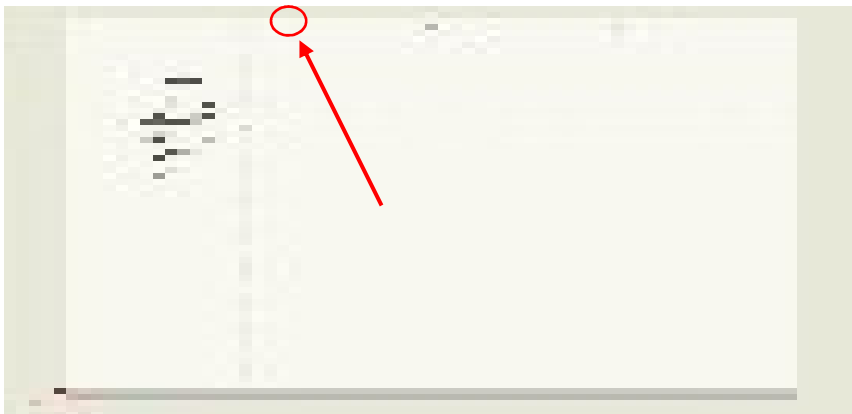
(Před) Tabulka standardních odchylek:

Napětí:	6.3kV	12.7kV	19kV
L1	0.002	0.002	0.006
L2	0.005	0.006	0.010
L3	0.085	0.328	0.251

(Po) Tabulka standardních odchylek:

Napětí:	6.3kV	12.7kV	19kV
L1	0.003	0.004	0.002
L2	0.002	0.006	0.005
L3	0.002	0.003	0.003

12.1.8 Výsledné PD ze dne 31. 1. 2012



Celková aktivita PD

- žádná další aktivita PD na 97 m

Přehled PD u L1, L2 a L3:

U spoje ve vzdálenosti 97 m nebyly v L1, L2 a L3 zjištěny žádné další aktivity PD.

12.1.9 Požadovaný zásah a závěr – krok 2

L1 a L2 vykazují velmi nízké hodnoty TD, Delta TD i standardní odchylky. ve spojích a koncovkách se nevyskytují žádné další aktivity PD.

Hodnota TD a Delta TD je u L3 stále velmi vysoká (avšak s velmi výrazným zlepšením). Standardní odchylka se zlepšila a je vysoce stabilní.

V budoucnosti je třeba věnovat pozornost L3, jelikož hodnota TD představuje nadále vysoké provozní riziko. Diagnostické zkoušky (měření TD a PD), zejména u L3, je doporučeno pravidelně opakovat a kontrolovat změnu TD a PD v průběhu času.

12.2 Případová studie H 2 - 5532

Klíčové body:

- 2675 m, 11 kV, XLPE kabel smíšený s PILC.
- Hodnoty TD zřetelně indikují vniknutí vody do spoje u L2.
- Standardní odchylka a analýza trendu TD indikují vniknutí vody do spoje.
- Z výsledků PD lze identifikovat dva spoje s aktivitou PD.
- Vniknutí vody eliminuje PD ve vadném spoji.
- Monitorovaná zkouška odolnosti s cílem potvrdit přítomnost vody ve spoji

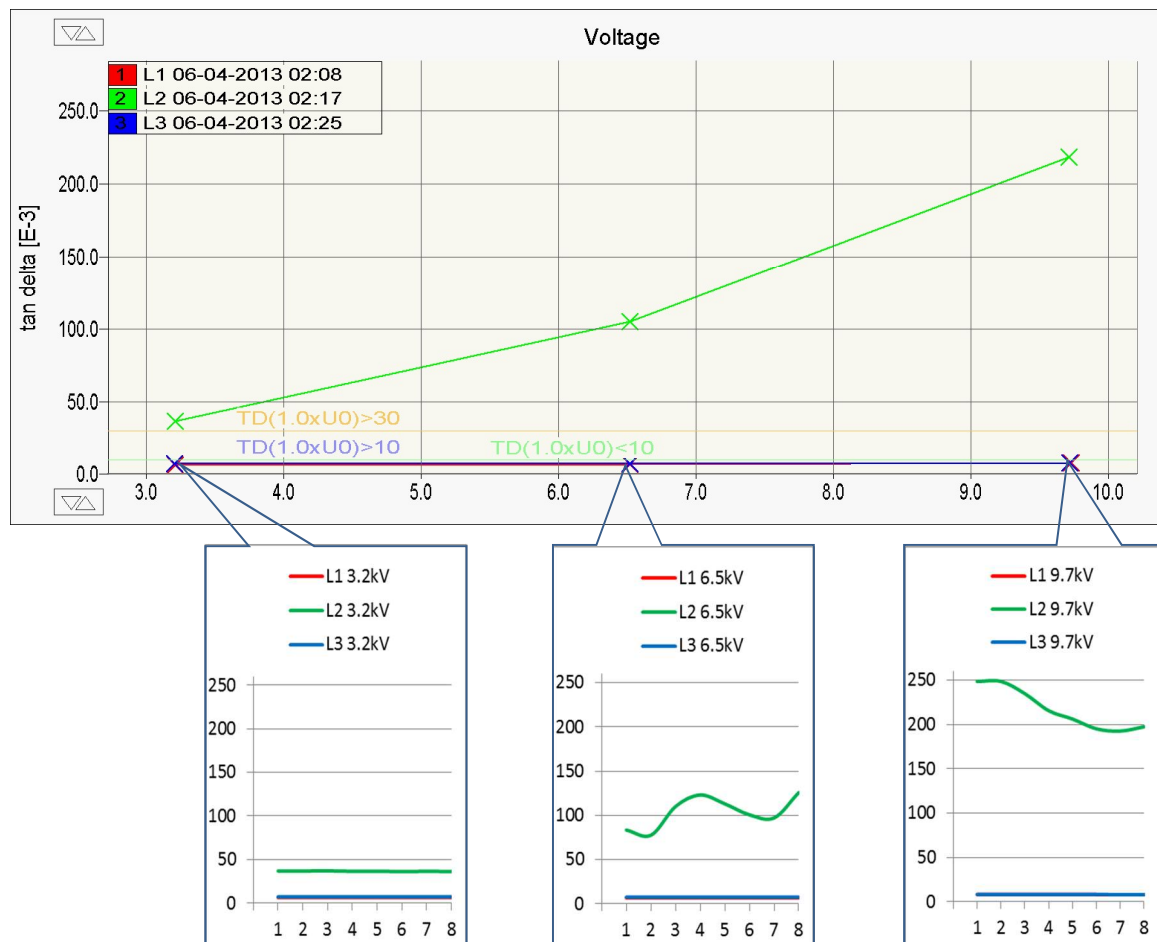
Naše zn.:	H2 - 5532
Datum zkoušky:	29. 11. 2013
Počasí:	Slunečné
Vlhkost:	60 %
Žadatel:	Electricity Company Hongkong
Umístění kabelu:	Ostrov Hongkong
Typ kabelu:	Smíšený kabel XLPE a PILC, 11 kV
Bližší konec (od):	SKW Z/S SW39
Vzdálený konec (k):	LEE CHUNG ST 36 SW5
Rychlost impulsu (m/μs)	78.3
Délka kabelu:	2675 m
Jmenovité napětí:	11 kV
Rok výroby:	N/A
Počet fází:	3
Stav půdy	Vlhká
Spoje	22
Místo zkoušky:	SKW Z/S SW39
Použité zkušební zařízení	BAUR Frida TD (k měření TD / MWT) Přenosný BAUR PD (k měření PD)

12.2.1 Uspořádání kabelu

X 0	Z 0m	1	A A 7m	2	Z Z 96m	3	114m	4	A Z 148m	5	A Z 271m	6	A A 416m	7	631m	8	876m
R-1	7	1-1	89	1-3	18	3-3	34	3-2	123	2-1	145	1-3	215	-	245	-	-
Y-2	-----	2-2	-----	2-2	-----	2-1	-----	1-1	-----	1-2	-----	2-1	-----	-	-----	-	-
B-3	300 SQMM AX	3-3	240 SQMM CX	3-1	300 SQMM AP	1-2	300 SQMM AX	2-3	300 SQMM AX	3-3	300 SQMM AP	3-2	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX
	NOV-1994		13-NOV-1998	JAN-1977		JUL-1989		JUL-1989		JUN-1972		MAR-1988		MAR-1988		MAR-1988	
	2676m	BICC 0	2668m	BICC1998	2578m	UNKN 0	2561m	UNKN 0	2527m	UNKN 0	2404m	UNKN 0	2259m	UNKN 0	2044m	UNKN 0	1799m
8		9	966m	10	988m	11	994m	12	1116m	13	A A 1358m	14	Z Z 1364m	15	1606m	16	A 1836m
	90	-	22	3-2	6	2-1	122	-	242	2-2	6	2-3	242	-	230	2-	
	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	3-1	300 SQMM AX	1-3	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	3-1	300 SQMM CX	1-1	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX
	MAY-1988		APR-1988	SEP-1993		APR-1988		APR-1988		APR-1988	16-APR-2009	MAY-1988		JUN-1988		JUN-1988	
	UNKN 0		1707m	UNKN 0	1687m	BICC1993	1681m	UNKN 0	1557m	BICC1987	1317m	1311m	1311m	1069m	BICC1987	839m	839m
16		17	1841m	18	2116m	19	2122m	20	2361m	21	2415m	22	2415m	Y	2675m		
Z		A A	Z A	Z A	Z A	A A	Z A	Z A	Z A	Z A	Z Z	Z Z					
3	5	3-2	275	1-1	6	1-2	239	1-2	54	1-2	80	3-1	180	-R			
2	-----	2-1	-----	3-3	-----	3-1	-----	3-2	-----	2-3	-----	2-2	-----	-Y			
1	300 SQMM CX	1-3	300 SQMM AX	2-2	300 SQMM AX	2-3	300 SQMM AX	3-1	240 SQMM CX	3-1	240 SQMM CX	1-3	300 SQMM CX	-B			
	13-MAY-2009		JUL-1988	13-SEP-1991		MAY-1988		08-FEB-1999		08-FEB-1999		JUN-1993					
	PIRE2006		839m	SUMI1988	559m	BICC 0	553m	UNKN 0	314m	BICC1998	260m	BICC 0	180m	BICC 0	0m		

Délka kabelu: 2675 m
 Smíšený kabel: (PILC, XLPE)
 Počet spojů:: 22

12.2.2 Výsledné TD



TD (E-3)	0.5U _o (kV)	U _o (kV)	1.5U _o (kV)
	3.5	6.5	10
L1	6.596	6.848	8.123
L2	36.717	105.207	218.644
L3	7.500	7.573	8.155

STDTD	0.5U _o (kV)	U _o (kV)	1.5U _o (kV)
	3.5	6.5	10
L1	0.035	0.024	0.049
L2	0.269	16.393	22.092
L3	0.011	0.040	0.054

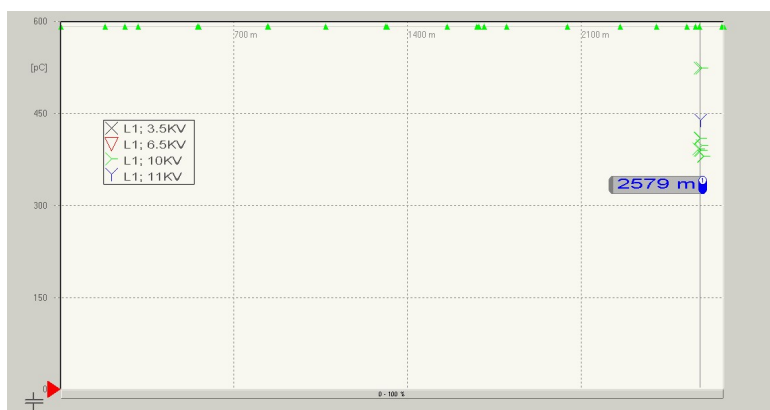
Přehled:

Fáze	Krok	Napětí kV	Průměrná hodnota tan delta	Standardní odchylka [e-3]	Počet	Zatížení nF
L1	1	3.2	6.596	0.035	8	1243
L1	2	6.5	6.848	0.024	8	1223
L1	3	9.7	8.123	0.049	8	1232
L2	1	3.2	36.717	0.269	8	1231
L2	2	6.5	105.207	16.393	8	1213
L2	3	9.7	218.644	22.092	8	1253
L3	1	3.2	7.5	0.011	8	1237
L3	2	6.5	7.573	0.04	8	1217
L3	3	9.7	8.155	0.054	8	1226

12.2.3 Interpretace výsledků TD

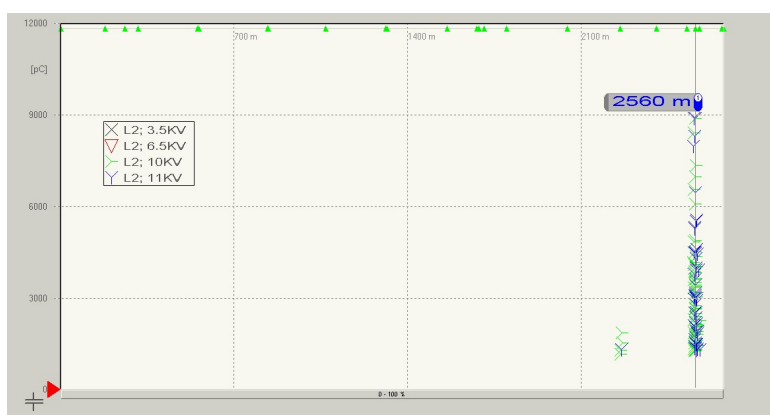
- Celkový stav kabelu ... vysoké provozní riziko
- Absolutní hodnoty TD
TD u L1, L3 nízké hodnoty ... dobrý stav
TD u L2 velmi vysoké ... vysoké provozní riziko
- Standardní odchylka TD
STD L1, L3 velmi nízká, stabilní stav ... suché podmínky
STD L2 velmi vysoká, nestabilní stav ... možné vniknutí vody do spojů
- DTD (Delta TD)
DTD u L1, L3 bez nárůstu TD v rozsahu napětí ... dobrý stav
DTD u L2 vysoká hodnota, výrazně rostoucí hodnota TD u vyššího napětí, indikace svodového stavu souvisejícího s napětím, vodivé cesty ve spojích
- Analýza trendu TD
L1 a L3 poměrně stabilní stav trendu, lehce rostoucí vývoj trendu
L2 velké výchylky, možné vniknutí vody a proudové vodivé cesty
- Je potřeba prozkoumat L2.

