



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PORUCHY A ZÁVADY KABELOVÝCH SOUBORŮ

MV CABLES FAILURES AND MALFUNCTIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Holuša

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Martin Holuša

ID: 209383

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Poruchy a závady kabelových souborů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Komponenty kabelových souborů distribučních sítí
2. Poruchy a závady kabelových souborů s definicí a rozbohem jejich vzniku
3. Možnosti detekce/diagnostiky/měření závadových stavů (PD, vizuální prohlídky, měření jiných elektrických a neelektrických veličin) komponentů kabelových souborů
4. Výdržné zkoušky a diagnostika aplikovatelná na testované komponenty kabelových souborů v laboratorních podmínkách; měření komponentů v laboratoři VVN
5. Měření výbojové činnosti a jiných projevů závadových stavů testovaných komponentů kabelových souborů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je definovat kabelové soubory a popsat závady a poruchy, které se na kabelových souborech mohou objevit. V teoretické části práce je kabelový soubor rozdělen na jednotlivé části, které jsou blíže popsány. Uvedeny jsou také diagnostické metody, které je možné použít k detekci jednotlivých závad a k sledování jejich stavu na jednotlivých částech kabelového souboru. V praktické části se práce zaměřuje na test jednoho komponentu kabelového souboru pomocí měření částečných výbojů a sledování jeho povrchové teploty.

Klíčová slova

kabelový soubor, závady a poruchy, online diagnostika, on-site diagnostika, částečné výboje, PD, měření výbojové činnosti

Abstract

The aim of this master's thesis is to define cable and his accessories and describe defects and fault which can appear on the cable and his accessories. The thesis also divides the cable and his accessories into individual parts, which are describe in more detail. Diagnostic methods that can be used to detect individual faults and monitor their status on individual parts of the cable and cable accessories are also listed. The thesis's practical part focuses on the test of one component of the cable assembly using partial discharge measurement and monitoring its surface temperature.

Keywords

cable accessories, defects and faults, online diagnostics, on-site diagnostics, partial discharge, PD, measurement of discharge activity

Bibliografická citace

HOLUŠA, Martin. *Poruchy a závady kabelových souborů* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151312>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Michal Krbal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Martin Holuša
VUT ID studenta:	209383
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Poruchy a závady kabelových souborů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 21. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Krbalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 21. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. KABELOVÉ SÍTĚ JAKO SOUČÁST DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	13
1.1 NAPĚŤOVÉ HLADINY V DS	13
1.1.1 <i>Napěťová hladina 0,4 kV.....</i>	<i>13</i>
1.1.2 <i>Napěťová hladina 10/22/35 kV</i>	<i>14</i>
1.1.3 <i>Napěťová hladina 110 kV.....</i>	<i>14</i>
1.2 ZPŮSOB PROVOZOVÁNÍ	15
1.2.1 <i>Hladina VVN.....</i>	<i>15</i>
1.2.2 <i>Hladina VN.....</i>	<i>15</i>
1.2.3 <i>Hladina NN.....</i>	<i>16</i>
1.3 VÝHODY A NEVÝHODY KABELOVÝCH SÍTÍ	16
1.3.1 <i>Nevýhody.....</i>	<i>16</i>
1.3.2 <i>Výhody</i>	<i>17</i>
2. KABELOVÝ SOUBOR.....	18
2.1 KABELY	18
2.1.1 <i>Kabely s papírovou izolací a kovovým pláštěm</i>	<i>18</i>
2.1.2 <i>Kabely s pryžovou a plastovou izolací</i>	<i>19</i>
2.1.3 <i>Kabely s izolací ze zesíťovaného polyetylénu.....</i>	<i>20</i>
2.2 ŘÍZENÍ ELEKTRICKÉHO POLE	21
2.2.1 <i>Polovodivé vrstvy.....</i>	<i>22</i>
2.2.2 <i>Řízení el. pole nelineárním materiálem</i>	<i>22</i>
2.2.3 <i>Řízení el. pole geometrickým tvarem řídicí vrstvy</i