12.2.4 Výsledné PD



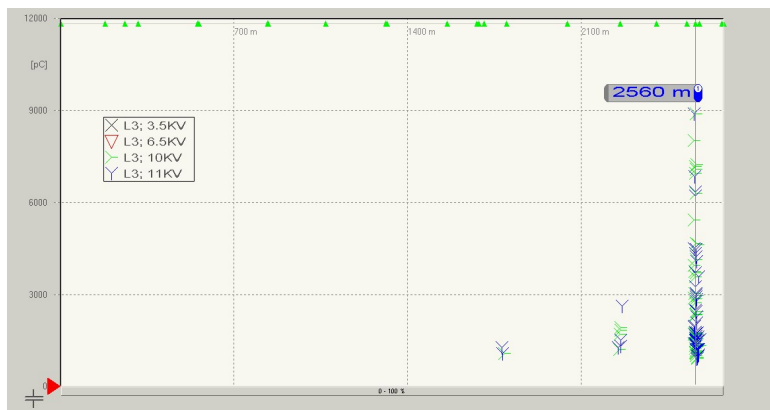
Aktivita PD v L1:

- Aktivita PD v L1 na 2579 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U₀
- PD do 500 pC při 1.5U₀



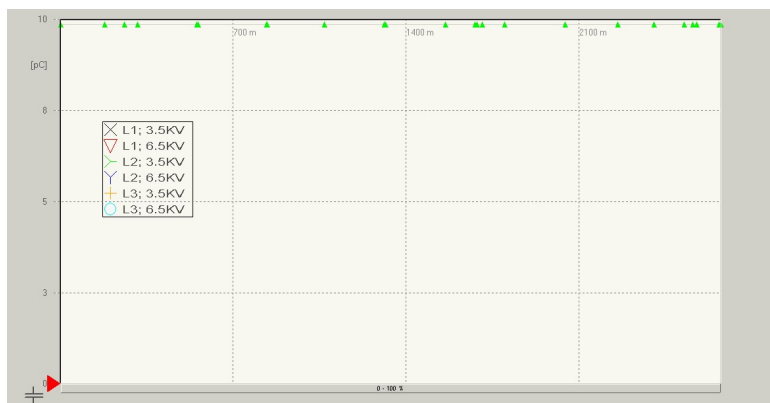
Aktivita PD v L2:

- Aktivita PD v L1 u spoje na 2560 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U₀
- Vysoké PD do 9000 pC při 1.5U₀



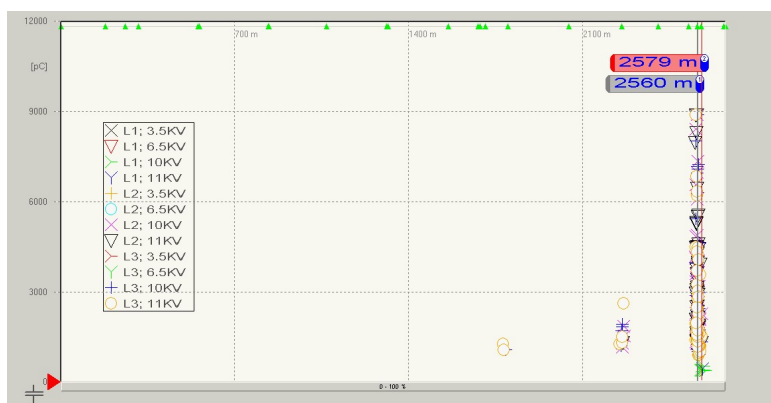
Aktivita PD v L3:

- Aktivita PD v L1 u spoje na 2560 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U₀
- Vysoké PD do 9000 pC při 1.5U₀



Aktivita PD při jmenovitém napětí 1.0 U₀ a nižším:

- bez PD aktivit



Celková aktivita PD:

- Aktivita PD patrné u dvou spojů
- PDIV nad 1.0 U_o
- Aktivita PD do 9000 pC

12.2.5 Interpretace PD

L1: Aktivita PD u spoje na 2579 m, s PDIV při 1.5U_o do 500 pC

L2 a L3: PD zaznamenané ve spojích na 2560 m, s PDIV při 1.5U_o, do 9000 pC

Žádná aktivita PD na úrovni provozního napětí. Stav spojů s PDIV nad 1.0 U_o se nepovažuje za příliš vážný. Tento příklad ukazuje, jak je důležité provádět offline měření PD do 1.7U_o za účelem rozpoznání skrytých poruch.

U spojů, které vykazují aktivity PD s PDIV při 1.5U_o a úroveň nabití 9000 pC, je třeba naplánovat výměnu ve střednědobém termínu.

12.2.6 Diagnostická analýza

V souladu s výsledným TD je třeba provést zásah u L2. Tato fáze vykazuje velmi vysokou hodnotu středního TD a standardní odchylku STDTD. Z analýzy trendu TD jsou patrné velké výchyly. Toto vysoké kolísání časové stability TD většinou souvisí **minimálně s jedním spojem ovlivněným vniknutím vody**. Je-li ve spoji přítomna vlhkost, může dojít k výraznému utlumení nebo vyhasnutí aktivit PD. V typických případech se **výboj PD výrazně sníží**, v některých případech nebudou vznikat vůbec žádné PD.

Metoda měření TD, včetně souvisejících technologií a praktických zkušeností, je již dobře zavedená. IEEE400.2-2013 je srozumitelnou směrnicí, která stanoví parametry měření TD s ohledem na zkušební napětí, zkušební postupy a kritéria hodnocení.

Měření PD je dobře známou metodou. Vzhledem k jeho složitosti s ohledem na zdroj nejsou v normách stanovena žádná kritéria hodnocení. **Je-li k posouzení stavu kabelu použito pouze měření PD, je tento příklad důkazem, že stav kabelu může být posouzen chybně a poruchy související s vniknutím vody a vlhkosti nemusí být rozpoznány.**

Aby bylo posouzení spolehlivější, doporučuje se provádění monitorované zkoušky odolnosti (MWT) po dobu 15 až 60 minut. Během zkoušky MWT se po určitou dobu aplikuje vysoké VLF napětí se současným nepřetržitým sledováním hodnoty TD. U zestárých kabelů doporučuje IEEE400.2-2013 provádět zkoušku odolnosti po dobu 30-60 minut. Dle zkušeností společnosti BAUR lze doporučit k posouzení stavu kabelu v tomto případě pouze 15 minut.

Jelikož je hodnota TD v L2 takto vysoká a lze předpokládat vniknutí vody do spoje, slouží MWT k potvrzení tohoto závěru. Má-li závada souvislost s jakoukoli jinou poruchou podél kabelu, dá se předpokládat velmi brzké selhání vadného místa v průběhu zkoušky odolnosti. Pokud však do spoje vnikla voda, může kabel vydržet delší dobu. Zkouška MWT by měla prokázat účinek VLF napětí aplikovaného na tyto spoje. Voda ve spojích by se měla začít vypařovat, což by mělo časem vést k poklesu hodnoty TD.

Výsledek zkoušky MWT

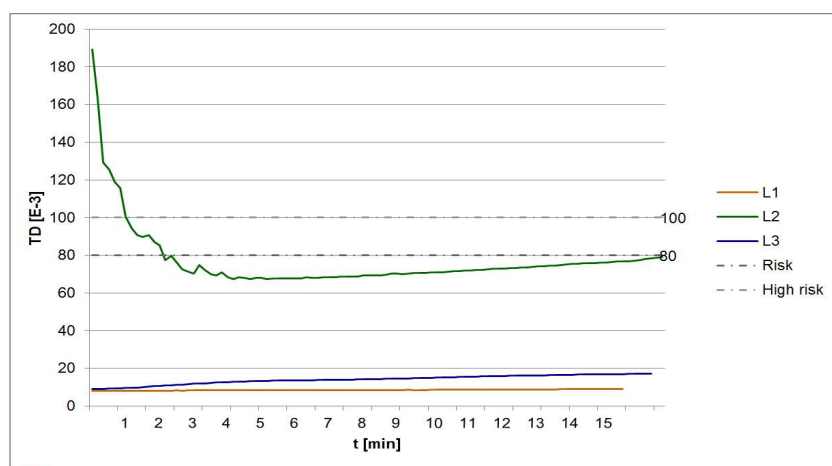
- U L1 TDΔt stabilní.
- U L2 je patrná velmi vysoká hodnota TD na začátku a výrazný pokles hodnoty TDΔt v průběhu času.

Známky vysoušení při VLF

- U L3 hodnota TDΔt lehce stoupá.

Stav stárnutí

MWT curve



12.2.7 Závěr a doporučení

Stav L2 je vysoce rizikový, u L3 je patrné mírné stárnutí a L1 je v dobrém stavu. Lokalizace vadného spoje měřením TDPD představuje výzvu, jelikož tento kabelový systém obsahuje 22 spojů a směs kabelových úseků XLPE a PILC. Lze uvažovat o výměně úseků, včetně těch nejstarších i úseků PILC. To by mělo za následek výměnu starých kabelových úseků, které potřebují být vyměněny v každém případě, včetně dalšího snížení počtu spojů. Po vyřezání kabelu a před montáží nového úseku může zákazník v rámci další analýzy provést zkoušky na bližším i vzdálenějším konci kabelu.

U kratších kabelových úseků bude možné použít metodu grafické analýzy TDR s cílem identifikace spojů, do nichž pronikla voda.

Spoje s průnikem vody se obvykle projevují jako poruchy kabelových plášťů. Účinným způsobem lokalizace vlhkých spojů je jejich předběžná lokalizace můstkovou metodou a přesné zaměření metodou krokového napětí.

Pomocí metody MWT byl zjištěn průnik vody do spoje. Z důvodu posouzení celkového stavu kabelu i přesného zaměření místa závady je důležité zkombinovat dohromady měření TD a PD.

12.3 Případová studie H 3 - 5360

Klíčové body:

- 740 m, 11 kV, kabel XLPE, 9 spojů
- Indikace spoje s vniknutím vody
- Velmi malé aktivity PD
- Vadný spoj se odrazí ve výsledku TD
- Vniknutí vody (vysoká standardní odchylka, klesající vzorec trendu), bez PD
- Analýza TDR použitá k lokalizaci spoje s vniknutím vody u spoje Jt. 8 na 614 m
- Stav nízkého rizika po výměně spoje

Naše zn.:	H3 - 5360
Datum zkoušky:	1. zkouška dne 16. 4. 2013 2. zkouška dne 10. 5. 2013
Počasí:	Slunečné
Vlhkost:	80 %
Žadatel:	Electricity Company Hongkong
Umístění kabelu:	Ostrov Hongkong
Typ kabelu:	AX, CX, 2CX
Bližší konec (od):	SHAUKEIWAN ZONE S/S SW.64
Vzdálený konec (k):	OI YAT HOUSE S/S SW.3
Rychlost impulsu (m/μs)	85.3
Délka kabelu:	740 m
Jmenovité napětí:	11 kV
Výrobce:	NA
Rok výroby:	1998 (rok instalace)
Počet fází:	3
Stav půdy	vlhká
Poloha spoje	celkem 9 spojů
Místo zkoušky:	SHAUKEIWAN ZONE S/S SW.64
Použité zkušební zařízení	BAUR Frida TD (k měření TD) Přenosný BAUR PD (k měření PD)

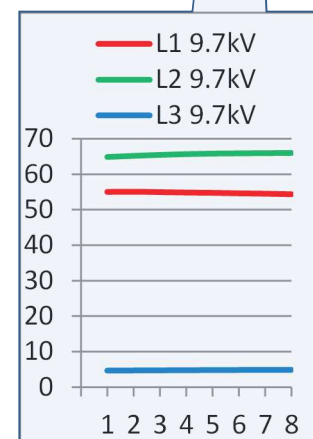
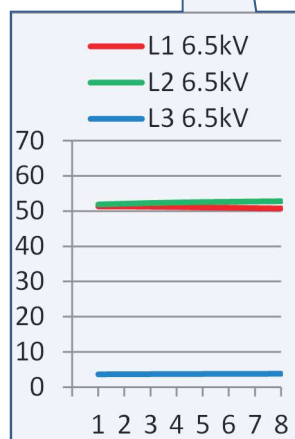
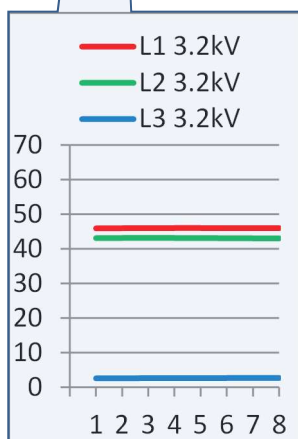
12.3.1 Uspořádání kabelu

X	0	1	2	3	4	5				
R-	130	-	47	-	76	-	83	[3-3]	10	[3-2]
Y-	-----									
B-	300 SQMM CX	-	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	-	300 SQMM AX	[1-1]	300 SQMM CX	[1-1]
	02-DEC-1992		02-DEC-1992		02-DEC-1992		APR-1988		19-OCT-2001	16
	BICC 0		BICC 0		BICC 0		UNKN 0		BICC2000	
	0m	130m	177m	253m	336m	346m				
	5	6	7	8	9	Y				
[3-2]	159	-	34	-	75	-	95	[1-1]	31	[1-R]
[2-3]	-----									
[1-1]	240 SQMM CX	-	300 SQMM CX	-	300 SQMM CX	-	300 SQMM CX	[3-3]	300 SQMM 2CX	[3-B]
	16-AUG-1998		23-SEP-2000		12-SEP-2000		26-JUN-2000		25-SEP-2007	
	BICC1998		BICC2000		BICC2000		BICC1999		SHAN2007	
	346m	505m	539m	614m	709m	740m				

12.3.2 Výsledné TD ze dne 16. 4. 2013



Úroveň H ... vysoké riziko



TD (E-3)	0.5U ₀ (kV)	U ₀ (kV)	1.5U ₀ (kV)	DTD
	3.5	6.5	10	
L1	45.97	51.10	54.79	8.81
L2	43.09	52.46	65.62	22.53
L3	2.643	3.748	4.808	2.16

STDTD	0.5U ₀ (kV)	U ₀ (kV)	1.5U ₀ (kV)
	3.5	6.5	10
L1	0.029	0.203	0.234
L2	0.040	0.302	0.373
L3	0.039	0.050	0.075

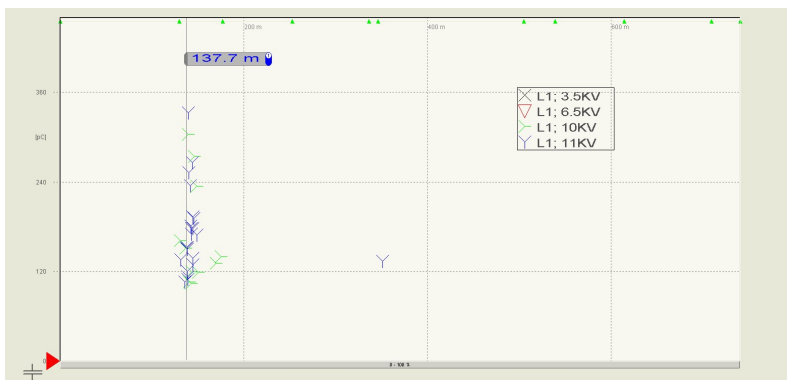
Přehled TD:

Fáze	Krok	Napětí kV	Průměrná hodnota tan delta	Standardní odchylka [e-3]	Počet	Zatížení nF
L1	1	3.2	45.975	0.029	8	303.2
L1	2	6.5	51.106	0.203	8	301.1
L1	3	9.7	54.792	0.234	8	301.2
L2	1	3.2	43.09	0.040	8	306.1
L2	2	6.5	52.464	0.302	8	304.1
L2	3	9.7	65.627	0.373	8	304.6
L3	1	3.2	2.643	0.039	8	306.5
L3	2	6.5	3.748	0.050	8	304.5
L3	3	9.7	4.808	0.075	8	303.9

12.3.3 Interpretace výsledku TD

- Celkový stav kabelu ... vážné provozní riziko
- Absolutní hodnoty TD
 - TD u L1, L2 velmi vysoké ... vysoké provozní riziko
 - TD u L3 nízké ... dobrý stav
- Standardní odchylka TD
 - STD L1, L2 vysoká, nestabilní stav ... **indikace vniknutí vody**
 - STD L3 nízká, stabilní stav... **suché podmínky**
- DTD (Delta TD)
 - DTD u L1, L2 silný nárůst TD v rozsahu napětí
 - DTD u L3 lehký nárůst TD v rozsahu napětí
- Analýza trendu TD
 - L1 klesající vývoj trendu, **indikace vniknutí vody do spoje**
 - L2 rostoucí vývoj trendu, indikace vodivých cest ve spoji
 - L3 lehce rostoucí vývoj trendu, stárnutí vlivem vodních stromečků
- Je potřeba prozkoumat L1 a L2.

12.3.4 Výsledné PD ze dne 16. 4. 2014



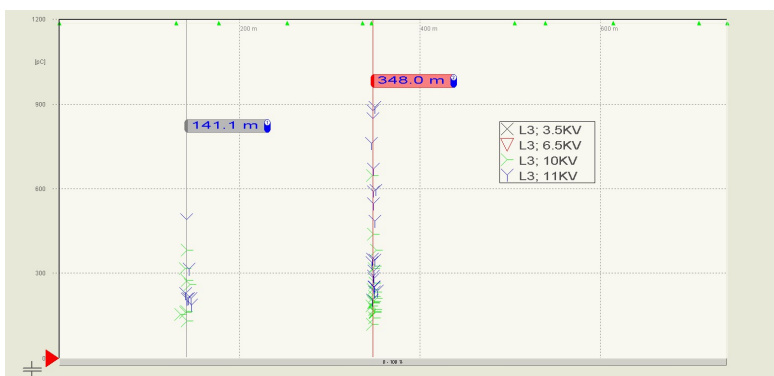
Aktivita PD v L1:

- Aktivita PD v L1 blízko spoje na 137 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U₀
- PD do 350 pC při 1.5U₀
- Bez vážné aktivity PD



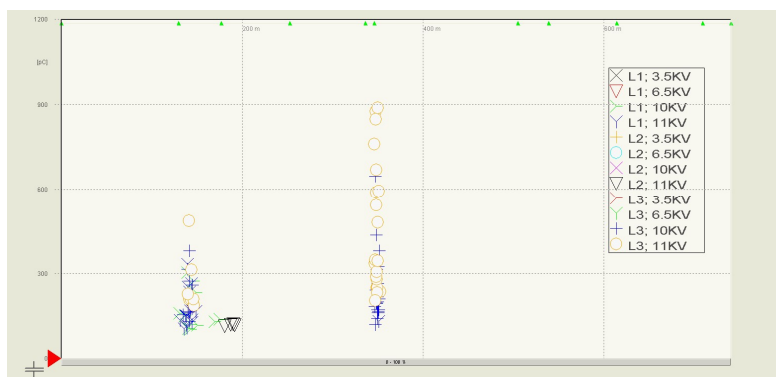
Aktivita PD v L2:

- Malá aktivita PD v L2 blízko spoje č. 2
- Spouštěcí napětí PD při 1.7U₀
- Bez vážné aktivity PD



Aktivita PD v L3:

- Aktivita PD blízko spoje č. 1 na 141 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U₀
- PD do 500pC
- Aktivita PD u spoje č. 5 na 348 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U₀
- PD do 900 pC



Celkové aktivity PD:

- Aktivita PD ve všech fázích na 141 m a 348 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U₀
- PD do 900 pC

Interpretace PD

- L1 a L2: Aktivita PD ve spoji na zanedbatelné úrovni, PDIV při 1.5U_o
- L3: PD zaznamenány ve spojích na 148 m, s PDIV při 1.5U_o, do 500 pC a na 348 m, s PDIV při 1.5U_o, do 900pC

Bez aktivity PD na úrovni provozního napětí. Stav spojů s PDIV nad 1.0 U_o není třeba považovat za příliš vážný. Tento příklad ukazuje, jak je důležité provést offline měření PD do 1.7U_o s cílem rozpoznat skryté poruchy.

U spojů, které vykazují aktivity PD s PDIV při 1.5U_o a s úrovní nabíjení 1000 pC, je třeba zvážit výměnu v dlouhodobém termínu.

12.3.5 Diagnostická analýza

Na základě výsledků zkoušky TD lze rozpoznat vniknutí vody nejméně do jednoho ze spojů podle klesajícího trendu v L1. Nejsou přítomny žádné závažné aktivity PD. V L1 indikuje vysoušecí účinek při aplikaci vysokého napětí vlhkost, pokud hodnota TD klesá (negativní trend).

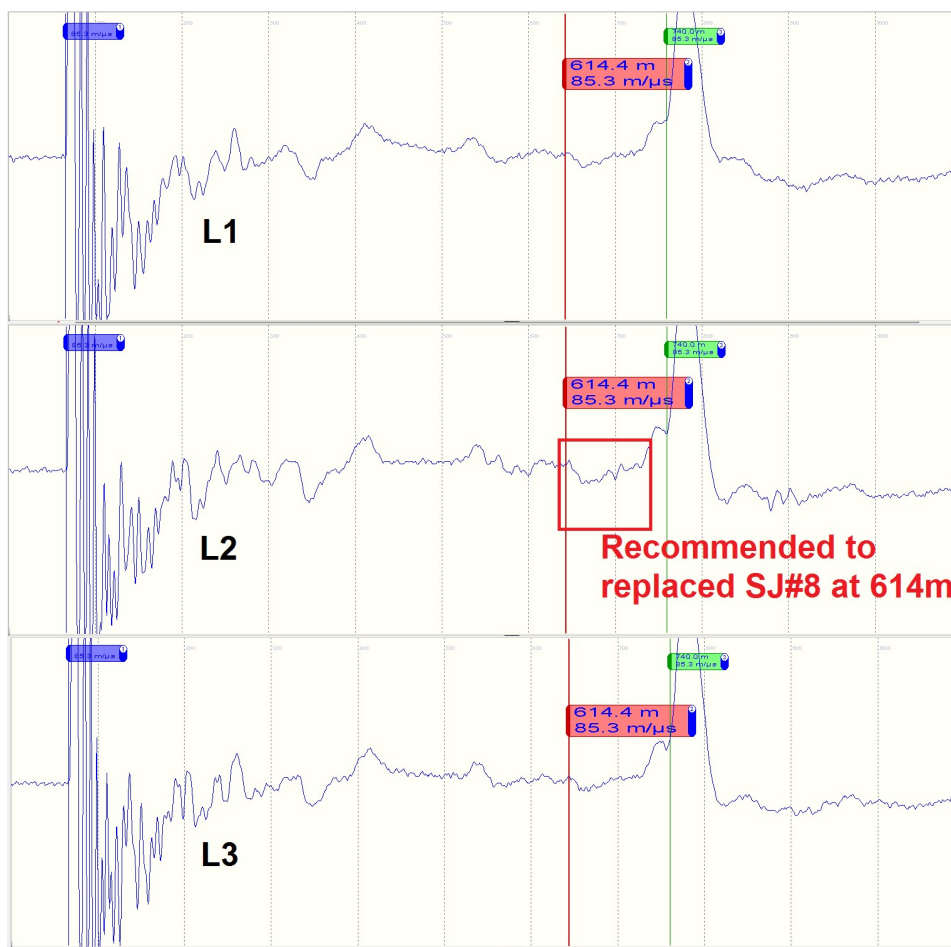
V L2 je patrný rostoucí trend TD. To je známkou vodivých cest. Při aplikaci vysokého napětí je patrný účinek postupně rostoucího svodového proudu. Mezi stíněním a žílou uvnitř spoje vznikají částečně vodivé cesty. Je-li ve spoji přítomna vlhkost, může dojít k výraznému útlumu nebo vyhasnutí aktivit PD. V typických případech **se náboj PD výrazně sníží**, v některých případech nemusí vznikat vůbec žádné PD.

Tento kabel obsahoval celkem 9 spojů, přesná lokalizace vadných spojů byla proto výzvou.

K rozeznání **nepřavidelných změn impedance** způsobených spojením s vniknutím vody byla použita metoda odrazu impulsů (TDR). V tomto případě **mohl být vlhký spoj úspěšně lokalizován**.

Při použití metody TDR se do kabelového systému odešle impuls a podle charakteristiky jeho odrazu je možné určit změny impedance mezi žílou a pláštěm. Vniknutí vody do vlhkého spoje pravděpodobně způsobí negativní změnu impedance, protože je činitel odrazu odlišný od suchého spoje.

Porovnáním grafů TDR všech tří fází, jak je vidět na obrázku níže, **lze identifikovat spoj 8 ve vzdálenosti 614 m jako vlhký spoj**. Je u něj patrný mírně negativní odraz s velkou šířkou impulsu.



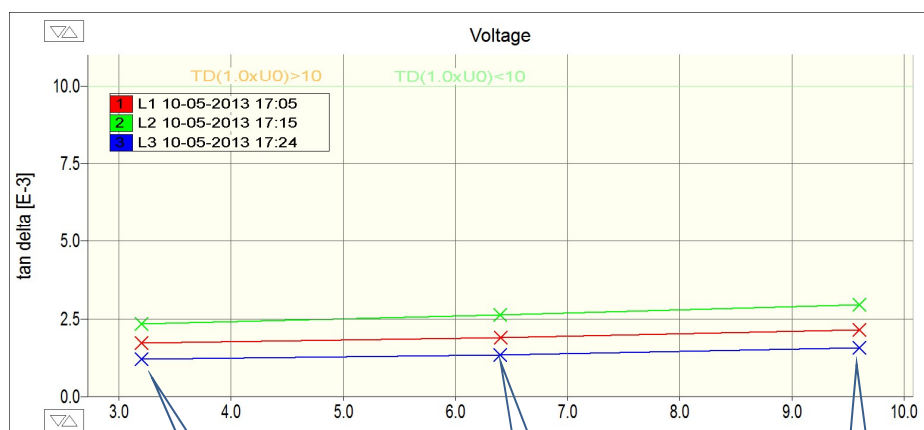
12.3.6 Doporučený přístup - zásah

Za účelem potvrzení závěru, že je vadným místem vlhký spoj, byla doporučena jednohodinová monitorovaná zkouška odolnosti (MWT). MWT je zkouška odolnosti. při níž, je sledována hodnota TD v reálném čase. Vnikla-li do spoje voda, dá se předpokládat, že hodnota TD bude zpočátku klesat, a poté bude zvolna stoupat, nebo se stabilizuje. U vlhkých spojů většinou nedojde během VLF zkoušky k průrazu.

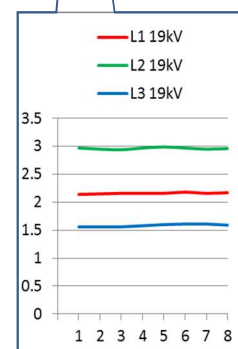
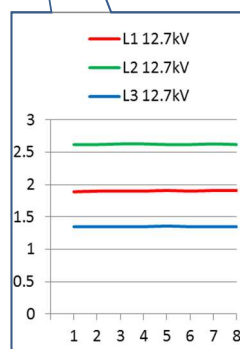
Analýza TDR indikuje spoj 8 ve vzdálenosti 614 m s nepravidelnou změnou impedance. Bylo doporučeno tento konkrétní spoj prozkoumat/vyměnit.

Dne 10. 5. 2013 byl spoj 8 ve vzdálenosti 614 m vyměněn. Po opravě bylo provedeno měření TD a PD.

12.3.7 Výsledné TD ze dne 10. 5. 2014, opakovaná zkouška po výměně spoje



Úroveň L ... nízké riziko



- Celkový stav kabelu nízké provozní riziko
- Absolutní hodnoty TD
TD u všech fází velmi nízké ... dobrý stav
- Standardní odchylka TD
STD u všech fází velmi nízké, stabilní stav ... suché podmínky
- DTD (Delta TD)
DTD u všech fází bez nárůstu TD v rozsahu napětí
- Analýza trendu TD
L1, L2, L3 velmi stabilní stav trendu
 stabilní vývoj trendu

12.3.8 Porovnání výsledků, před výměnou spoje a po ní

Před

TD (E-3)	0.5U _o (kV)	U _o (kV)	1.5U _o (kV)
	3.5	6.5	10
L1	45.975	51.106	54.792
L2	43.090	52.464	65.627
L3	2.643	3.748	4.808

Po

TD (E-3)	0.5U _o (kV)	U _o (kV)	1.5U _o (kV)
	3.5	6.5	10
L1	1.730	1.903	2.159
L2	2.348	2.623	2.962
L3	1.213	1.351	1.583

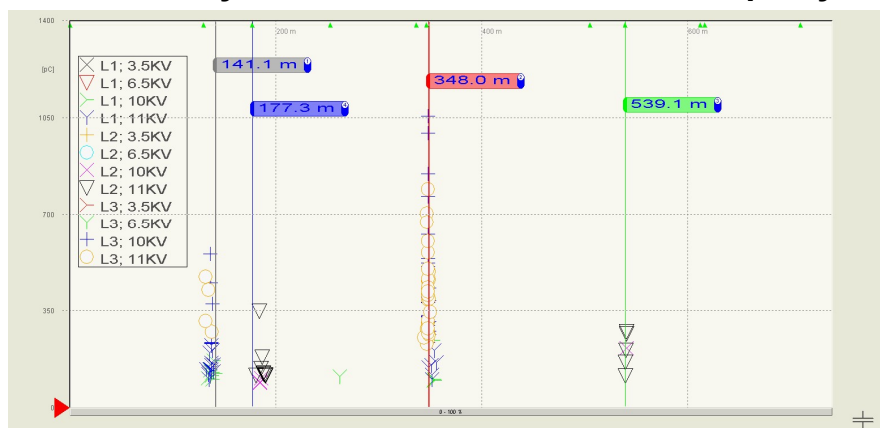
Před

STDTD	0.5U _o (kV)	U _o (kV)	1.5U _o (kV)
	3.5	6.5	10
L1	0.029	0.203	0.234
L2	0.040	0.302	0.373
L3	0.039	0.050	0.075

Po

STDTD	0.5U _o (kV)	U _o (kV)	1.5U _o (kV)
	3.5	6.5	10
L1	0.007	0.007	0.011
L2	0.007	0.004	0.015
L3	0.003	0.003	0.019

12.3.9 Výsledné PD ze dne 31. 1. 2012 – po výměně spoje



Celkové aktivity PD:

- Žádné aktivity PD při 1.0U_o a nižším napětí
- aktivita PD ve 4 spojích
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U_o
- PD do 900pC

12.3.10 Závěr

Měření TD a PD bylo provedeno u 11kV podzemního kabelového systému. Při první zkoušce byl stav kabelu vyhodnocen jako velmi vysoce rizikový, vyžadující okamžitý zásah. Hodnoty TD byly velmi vysoké a nestabilní. Aktivity PD byly zaznamenány, nespojujely však s vadným místem.

Byla použita analýza TDR. Analýzou tvaru impulsu bylo možné vadné místo identifikovat a provést výměnu. Výsledky zkoušky po opravě ukazují stav kabelu s nízkým rizikem a lze jej bezpečně znovu uvést do provozu.

Po výměně spoje je kabelový systém znovu v dobrém stavu a lze obnovit jeho bezpečný provoz. Všeobecně se doporučuje provést opakovanou zkoušku tohoto kabelu po pěti letech a znovu posoudit jeho stav.

12.4 Případová studie H 4 - 4285

Klíčové body:

- 1449 m, 11 kV, kabel XLPE s WTPCS, 13 spojů
- Stárnutí vlivem vodních stromečků v náchylném kabelovém úseku
- Po výměně WTPCS bylo patrné zlepšení hodnoty TD
- Výsledky TD po rozdělení kabelu na úseky (vysoké TD v WTPC, 2. úsek)
- Vniknutí vody do spoje Jt. 1 (vysoká standardní odchylka), bez PD
- Rozvoj vodních stromečků v oblasti spoje Jt. 1
- Po rozboru odhaleny vodní a elektrické stromečky

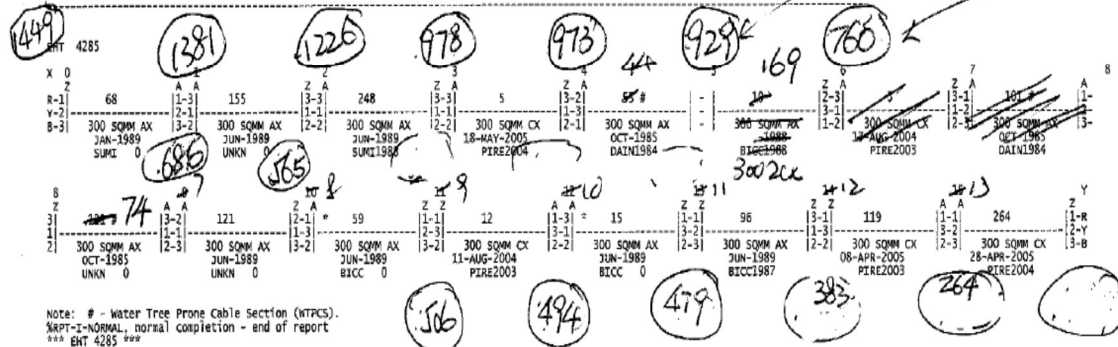
HEC zn.:	H4 - 4285
Datum zkoušky:	13. 7. 2011
Počasí:	Dobré
Vlhkost:	45 %
Žadatel:	Electricity Company Hongkong
Umístění kabelu:	Ostrov Hongkong
Typ kabelu:	XLPE
Bližší konec (od):	Kennedy Road Zone S/S SW34
Vzdálený konec (k):	NEW BANK OF CHINA BLDG L1 WEST SW12
Rychlost impulsu (m/μs)	80.6
Délka kabelu:	1449 m
Jmenovité napětí:	11 kV
Rok výroby:	1985(WTPC), 1989(WTPC), 2004, 2005
Počet fází:	3 žíly
Stav půdy:	n/a
Polohy spojů	13 spojů
Místo zkoušky:	Kennedy Road Zone S/S SW34
Provedené zkoušky: VLF TD ... BAUR Frida TD VLF PD ... BAUR Frida TD + přenosný PD	

12.4.1 Uspořádání / struktura kabelu

hvf_p_4285
EHT 4285 (11kV) NEW BANK OF CHINA BLDG L1 WEST (X) TO KENNEDY RD ZONE S/S (Y) 13-FEB-2010

Rated Voltage	Material Code	Size	Length(m)	
11	AX	300sqmm	1049	This cable contains Water Tree Prone Cable Section(s) (WTPCS), VLF TEST REQUIRED
11	CX	300sqmm	405	

INT/MAKE	DATE	WEATHER	LOG/ENGINEER	JOINTER	SWITCH	REMARKS	MAP	CO-ORDINATE	SKETCH NO
X RAVR	28-MAR-2004	FINE	C	6127	S5635	12		11sw14A1 834642.213, 815396.966	0610/2004
1 RAVN	06-JUN-1989	UNKNOWN		4217				11sw09C3 834661.149, 815638.180	1072/1990
2 RAVN	05-JUN-1989	UNKNOWN		4217	C3	13		11sw14A1 834800.566, 815397.304	1072/1990
3 RAVN	18-MAY-2005	RAIN		5122	S5005			11sw14A2 835001.354, 815472.283	1223/2005
4 RAVN	18-MAY-2005	RAIN		5122	S5159			11sw14A2 835006.056, 815471.948	1223/2005
5 RAVN	17-AUG-2004	FINE		5122	S5005			11sw14A2 835049.217, 815461.923	1836/2004
6 RAVN	17-AUG-2004	FINE		5122	S5159			11sw14A2 835058.953, 815459.418	1836/2004
7 RAVN	23-OCT-1985	UNKNOWN		2117	J	712		11sw14A2 835133.346, 815457.460	0 /
8 RAVN	JUN-1989	UNKNOWN		4217				11sw14A1 835276.670, 815440.307	1072/1990
9 RAVN	JUN-1989	UNKNOWN		4217				11sw14A2 835174.806, 815339.947	1072/1990
10 RAVN	11-AUG-2004	FINE		5122	S5005			11sw14A2 835122.873, 815303.295	1755/2004
11 RAVN	11-AUG-2004	FINE		5122	S5159			11sw14A4 835113.568, 815296.810	1755/2004
12 RAVN	JUN-1989	UNKNOWN		4217				11sw14A4 835101.644, 815288.187	1072/1990
13 RAVN	14-MAY-2005	FINE		5839	J1386			11sw14A4 835032.315, 815236.491	1337/2005
14 RAVN	03-MAY-2005	FINE		4382	S5635			11sw14A4 835060.648, 815120.356	1386/2005
15 RAVN	13-MAY-2005	UNKNOWN	C	5639	J	407	34	11sw14C2 835129.457, 814985.527	1337/2005



Přehled:

Došlo k výpadku kabelu mezi Kennedy Zone S/S a New Bank of China. Bylo třeba najít hlavní příčinu tohoto problému pomocí zkušebního a diagnostického VLF zařízení. Byla provedena měření TD a PD a zaznamenány vysoké hodnoty TD. Podezřelé úseky byly nahrazeny novým kabelem. Po dvou týdnech však jeden ze spojů neočekávaně selhal. Zkoumáním bylo zjištěno, že se tento spoj nacházel ve WTPCS, a právě to bylo příčinou jeho poruchy.

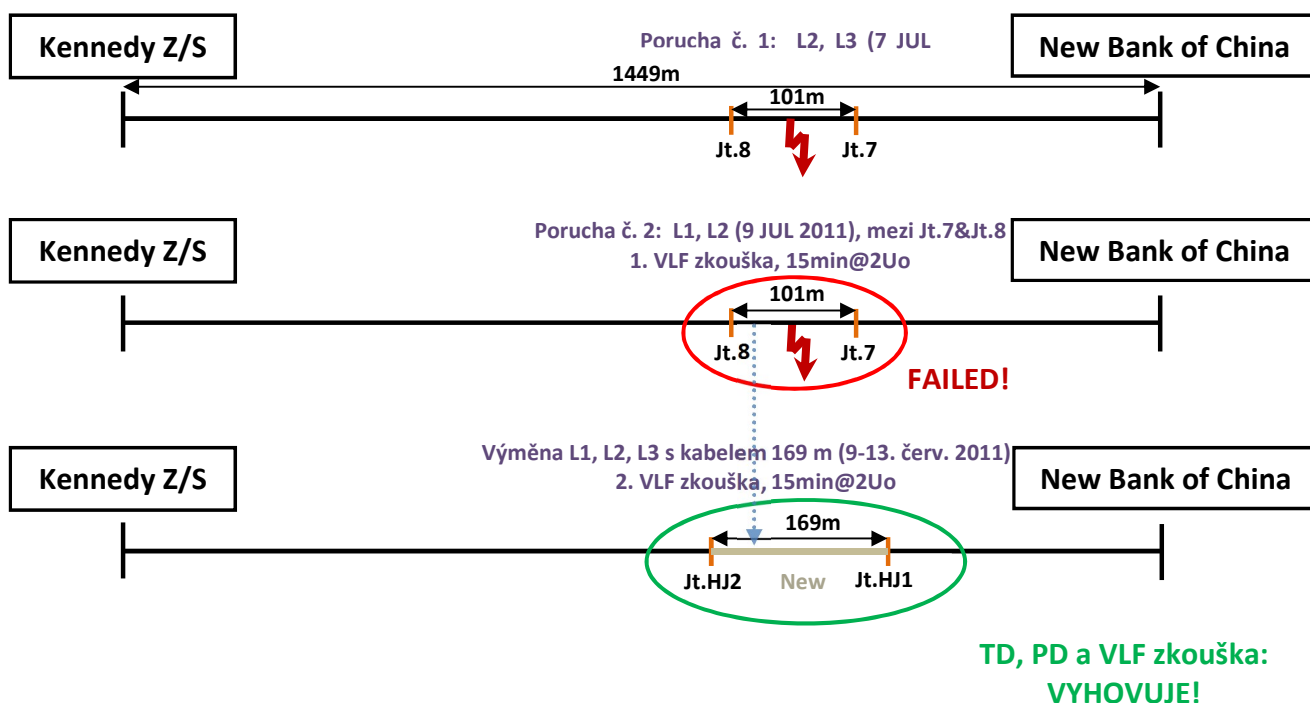
12.4.2 Historie

Dne 7. července 2011 došlo k výpadku kabelu mezi Kennedy Zone S/S Sw.34 a New Bank of China; byla objevena porucha kabelu v kabelovém tělese (izolaci XLPE) v L2 a L3. Porucha mezi Jt.7 a Jt.8 byla ihned opravena.

Dne 9. července 2011 byla provedena 15minutová VLF zkouška při 2.0xU₀; L1 a L2 při zkoušce selhaly. Ve stejném úseku byla lokalizována i 2. porucha (mezi Jt.7 a Jt.8).

Místo poruchy bylo podrobně prozkoumáno. Úsek byl vyhodnocen jako náchylný k tvorbě vodních stromečků (WTPCS). Byla zjištěna vážná koroze pláště a určité známky vniknutí vody. proto bylo rozhodnuto o výměně 169 m kabelu, od spoje HJ#1 ke spoji HJ#2, což rovněž zahrnuje Jt.7 a Jt.8.

Dne 13. července 2011 byla provedena 15minutová VLF zkouška při 2U₀, během níž všechny 3 fáze při zkouškách TD, PD i VLF vyhověly.



12.4.3 Výsledky měření TD a PD

Výsledné TD zaznamenané dne 9. ČERVENCE 2011

- po opravě poruchy č. 1
- před VLF zkouškou



Tabulka průměrných hodnot tan delta MTD:

Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L2	3.713	3.855	4.550
L3	4.052	4.174	5.620

Tabulka standardních odchylek:

Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L2	0.003	0.006	0.076
L3	0.005	0.003	0.225

Přehled:

Fáze	Krok	Napětí kV	Pr. hodn. tan delta	St. odch. [e-3]	Zatížení nF
L2	1	3.2	3.713	0.003	8 655.5
L2	2	6.5	3.855	0.006	8 656.1
L2	3	9.7	4.550	0.076	8 649.4
L3	1	3.2	4.052	0.005	8 658.1
L3	2	6.5	4.174	0.003	8 658.7
L3	3	9.7	5.620	0.225	8 652.0

- Nebylo provedeno žádné měření PD.
- Před uvedením do provozu byla provedena 15minutová VLF zkouška.
- **L1 a L2 selhaly**, -> Výměna 169 m kabelu dne 9. - 13. července 2011.

Interpretace výsledků TD:

Celkový stav kabelu ... vysoké provozní riziko

Absolutní hodnoty TD

TD u L2, L3 vysoké hodnoty ... vysoké provozní riziko

Standardní odchylka TD

STD L2, L3 zvýšené hodnoty při 1.5U₀ ... poměrně nestabilní stav

DTD (Delta TD)

DTD u L2, L3 rostoucí TD v rozsahu napětí ... indikace stárnutí vlivem vodních stromečků

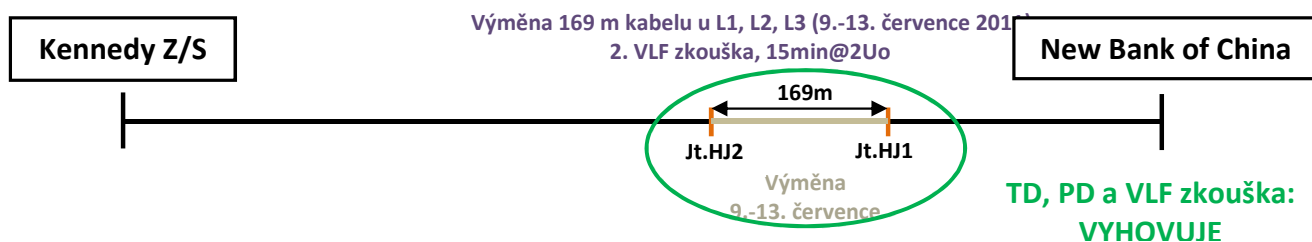
Analýza trendu TD

L2 a L3 poměrně stabilní stav trendu při 0.5U₀ a 1.0U₀, lehce **rostoucí** vývoj trendu při 1.5U₀ ... indikace stárnutí vlivem vodních stromečků

- Byla očekávána neúspěšná VLF zkouška.
- TD u L1 nebylo pozorováno, dne 7. července 2011 selhaly pouze L2 a L3.

12.4.4 Výsledné TD zaznamenané dne 13. července 2011

- oprava č. 2 po poruše
- výměna úseku



Výsledné TD ze dne 13. 7. 2011



Výsledky L1, L2 a L3 byly získány po výměně kabelového úseku dne 13. července 2011. U L1 jsou patrné velmi vysoké hodnoty TD (jaké nebyly zaznamenány dne 9. července 2011). L2 se výrazně zlepšilo, hodnota TD při 1.5U₀ klesla z 4.5x10⁻³ na 1.3x10⁻³. L3 se zlepšilo mírně, hodnota TD při 1.5U₀ klesla z 5.6x10⁻³ na 4.3x10⁻³.

Průměrné hodnoty TD u L1 a L3 stále představují vysoké provozní riziko. Hodnota delta TD v L1 je přibližně 1.1x10⁻³, což představuje „stav vysokého provozního stárnutí“. Hodnota delta TD v L2 je přibližně 0.3x10⁻³, což znamená „dobrý stav“. Hodnota delta TD v L3 je přibližně 1.0x10⁻³, což představuje „stav vysokého provozního stárnutí“. Z tohoto důvodu je nutno provést další podrobné zkoumání kabelů. Standardní odchylka TD u L1 a L3 indikuje vniknutí vody nejméně do jednoho spoje. Další známkou vlhkosti nebo mokrosti je klesající trend stability TD u L1 a L3.

Tabulka průměrných hodnot tan delta:

Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L1	6.352	6.727	7.405
L2	1.087	1.185	1.354
L3	3.340	3.824	4.342

Tabulka standardních odchylek:

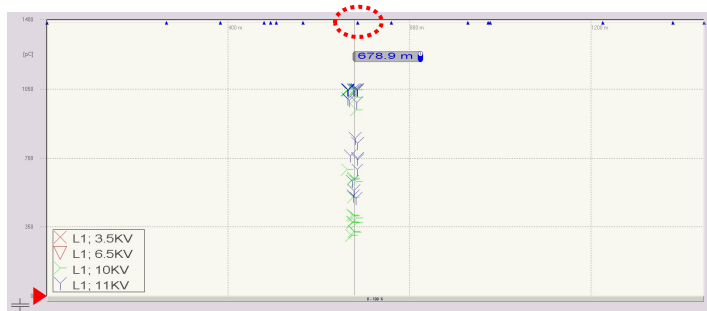
Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L1	0.385	0.310	0.271
L2	0.001	0.006	0.003
L3	0.013	0.035	0.099

Přehled:

Fáze	Krok	Napětí kV	Pr. hodn. tan delta	St. odch. [e-3]	Zatížení nF	
L1	1	3.2	6.352	0.385	8	636.2
L1	2	6.5	6.727	0.310	8	636.8
L1	3	9.7	7.405	0.271	8	630.1
L2	1	3.2	1.087	0.001	8	638.4
L2	2	6.5	1.185	0.006	8	638.9
L2	3	9.7	1.354	0.003	8	632.3
L3	1	3.2	3.340	0.013	8	640.7
L3	2	6.5	3.824	0.035	8	641.4
L3	3	9.7	4.342	0.099	8	634.7

- L1... vysoké DTD, velmi vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků, velmi vysoké provozní riziko, známky **vniknutí vody nejméně do jednoho spoje**
- L2... stabilní, považováno za referenční
- L3... vysoké DTD, vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků, vysoké provozní riziko, známky vniknutí vody nejméně do jednoho spoje (méně než u L1)

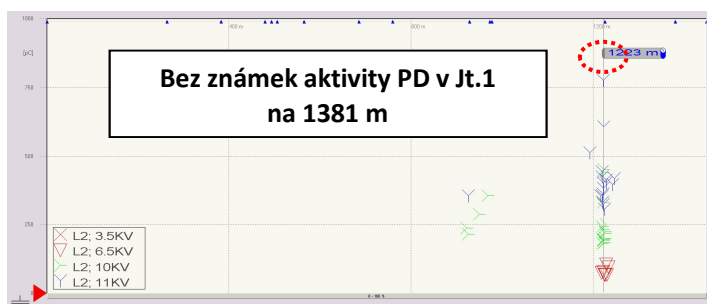
12.4.5 Výsledky měření PD po výměně 169m kabelového úseku dne 13. července



Obr. 112: Výsledné PD ve fázi 1, 13. 7. 2011

Aktivita PD v L1:

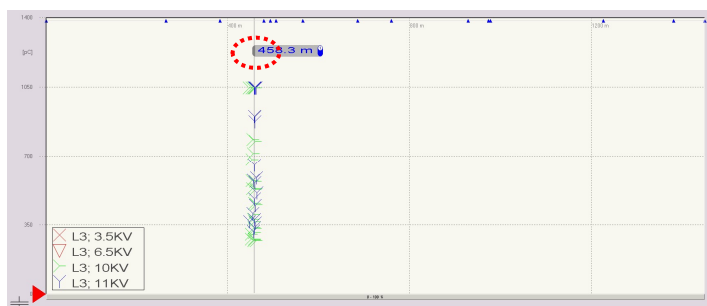
- Aktivita PD ve spoji na 679 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U_o
- PD do 1000 pC při 1.5U_o/1.7U_o



Obr. 113: Výsledné PD ve fázi 2, 13. 7. 2011

Aktivita PD v L2:

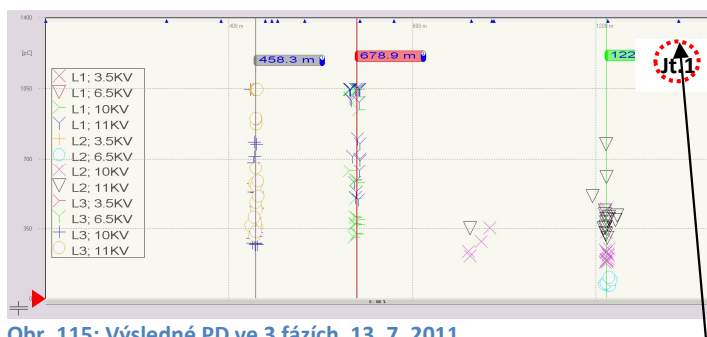
- Aktivita PD ve spoji na 1223 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.0U_o
- PD do 800pC při 1.7U_o.



Obr. 114: Výsledné PD ve fázi 3, 13. 7. 2011

Aktivita PD v L3:

- Aktivita PD v tělese kabelu XLPE na 458 m
- Spouštěcí napětí PD při 1.5U_o
- PD do 1000 pC při 1.7U_o.
- Je třeba provést analýzu, zda není dané místo zevně poškozené nebo v něm nejsou elektrické stromečky, popř. nevznikají PD ve skrytém spoji.



Obr. 115: Výsledné PD ve 3 fázích, 13. 7. 2011

Celková aktivita PD:

- Aktivita PD je patrná ve 2 spojích.
- PDIV při 1.0U_o na 1223 m
- PDIV při 1.5U_o na 679 m, 458 m
- 458 m podél kabelu, beze spoje, je potřebný průzkum

Bez PD ve spoji č. 1 na 1381 m!

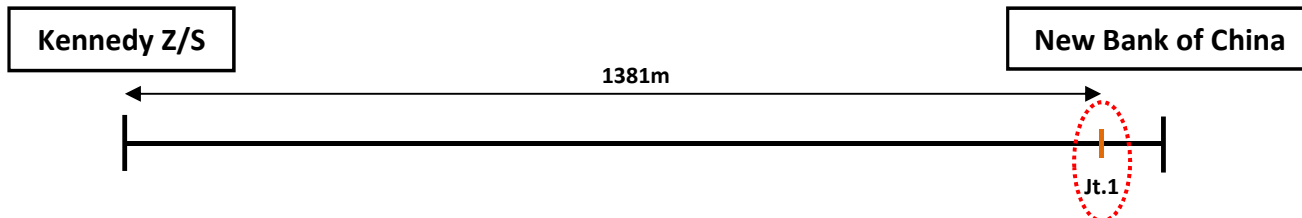
Po dokončení měření TD a PD byla provedena 15minutová VLF zkouška při 2U_o. **Všechny 3 fáze ve zkoušce vyhověly.** Podle předpisů platných v energetických podnicích patří kabely do kategorie A-1 a jejich stav byl vyhodnocen jako M (stav středního rizika). Byla nařízena jejich opakovaná zkouška po 3letém provozu (13. července 2014).

12.4.6 Přehled diagnostiky TD PD

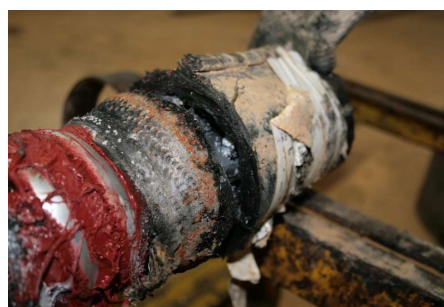
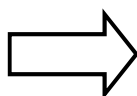
- Stav L1 a L3 představuje vysoké provozní riziko.
- Hodnoty TD DTD indikují vysoký nárůst TD v rozsahu napětí.
- Znamky vysokého stárnutí vlivem vodních stromečků v L1 a L3, známky vniknutí vody nejméně do jednoho spoje.
- Měření PD potvrdilo, že stárnutí vlivem vodních stromečků je příčinou vysoké hodnoty TD.
- Aktivita PD je rovněž patrná u několika spojů.
- U Jt.1 na 1381 nejsou patrné žádné aktivity PD.

12.4.7 Porucha kabelu dne 30. července 2011

- Po dvou týdnech normálního provozu.
- L3 selhal u spoje Jt.1, umístěném 1381 m od Kennedy Zone S/S Sw.34.



Obr. 7: Obrázek spoje před rozborem



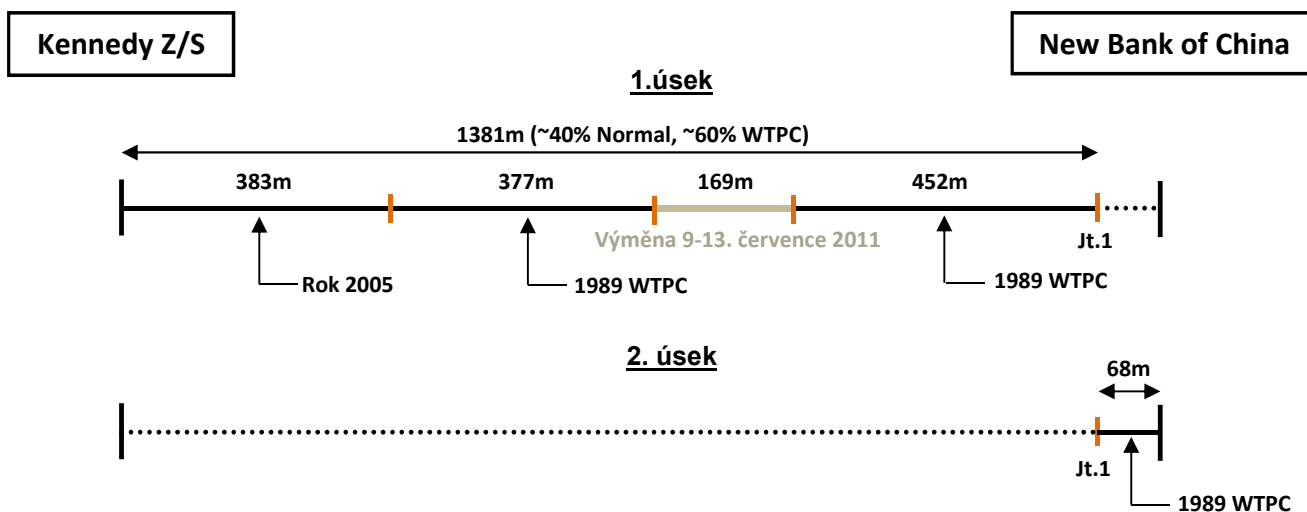
Obr. 8: Obrázek rozřezaného spoje Jt.1
(Další podrobnosti na straně 12)

Tato porucha kabelu byla neočekávaná. Bylo třeba provést podrobné zkoumání.

Krok 1: Kabel byl rozříznut ve vzdálenosti 1381 m.

Krok 2: Oba kabelové úseky byly zkoušeny samostatně
(1. úsek: 1381 m, 2. úsek: 68 m).

12.4.8 Měření TD dne 31. července 2011



1. úsek: Výsledek TD zaznamenán dne 31. července 2011

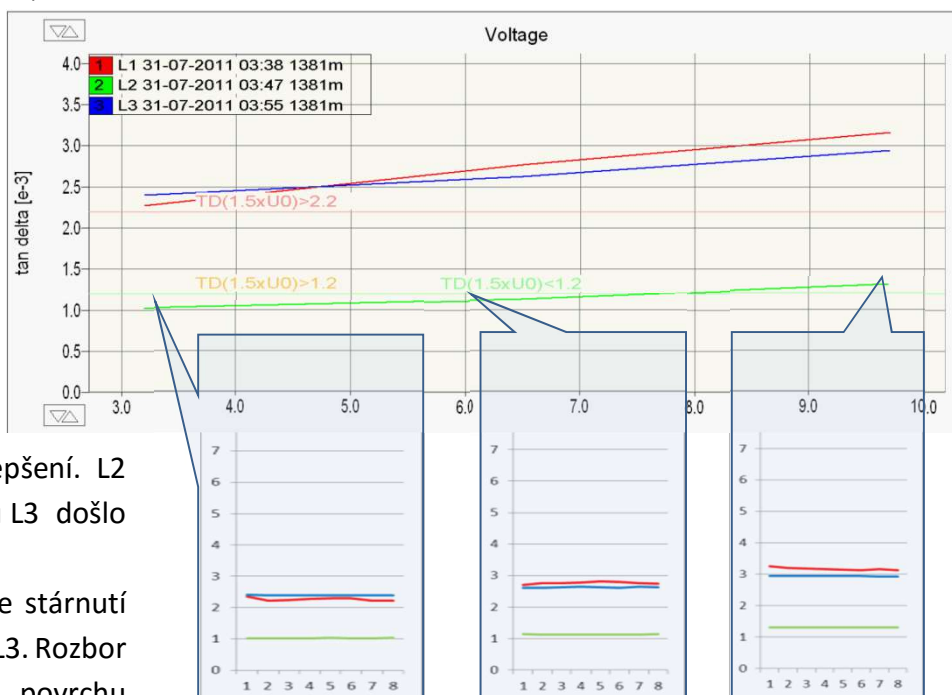
- 1381 m, včetně několika úseků s WTPC, 610 nF

Výsledek TD ze dne 31. 7. 2011, úsek 1381 m

Po poruše kabelu dne 30. července 2011 byly získány výsledky pro všechny 3 fáze v celé délce kabelu. **Průměrné hodnoty TD u L1 a L3 jsou poměrně vysoké.** L1 vykazuje nejméně stabilní chování, po eliminaci vlivu spoje Jt. 1 však došlo k výraznému zlepšení. L2 zůstal beze změny. Také u L3 došlo k výraznému zlepšení.

Standardní odchylka indikuje stárnutí vlivem vodních stromečků v L3. Rozbor prokázal známky vody na povrchu XLPE v místě koncovky a vývoj vodních stromečků v L3. Lze předpokládat, že také oblast kolem spoje je ovlivněna vysokým stárnutím s vodními stromečkami.

Hodnota delta TD v L1 činí přibližně 0.9×10^{-3} , což představuje „stav vysokého provozního stárnutí“. Z tohoto důvodu je potřebné další podrobné zkoumání kabelů. Hodnota TD celého úseku je součástí celkové indikace 40 % úseku bez WTPC a **60 % úseku WTPC.**



Tabulka průměrných hodnot tan delta:

Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L1	2.270	2.768	3.165
L2	1.024	1.129	1.307
L3	2.401	2.628	2.941

Tabulka standardních odchylek:

Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L1	0.048	0.031	0.042
L2	0.002	0.008	0.003
L3	0.003	0.007	0.010

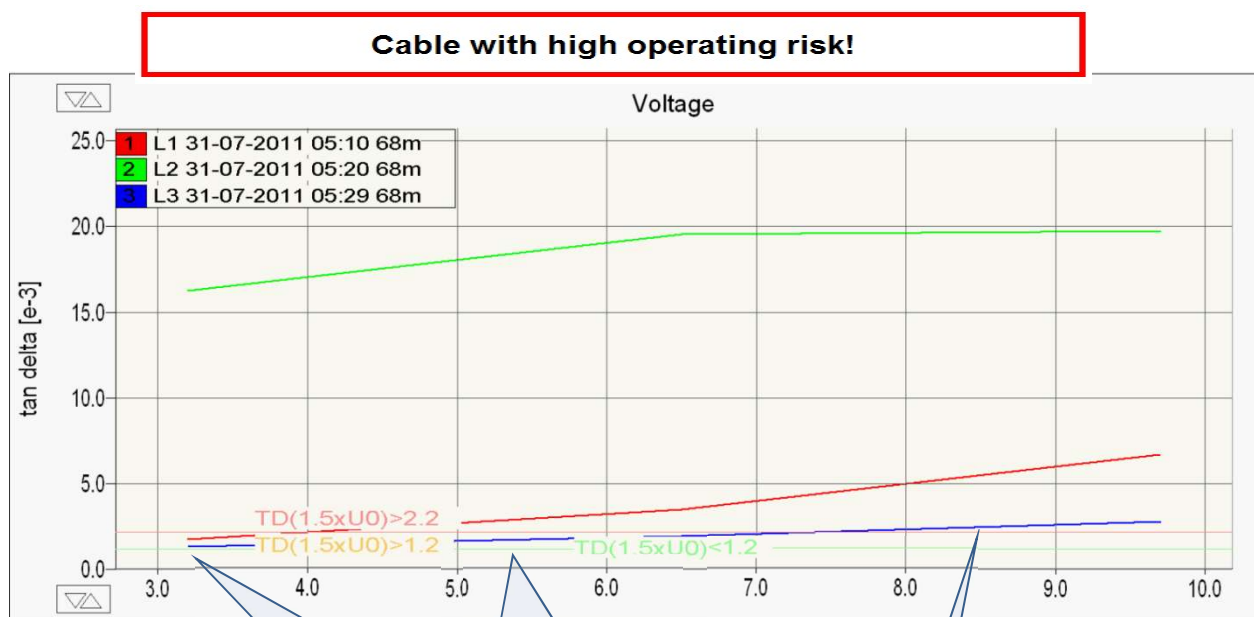
Přehled:

Fáze	Krok	Napětí kV	Pr. hodn. tan delta	St. odch. [e-3]	Zatížení nF
L1	1	3.2	2.270	0.048	8 607.7
L1	2	6.5	2.768	0.031	8 608.3
L1	3	9.7	3.165	0.042	8 602.0
L2	1	3.2	1.024	0.002	8 610.1
L2	2	6.5	1.129	0.008	8 610.7
L2	3	9.7	1.307	0.003	8 604.4
L3	1	3.2	2.401	0.003	8 612.3
L3	2	6.5	2.628	0.007	8 612.8
L3	3	9.7	2.941	0.010	8 606.5

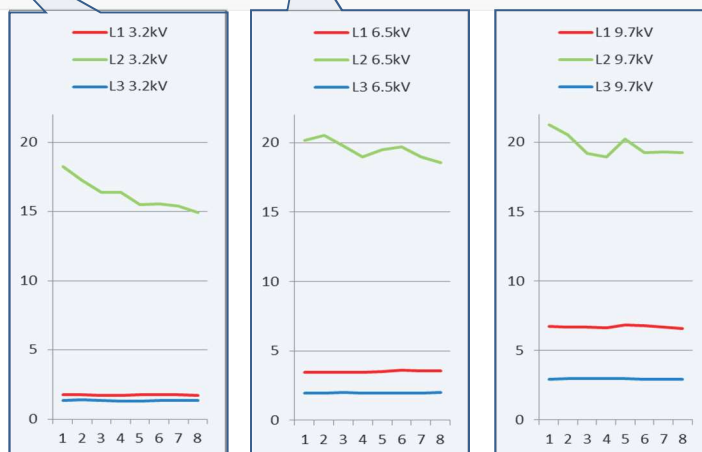
- L1... vysoké DTD, vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků, vysoké provozní riziko
- L2... stabilní, považováno za referenční
- L3... vysoké DTD, vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků, vysoké provozní riziko

2. oddíl: Výsledek TD zaznamenaný dne 31. července 2011

- 68 m, 1 oddíl s WTPC a beze spoje, 27 nF



Výsledné TD
31. 7. 2011



Po poruše kabelu dne 30. července 2011 byly rovněž získány výsledky pro všechny 3 fáze posledního 68m oddílu (vzdálenost od místa řezu ke koncovce). Výsledky TD, které se měnily v důsledku délky a homogenního složení kabelu (WTPCS bez spojů), ukazují na vysoké provozní riziko u všech kabelů, nejhorší výsledek je pak u L2. Hodnoty TD u všech 3 fází jsou mimořádně vysoké, vysoko nad přijatelným limitem, a lze očekávat velké stárnutí vlivem vodních stromečků a vniknutí vody do spoje na L2; z tohoto důvodu je nutno provést další podrobné zkoumání kabelů.

Tabulka průměrných hodnot tan delta:

Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L1	1.745	3.507	6.702
L2	16.242	19.529	19.755
L3	1.336	1.970	2.815

Tabulka standardních odchylek:

Napětí:	3.2kV	6.5kV	9.7kV
L1	0.021	0.052	0.074
L2	1.037	0.624	0.771
L3	0.028	0.024	0.041

Přehled:

Fáze	Krok	Napětí kV	Pr. hodn. tan delta	St. odch. [e-3]	Zatížení nF
L1	1	3.2	1.745	0.021	8 27.5
L1	2	6.5	3.507	0.052	8 27.3
L1	3	9.7	6.702	0.074	8 27.4
L2	1	3.2	16.242	1.037	8 27.3
L2	2	6.5	19.529	0.624	8 27.1
L2	3	9.7	19.755	0.771	8 27.1
L3	1	3.2	1.336	0.028	8 27.5
L3	2	6.5	1.970	0.024	8 27.3
L3	3	9.7	2.815	0.041	8 27.3

- L1... vysoké DTD, vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků, vysoké provozní riziko
- L2... velmi vysoká hodnota TD a DTD, velmi vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků, velmi vysoké provozní riziko, vysoké stárnutí kabelového úseku (Sumitomo) mezi vzdáleným koncem a spojem Jt. 1 vlivem vodních stromečků lze rozeznat pouze tímto způsobem vzhledem k relativně malému podílu celkové délky kabelu (<5%)
- L3... vysoké DTD, vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků, vysoké provozní riziko
- **Dne 30. července 2011 došlo k poruše Jt.1 ve vzdálenosti 1381 m.**

12.4.9 Rozbor spoje



Rez nalezená v obalu odebraném na místě



Vadné místo v L3 u Sumitomo



Voda nalezená v kabelu během odkrývání spoje. Koroze CAS na vnitřní straně kabelové objímky u Sumitomo

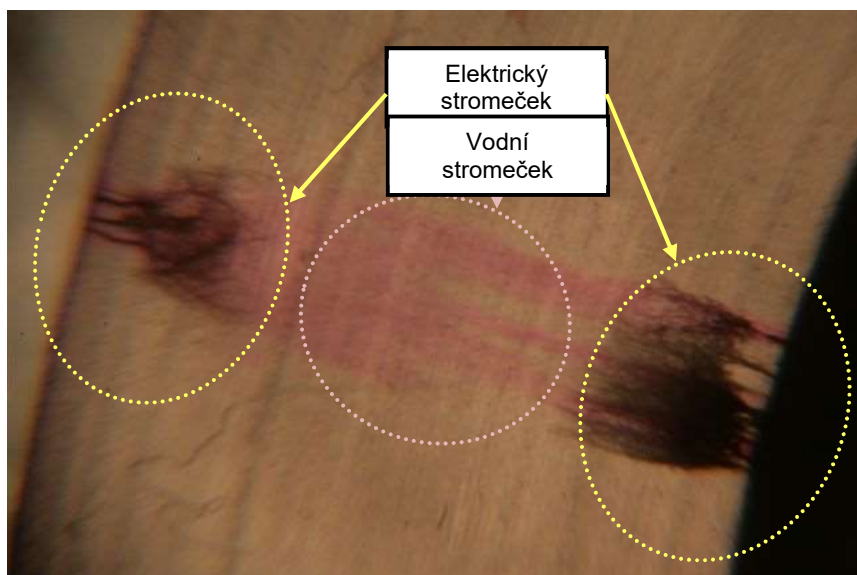


Známky vody zaznamenané v izolačním stínění



Viz další stranu

Předpokládaný vodní stromeček vyvinutý v blízkosti vadného místa



Snímek aktuálního vodního a elektrického stromečku po rozboru (průřez XLPE)

12.4.10 Požadovaný zásah a závěr

Rozborem kabelu bylo zjištěno, že došlo k poruše spoje 1 v důsledku vniknutí vody, která způsobila korozi uvnitř vnitřní objímky. **Porucha byla lokalizována v tělese kabelu** v blízkosti spoje. Dalo se předpokládat, že voda pronikla do spoje a způsobila rozvoj vodního stromečku uvnitř tělesa kabelu v oblasti spoje. Z důvodu prevence dalších poruch kabelu byl vyměněn celý 2. úsek.

Na základě všech výsledků lze konstatovat, že **důvodem, proč výsledky PD neprokázaly zkorodovaný spoj Jt.1, je skutečnost, že vlhké/mokrý podmínky** mají vliv na vývoj aktivity PD. Viditelná koroze může být dále známkou tlumicího účinku impulsů v kabelu.

V situace, kdy je 60 % kabelu tvořeno WTPCS, je navíc třeba posuzovat informace o výsledcích TD s ohledem na VLF zkoušku. WTPC z roku 1989 je třeba považovat za hlavní příčinu vysokého TD. Bylo zjištěno, že toto WTPC z roku 1989 dosáhlo stavu, kdy není nadále možné zaručit bezpečný provoz. Bylo rozhodnuto o revizi předpisu o VLF zkouškách týkající se způsobu aplikace 15minutové VLF zkoušky při 2.0U₀ na kabely XLPE s WTPCS. Při hledání způsobu jak porozumět stavu kabelu během VLF zkoušky a stanovit dobu zkoušky v závislosti na stavu kabelu a chování v průběhu posloupnosti VLF zkoušky by mohla pomoci monitorovaná zkouška odolnosti (MWT).

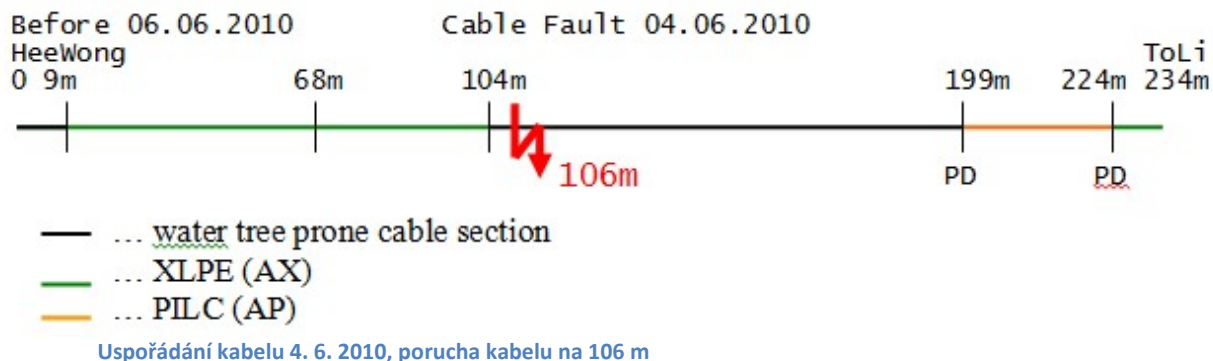
12.5 Případová studie H 5 -391

Klíčové body:

- 234 m, 11 kV, smíšený kabel, 5 spojů, PD v přechodovém spoji
- Stárnutí vlivem vodních stromečků v náchylném úseku kabelu
- Smíšený kabel s menšími PD v přechodových spojích
- Měření TD prokázalo stárnutí vlivem vodních stromečků (DTD, analýza trendu TD, STD)
- Porucha kabelu 5 dnů po VLF zkoušce
- Rozbor úseku WTP XLPE

Naše zn.:	H5 -391
Datum zkoušky:	6. 6. 2010 / 10. 6. 2010
Počasí:	Dobré
Vlhkost:	53 %
Žadatel:	Electricity Company Hongkong
Umístění kabelu:	Ostrov Hongkong
Typ kabelu:	AP 300sqmm / AX/CX 300sqmm
Bližší konec (od):	Hee Wong Terrace 1
Vzdálený konec (k):	To Li Terrace 15
Impulsní rychlost (m/μs)	79.5
Délka kabelu:	234 m
Jmenovité napětí:	11 kV
Rok výroby:	1976, 1986, 1992, 2002
Počet fází:	3 žíly
Stav půdy:	Suchá
Polohy spojů:	9 m, 68 m, 104 m, 199 m a 224 m
Místo zkoušky:	Hee Wong Terrace 1
Prováděné zkoušky: VLF TD ... BAUR Frida TD VLF PD ... BAUR Frida TD + přenosný PD VLF zkouška ... VLF zkušební sada, kosinové obdélníkové vlnění	

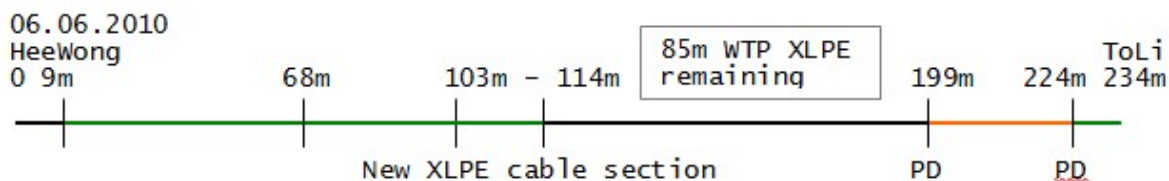
12.5.1 Historie



Porucha kabelu dne 4. 6. 2010

- Porucha tělesa kabelu WTP XLPE (kabelový úsek náchylný ke vzniku vodních stromečků)
- Výměna kabelového úseku včetně vadného místa od 103 m do 114 m. 85 m WTP XLPE zůstává beze změny.

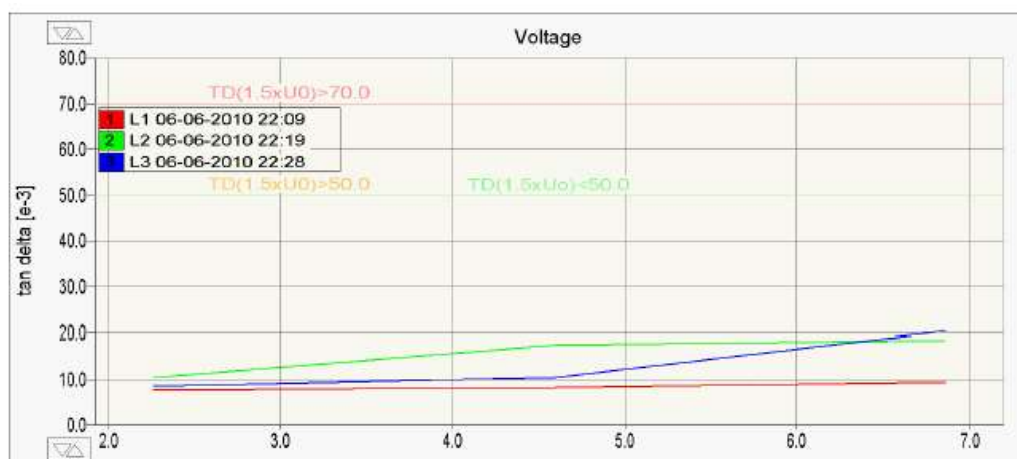
⇒ Diagnostická zkouška dne 6. 6. 2010 po dokončení opravy



Uspořádání kabelu 6. 6. 2010 po výměně 11m kabelového úseku



Diagnostika TD dne 6. 6. 2010



Cable highly service aged

Evaluation

Name of Evaluation	PILC, mixed 1,5U ₀
<i>Criterion</i>	<i>Comment</i>
TD(1.5xU ₀)>70.0	Cable with high operating risk
TD(1.5xU ₀)-(0.5xU ₀)>20.0	Cable with high operating risk
TD(1.5xU ₀)>50.0	Cable highly service aged
TD(1.5xU ₀)-TD(0.5xU ₀)>10.0	Cable highly service aged
TD(1.5xU ₀)<50.0	Cable can be returned to service
TD(1.5xU ₀)-TD(0.5xU ₀)<10.0	Cable can be returned to service

Interpretace výsledku TD ze dne 6. 6. 2010

Celkový stav kabelu Stav vysokého provozního stárnutí

Absolutní hodnoty TD

TD u L1: dobrý stav

TD u L2, L3: zvýšené hodnoty při 1.5U₀

Standardní odchylka TD

STD L1: zvýšené hodnoty známka stárnutí vlivem vodních stromečků

STD L2, L3: výrazně zvýšené hodnoty ... známka výrazného stárnutí vlivem vodních stromečků / vlhkosti ve spoji

DTD (Delta TD)

DTD L1: velmi nízké ... dobrý stav

DTD L2, L3: výrazný nárůst ... výrazné stárnutí vlivem vodních stromečků

Analýza trendu TD

L1 ... stabilní stav

L2, L3 ... rostoucí vývoj trendu závažně stárnutí vlivem vodních stromečků

Jelikož celkové vyhodnocení kabelu zahrnuje smíšený kabel, je třeba přistupovat k hodnocení „stav vysokého provozního stárnutí kabelu“ opatrně. DTD ukazuje na vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků v úsecích XLPE. V kabelovém úseku náchylném k tvorbě vodních stromečků se dá předpokládat vysoké provozní stárnutí.

L1 ... stabilní, považováno za referenční

L2 ... vysoké DTD, velmi vysoké stárnutí vlivem vodních stromečků, aktivita PD s PDIV při U_0

L3 ... vysoké DTD, mírné stárnutí vlivem vodních stromečků, aktivita PD s $PDIV < U_0$

Standardní odchylka – stabilita

@ $0,5U_0$, standardní odchylka 0,028 – 0,055 ... **známky vysokého stárnutí vlivem vodních stromečků**

@ $<0,5U_0 \Rightarrow PDIV$... známky vysokého stárnutí vlivem vodních stromečků + aktivita PD

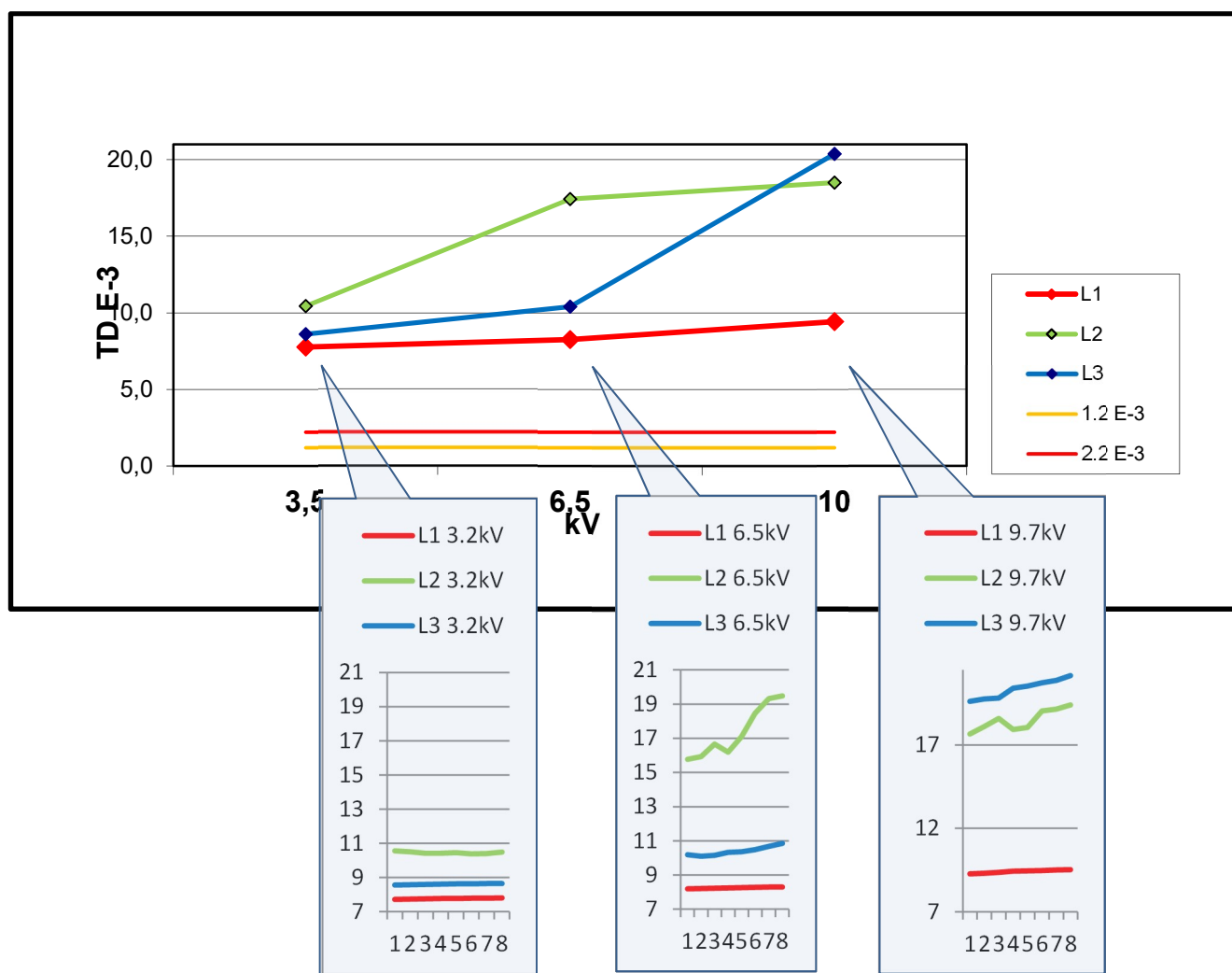
Tabulka průměrných hodnot tan delta (E-3):

Napětí:	2.3kV	4.6kV	6.9kV
L1	7.762	8.255	9.421
L2	10.452	17.429	18.505
L3	8.615	10.400	20.374

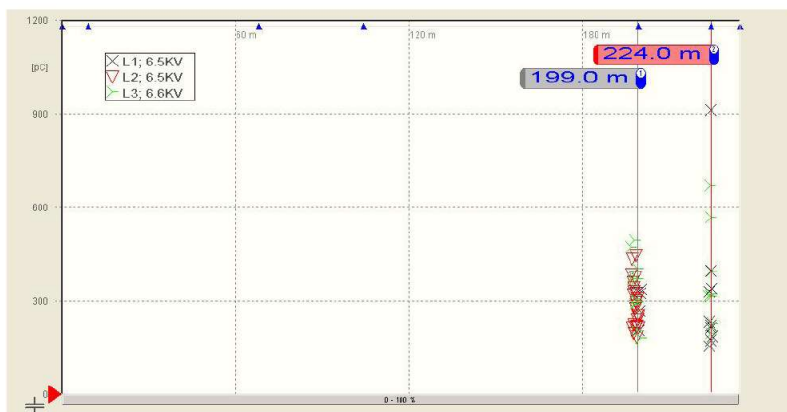
Tabulka standardních odchylek - stability:

Napětí:	2.3kV	4.6kV	6.9kV
L1	0.028	0.037	0.083
L2	0.055	1.413	0.600
L3	0.031	0.248	0.532

Trend stability TD:



12.5.2 Měření částečných výbojů dne 6. 6. 2010



Výsledné PD ze dne 6. 6. 2010

Aktivita PD:

- Aktivita PD v přechodovém spoji na 199 m a 224 m v L1,L2,L3
- Spouštěcí napětí PD 1,5U₀
- do 500 pC / 1000 pC

=> Úroveň PD není závažná!

- Není potřebný žádný okamžitý zásah.
- Neprojevuje se ve výsledku TD.

12.5.3 Přehled diagnostiky TD PD

- Hodnoty TD DTD indikují vysoký nárůst TD v rozsahu napětí
- Znamky **závažného stárnutí vlivem vodních stromečků** v L2 a L3
- Měření PD potvrdilo, že je stárnutí vlivem vodních stromečků příčinou vysoké hodnoty TD
- Hodnotící kritéria, které se vztahují na smíšený kabel, je třeba posuzovat s rozvahou.

12.5.4 Další prováděné zásahy

V souladu s vnitropodnikovými předpisy platnými v době provádění zkoušky bylo před opětovným uvedením do provozu potřeba každý kabel odzkoušet dle IEEE400.2-2004. Bylo stanoveno provedení VLF zkoušky pomocí **kosinového obdélníkového vlnění, 2U₀, 15min.**

15minut VLF zkoušky při 2U₀ se považuje za minimální zkušební dobu dle IEEE400.2-2004. Bylo prokázáno, že je kosinové obdélníkové napětí méně **účinné než sinusové vlnění**, v té době však bylo u dostupných VLF zkušecek jedinou možností.

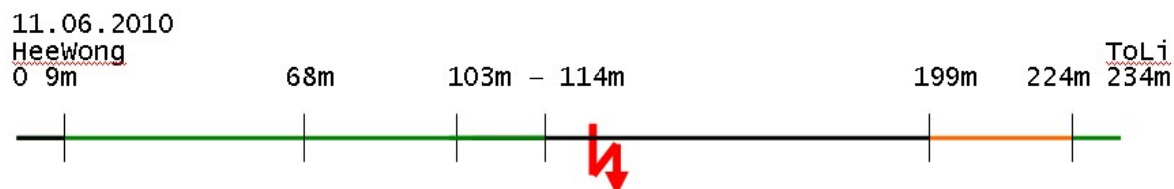
Výsledek zkoušky:

- **Všechny 3 fáze ve VLF zkoušce vyhověly**, navzdory znepokojující hodnotě TD.
- Kabel byl znovu uveden do provozu dne 6. 6. 2010.

12.5.5 Další dění

O 5 dní později: 11. 6. 2010

Porucha kabelu v L2, úsek WTP XLPE na 125 m



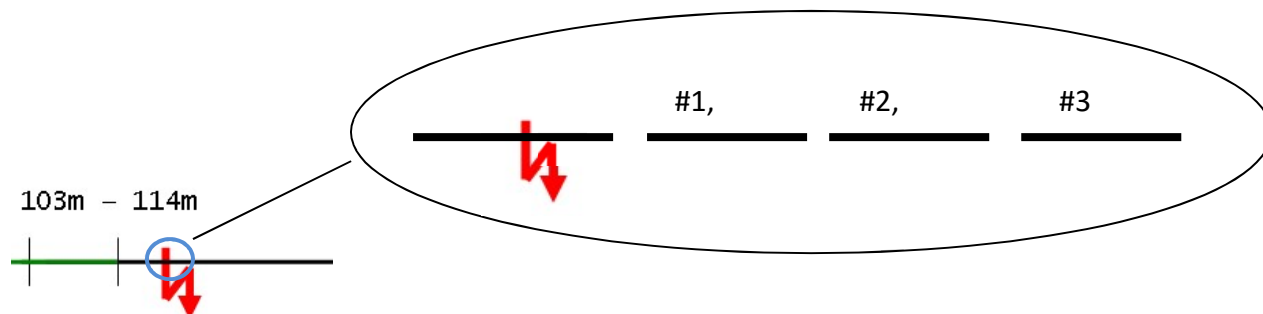
Uspořádání kabelu dne 11. 6. 2010, poloha poruchy na 125 m



Porucha tělesa kabelu, L2 na 125 m

12.5.6 Průzkum

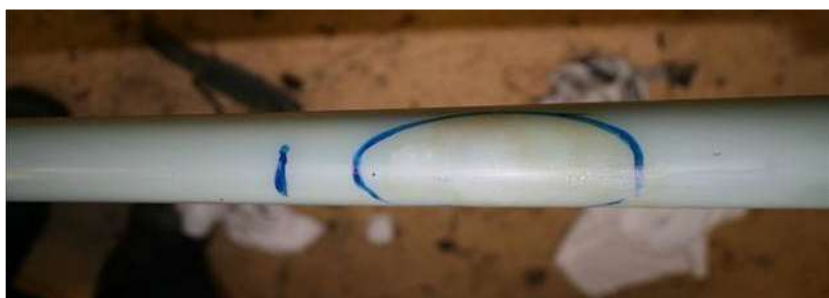
Viditelné vodní stromečky se vyvinuly po celé délce izolace WTP XLPE.



Průzkum kabelového úseku v blízkosti poruchy



Viditelné bílé skvrny po odstranění polovodivé vrstvy, úsek č. 1, 2, 3



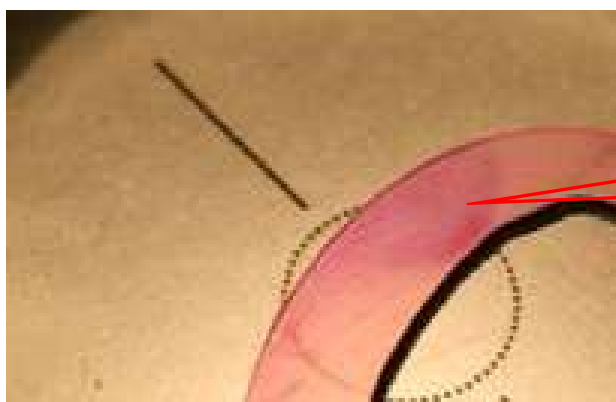
Viditelné bílé skvrny po odstranění polovodivé vrstvy, úsek č. 1



Rozbor úseku č. 3 se skvrnami vodních stromečků



Viditelné bílé skvrny po odstranění polovodivé vrstvy



Rozbor skvrny č. 3, vybarvený / mikroskopický snímek závažného vodního stromečku



12.5.7 Závěr & doporučení

Z této případové studie vyplývá, že se stárnutí vlivem vodních stromečků zřetelně projevuje ve výsledku měření TD.

Výsledné TD je ovlivněno zejména izolací XLPE. Krátký úsek PILC kabelu nevykazuje známky degradace, protože nejsou přítomny žádné aktivity PD. Drobné aktivity PD v přechodových spojkách nemají na výsledné TD podstatný vliv.

Hodnoticí kritéria, která se vztahují na smíšené kabely, je třeba posuzovat s rozvahou.

Zdá se, že 15minutová VLF zkouška při 2U_o není k detekci stárnutí vlivem vodních stromečků dostatečná. Bylo zjištěno, že je kosinové obdélníkové zkušební vlnění slabší. Od té doby se předpis změnil, a je možné používat pouze sinusové zkušební VLF napětí.

Dále bylo zjištěno, že je 15minutová zkušební doba hlavním parametrem, který umožňuje regulaci rizika poruch, ke kterým dochází po VLF zkoušce.

Realizace monitorované zkoušky odolnosti (MWT) pomůže při hledání způsobu, jak porozumět stavu kabelu na konci VLF zkoušky, a při stanovení zkušební doby v závislosti na stavu kabelu a jeho chování v průběhu posloupnosti VLF zkoušky.

12.5.8 Výsledek případové studie

- Detekce stárnutí vlivem vodních stromečků pomocí měření TD
- Detekce aktivity PD v přechodovém spoji
- Prokázání vysoké nejistoty 15minutové VLF zkoušky při 2U_o s kosinovým obdélníkovým napětím
- Monitorovaná zkouška odolnosti, která napomáhá prevenci poruch kabelu po VLF zkoušce

13 Odkazy

13.1 Bibliografie

- [1] M. Baur, „Why should we Test Power Cables with Very Low Frequency?“, ALTAE, Mexico, 2007.
- [2] G. Voigt, „New Studies On Site Diagnosis of MV Power Cables by Partial Discharge and,“ Mezinárodní konference & výstava o řízení aktiv T & D pro elektrické podniky, Kuala Lumpur, 2008.
- [3] Gockenbach, „Grundsätzliche Untersuchungen zum Durchschlagsverhalten kunststoffisolierter Kabel bei Spannungen unterschiedlicher Frequenz,“ BEWAG Symposium, Berlin, 2002.
- [4] S. C. Moh, „Very Low Frequency Testing - It's effectiveness in detecting hidden defects in cables,“ 17. mezinárodní konference o rozvodu elektrické energie CIRED, Barcelona, 2003.
- [5] www.baur.at, Autor, *VLF Testing and Diagnostic Presentation*. [Performance]. BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH, 05-2011.
- [6] Mohaupt, Schlick, „NEW RESULTS IN MEDIUM VOLTAGE CABLE ASSESSMENT USING VERY LOW,“ 17. mezinárodní konference o rozvodu elektrické energie CIRED, Barcelona, 2003.
- [7] IEC60060-3, „High voltage test techniques,“ Ženeva, Švýcarsko, 2001.
- [8] IEC60502, „International Standard, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1kV up to 30kV,“ IEC, Ženeva, Švýcarsko, 2014.
- [9] Cenelec HD 620 (S1), VDE 0267 HD 620 (S1), „Recommended tests after installation,“ 1996.
- [10] IEEE400.2-2013, „IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)“, IEEE Power and Energy Society, IEEE Standards Association, New York, 2013.
- [11] IEEE400.2-2004, „IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)“, IEEE Power Engineering Society, 2004.
- [12] IEEE400.2-2001, „IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems,“ IEEE Power Engineering Society, 2001.
- [13] Fletcher, Hampton, Hernandez, Hesse, Pearman, Perker, Wall, Zenger, „First Practical Utility Implementations of Monitored Withstand Diagnostics in the USA,“ 8. mezinárodní konference o izolovaných silových kabelech, JiCable 2011, France, 2011.
- [14] Bolarin Oyegoke, Petri Hyvönen, Martti Aro, „Dielectric Response Measurement as Diagnostic Tool for Power Cable Systems,“ Espoo, Finsko, 2001.
- [15] Quresh_et_al, „Diagnostic Techniques for Assessing Water Treeing Degradation of High Voltage XLPE Cables,“ King Saud University, Rijád, Saudská Arábie, 2010.
- [16] Kalkner, Rethmeier, Pepper, „PD-Testing of Service Aged Joints in XLPE-insulated Medium Voltage Cables at Test Voltages with Variable Shape and Frequency,“ Mezinárodní sympozium o vysokonapěťové technice, Nizozemsko, 2003.
- [17] HERNANDEZ, HAMPTON, HARLEY, HARTLEIN, „PRACTICAL ISSUES REGARDING THE USE OF DIELECTRIC,“ Jicable, Paříž, 2007.
- [18] IEEE400.2/D12-2012, „Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)“, New York, 2012.
- [19] BAUR, „TanDelta Diagnostic Guidelines V4,“ 03-2013.

- [20] E. - G. Toman, „Plant Support Engineering: Aging Management Program Guidance for Medium Voltage Cable Systems for Nuclear Power Plants,“ Kalifornie, 2010.
- [21] Perkel, Hernandez, Hampton, Drapeau, Densley, Del Valle, „Challenges Associated with the Interpretation of Dielectric Loss data from Power Cable System measurements,“ 8. mezinárodní konference o izolovaných silových kabelech C.4.5, Versailles, Francie, 2011.
- [22] NEETRAC, „Diagnostic Testing of Underground Cable Systems,“ Neetrac, DEO Award No. DE-FC02-04CH11237, 2010.
- [23] RWE-Eurotest, „Comparison of available measuring methods,“ ew - das magazin fuer die energie wirtschaft, Německo, 2007.
- [24] Kuschel, Kalkner, „Prüfmethoden für Isolierungen mit inneren Grenzflächen – am Beispiel der Diagnostik PE/VPE-isolierter Mittelspannungskabel,“ ETG-Fachtagung, Bad Naumheim, 1999.
- [25] Kuschel, Plath, Stepputat, Kalkner, „Diagnostic Techniques for Service-aged XLPE -Insulated Medium Voltage Cables,“ REE, Berlin, Německo, 1996.
- [26] PowerAssetsHoldings, „Interim Report 2012,“ Power Assets Holdings. Ltd., Hongkong, 2012.
- [27] Kim et al, „VLF Tan-Delta Criteria for XLPE Insulated Power Cables in Kepco,“ Jicable, Paříž, 2011.
- [28] Kim_et_al, „A Study on Three Dimensional Assessment of the Aging Condition of Polymeric Medium Voltage Cables Applying VLF tandelta Diagnostic,“ Zpráva IEEE o dielektrických materiálech a elektrické izolaci, 2014.
- [29] Whittaker et al., „Benefits of a Combined Diagnostic Method, using VLF Partial Discharge and Dissipation Factor Measurement on Medium Voltage Distribution Cables.,“ Zápis z konference CMD2010, 2010.

13.2 Přehled obrázků a tabulek

Obr. 1: Výdržné napětí v závislosti na frekvenci	7
Obr. 2: Prostorové náboje v dutinkách XLPE během stejnosměrné zkoušky [5]	8
Obr. 3: Výňatek z normy IEC60060-3 určující maximální hodnotu zkreslení $\pm 5\%$ [7]	12
Obr. 4: Výňatek z normy IEC 60502-2, strany 12, [8].....	13
Obr. 5: Výňatek z CENELEC HD 620 (S1) nebo VDE 0267 HD 620 S1 (1996) [9]	15
Obr. 6: Definice účelu IEEE400.2-2013, [10, p. 2]	16
Obr. 7: Tabulka 3 dle IEEE400.2-2013, [10, p. 11]	18
Obr. 8: Výňatek z IEEE 400.2-2001, 9.3 Metoda vyhodnocení TD [12, p. 23]	18
Obr. 9: Výňatek z IEEE 400.2-2013, 5.4 VLF-TD, VLF-DTD, VLF-TDTS se sinusovým tvarem VLF vlnění [10, p. 15]	19
Obr. 10: Plnoprávní členové výzkumné organizace NEETRAC [13]	21
Obr. 11: Jednoduchá zkouška VLF dle IEEE400.2 [10]	21
Obr. 12: Diagram MWT (černý) s volitelným diagnostickým měřením (červeným) [13]	23
Obr. 13: Srovnání diagnostických vlastností pro krokové a výdržné části MWT [10]	23
Obr. 14: Kritéria pro kabely PILC [13]	23
Obr. 15: Pokyny pro zkušební dobu a posouzení stavu MWT [13].....	24
Obr. 16: Tan Delta MWT u XLPE kabelu zestárlého v provozu [13].....	24
Obr. 17: Zobrazení fáze stoupání MWT	26
Obr. 18: Zobrazení fáze výdrže MWT /	26

Obr. 19: Ref. 8438CM, stoupání, XLPE, stabilní stav.....	27
Obr. 20: Ref. 8438CM, MWT/ fáze výdrže, XLPE, doba stability	27
Obr. 21: Ref. 12518CM, MWT/ fáze výdrže, XLPE s klesajícím t Δ TD	27
Obr. 22: Ref. 12518CM, stoupání, klesající trend	27
Obr. 23: Ref. 3730-31, stoupání, vodiví cesty & vlhkost v L1,	28
Obr. 24: Ref. 3730-31, MWT / fáze výdrže, průraz ve spoji po 4 minutách	28
Obr. 25: BAUR VLF TD, série: PHG80 TD (57 kVrms); VIOLA TD (42,5 kVrms); FRIDA TD (24 kVrms)	32
Obr. 26: Počáteční napětí PD u kabelu XLPE 110 kV (9,10), [1].....	33
Obr. 27: Úrovně PD se sinusovým tvarem vlnění 0,1 Hz, silová frekvence 50 Hz a kosinové- obdélníkové vlnění 0,1 Hz [16]	33
Obr. 28: Spouštěcí napětí částečných výbojů ve srovnání s VN zdrojem [16].....	33
Obr. 29: Zjednodušený diagram a jednou křivkou, používaný k popisu DPF u jediné frekvence [12]	34
Obr. 30: Výňatek z IEEE 400.2-2001, obr. 6 – Vektorový diagram pro dielektrický materiál s vysokou ztrátou [12]	34
Obr. 31: Ztrátový činitel nových SN kabelů s polymerovou izolací při 0,1 Hz / 50 Hz, (H: Homopolymer, C: Kopolymer, WTR: zpomalovač vodních stromečků) [Kus, 1995] Obr. 4 [2].....	34
Obr. 32: Spektroskopie ve frekvenční oblasti u PE a PVC kabelů zestaralých v provozu [2].....	35
Obr. 33: Srovnání nelinearity ve frekvenční oblasti XLPE kabelu vážně zestárlého vodními stromečky [Kus, 1998] [2]	35
Obr. 34: Nelinearita DPF u XLPE kabelů zestaralých v provozu, při 0,1 Hz a 50 Hz, vykopáno 2008 [2]	35
Obr. 35: Vodní stromeček s vyvíjející se úrovní elektrického stromečku, aktivita PD.....	36
Obr. 36: Vodní stromeček, kanálkovitá struktura.....	36
Obr. 37: Ilustrace „motýlkovitých“ a „odvětraných“ stromečků.....	36
Obr. 38: Vodní stromeček, kanálkovitá struktura.....	36
Obr. 39: Snímek aktuálního vodního a elektrického stromečku po rozřezání kabelu (průřez XLPE)	37
Obr. 40: Nedostatečné odplynění kabelu ve výrobě, po 14 měsících v provozu	37
Obr. 41: Stará izolace XLPE, dutinky v kabelu XLPE, 115 kV	37
Obr. 42: Kumulativní distribuční funkce TanDelta provozních údajů pro měření kabelu >10360 m [17]	38
Obr. 43: Kabelový úsek s nerovnoměrnou degradací vlivem vodních stromečků	39
Obr. 44: Hodnotící kritéria upravená na 0,5 U ₀ až 1,5 U ₀ [17]	40
Obr. 45: Vyhodnocení výsledků TD, kritéria průměrné hodnoty TD [19].....	41
Obr. 46: Vyhodnocení výsledků TD, DTD [19].....	41
Obr. 47: Vyhodnocení výsledků TD, srovnání fází [19]	41
Obr. 48: Výklad trendu stability TD [19]	43
Obr. 49: Vzorec trendu TD - XLPE v dobrém stavu [19].....	46
Obr. 50: Vzorec trendu TD, XLPE s vysokým stárnutím s vodními stromečky [19]	47
Obr. 51: Vzorec trendu TD, XLPE s aktivitou PD ve spojích [19].....	48
Obr. 52: Vzorec trendu TD, XLPE se spoji s mírným průnikem vody, vodivými cestami [19].....	49
Obr. 53: Vzorec trendu TD, PILC bez aktivit PD [19]	50
Obr. 54: Vzorec trendu TD, PILC kabel s aktivitami PD [19]	51
Obr. 55: Vzorec trendu TD, PILC kabel s vodivými cestami ve spoji, mírné aktivity PD [19].....	52
Obr. 56: Vzorec trendu TD, kabel PILC, vysoké provozní stárnutí, mírné aktivity PD [19]	53
Obr. 57: Ref. 2215CM, příklad - L2, L3: stabilní stav, L1: průnik vody do spoje	55
Obr. 58: Ref. 8444CM, příklad - L2, L3: vodivé cesty ve spoji, L1: stabilní stav.....	55

Obr. 59: Srovnání TD stejného XLPE kabelu po 1 roce; viditelné účinky stárnutí	56
Obr. 60: Schéma zapojení programovatelného vysokonapěťového generátoru (PHG) pro TD s použitím ochranného kroužku	57
Obr. 61: Metoda připojení ochranného kroužku s VSE-boxem	57
Obr. 62: Přímé srovnání hodnoty TD při použití ochranného kroužku a bez použití ochranného kroužku.....	58
Obr. 63: Uspořádání zapojení s ochranným kroužkem a korónovými kryty (vlevo), bez ochranného kroužku (vpravo); relativní vlhkost 80 %, 30 °C	58
Obr. 64: Uspořádání zapojení s ochranným kroužkem a korónovými kryty, VSE- box, připojení přístroje Frida TD	58
Obr. 65: Některé možné případy kabelových úseků s nerovnoměrnou degradací vodními stromečky [17]	59
Obr. 66: Hystereze ztrátového činitele TD při nárůstu a útlumu VLF napětí [1]	63
Obr. 67: Tabulka 5-1 – Hodnotící kritéria EPRI TanDelta pro EPR kabely z butylové pryže [20]	67
Obr. 68: Tabulka 5-2 – Hodnotící kritéria EPRI TanDelta pro kabely z černého EPR [20]	67
Obr. 69: Tabulka 5-3 - Hodnotící kritéria EPRI TanDelta pro kabely z růžového EPR [20]	68
Obr. 70: Tabulka 5-4 - Hodnotící kritéria EPRI Tan Delta pro kabely z hnědého EPR [20]	68
Obr. 71: Rozložení TD Tip Up u plněných, PILC a PE kabelů [21]	69
Obr. 72: BAUR PHG 70/80 TD PD	70
Obr. 73: BAUR Frida TD + PD TaD 60	70
Obr. 74: PD Lokalizační graf kabelu XLPE se 3 spoji s aktivitou PD.....	70
Obr. 76: Zkušební uspořádání systému BAUR VLF PD	71
Obr. 75 PD: Schéma přenosného zapojení	71
Obr. 77: Grafická posloupnost lokalizace impulsů PD	72
Obr. 78: Typický příklad rozptýlené aktivity PD na úseku PILC.....	73
Obr. 79: Typický příklad kabelu XLPE s několika spoji vykazujícími PD aktivitu	73
Obr. 81: Snímek softwaru BAUR PD – kalibrační graf.....	74
Obr. 82: Kalibrační graf kabelu délky 295 m bez spojů	74
Obr. 80: Vazební prvek PD CU60 s kalibrátorem	74
Obr. 83: Kalibrační graf nového kabelu XLPE se 6 stejnými úseky a 5 spoji	75
Obr. 84: Tabulka 11 dle, Interpretace grafu TDR k identifikaci stavu kabelu [22]	75
Obr. 85: Kalibrační graf s identifikací několika spojů, např. 491,5 m	76
Obr. 86: Kalibrační graf s identifikací spoje s průnikem vody ve vzdálenosti 260 m.....	76
Obr. 87: Kalibrační graf s identifikací spoje s průnikem vody ve vzdálenosti 656,5 m.....	76
Obr. 88: Matice všech měření provedených u modelových poruch spojů (barevně podbarvená pole označují detekovanou a lokalizovanou aktivitu výbojů) [23]	77
Obr. 89: Přenosný terénní detektor PD s lokalizací PD (přenosný BAUR PD).....	78
Obr. 90: Graf PD kabelu XLPE s aktivitou PD soustředěnou ve 3 spojích	80
Obr. 91: Graf PD smíšeného kabelu s rozptýlenou aktivitou PD v úseku PILC	81
Obr. 92: Přehled diagnostických technik [24].....	82
Obr. 93: Základní měřicí obvod pro analýzu IRC, KDA1	83
Obr. 94: (Obr. 5 dle [24]): Princip vybrané diagnostické metody založené na časovém rozmezí. 83	
Obr. 95: (Obr. 7 dle [24]): Depolarizační proud u různých kabelů PE/VPE kabelů poškozených vodními stromečky.....	83
Obr. 96: Blokové schéma metody zpětného napětí [14].....	84
Obr. 97: Obrázek 6 dle [24], Porovnání zpětného napětí vypočteného z depolarizačního proudu a prakticky naměřeného zpětného napětí	84
Obr. 98: Obrázek 9 dle [24], Špičkové zpětné napětí pro rozdílně zestárlé kabely PE/VPE.....	84
Obr. 99: Obr. 10 dle [22] Blokové schéma systému IDA 200.....	85

Obr. 100: Měření Tan Delta [14]	86
Obr. 101: Příklad hodnot TD u nového kabelu XLPE, nízká standardní odchylka, odchylka L1 viditelná pouze v citlivém měřicím rozsahu	87
Obr. 102: Aktivita PD v L1, spouštěcí napětí 19kV, 450pC při 1,7U ₀ , vzdálená koncovka	87
Obr. 103: Výsledek TD z 30. 12. 2008, vysoké provozní riziko, bez vlivu vody	88
Obr. 104: Výsledek TD z 10. 1. 2008, vysoké provozní riziko, klesající DTD, vliv vody, která vnikla do spoje	88
Obr. 105: Profil společnosti HK Electric k 10/2010 [26]	96
Obr. 106: Koncepce zkoušení ve společnosti HK Electric z roku 2012	97
Obr. 107: Statistický přehled kategorií kabelů HKE	98
Obr. 108: Používané systémy BAUR VLF TD / PD	98
Obr. 109: Zkušenosti s diagnostikou v KEPCO	99
Obr. 110: Výňatek z nedávné zprávy KEPCO 2013 [27] [28]	100
Obr. 111: Výhody kombinované diagnostické metody CMD 2010 [29]	101
Obr. 112: Výsledné PD ve fázi 1, 13. 7. 2011	132
Obr. 113: Výsledné PD ve fázi 2, 13. 7. 2011	132
Obr. 114: Výsledné PD ve fázi 3, 13. 7. 2011	132
Obr. 115: Výsledné PD ve 3 fázích, 13. 7. 2011	132
Tabulka 1: Přehled norem o zkoušení a diagnostice SN kabelů	11
Tabulka 2: Přehled norem o zkoušení a diagnostice VN a ZVN kabelů	12
Tabulka 3: Tabulka 2, str. 9, normy IEEE400.2,2013, [10, p. 9] Užitečnost zkušebních a diagnostických metod VLF TD PD	20
Tabulka 4: Praktická realizace zkušebních napětí s ohledem na zvolený zkušební přístroj Viola TD PD	29
Tabulka 5: Interpretace stability TD, vhodná jako všeobecné vodítko [19]	42
Tabulka 6: Přehled vzorců vývoje TD	44
Tabulka 7: IEEE400.2-2013 pro kabely XLPE 1.0 - 2.0 U ₀ [10, p. 48]	60
Tabulka 8: IEEE400.2-2013, mezinárodní hodnoty pro kabely PILC (1.0U ₀ až 2.0U ₀) [10, p. 49] .	61
Tabulka 9: Tabulka I.1 dle IEEE400.2-2013 upravená dle zkušeností společnosti BAUR pro 0.5U ₀ až 1.5U ₀ , kabely XLPE	61
Tabulka 10: Tabulka I.4 dle IEEE400.2-2013 upravená dle zkušeností společnosti BAUR pro 0.5U ₀ až 1.5U ₀ , PILC & smíšené kabely	62
Tabulka 11: Tabulka I1/I2 IEEE400.2-2013,[10, pp. 48-49], ANNEX I, Hodnoticí kritéria mimo Severní Ameriku	64
Tabulka 12: Tabulka I3/ I4, IEEE400.2-2013, [10, pp. 48-49], ANNEX I, Hodnoticí kritéria mimo Severní Ameriku	65
Tabulka 13, Tabulka 4, IEEE400.2-2013[10, p. 19] – Hodnoticí kritéria pro provozně zestárlou izolaci na bázi PE	65
Tabulka 14, Tabulka 5, IEEE400.2-2013 [10, p. 20] - Hodnoticí kritéria pro provozně zestárlé plněné kabely (EPR)	66
Tabulka 15: Tabulka 7, str. 21, IEEE400.2-2013 [10, p. 21] - Hodnoticí kritéria pro provozně zestárlé PILC kabely	69



Autor:

Tobias Neier se narodil v Rakousku v roce 1981. Získal titul elektrotechnického inženýra v Rakousku a MBA v Hongkongu. Díky znalostem, které od roku 2002 získal ve společnosti BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH jako lektor školicích seminářů v technických ústavech a energetických podnicích, nabyt celosvětových zkušeností ve specifických oblastech zkoušení kabelů a diagnostické techniky, včetně lokalizace poruch kabelů.

Poradenská činnost v rámci strategického rozvoje v mnoha energetických podnicích, zejména v Asii, mu umožnila získat rozsáhlé zkušenosti v oblasti aplikovaných zkoušek a diagnostiky podzemních kabelových sítí.

Během nejzajímavějších let, kdy procestoval více než 30 zemí v Evropě, severní Africe a v celé Asii, nabyt zkušeností v mezinárodním rozsahu, včetně podpůrných znalostí aplikačních teorií a technologií.

t.neier@baur.at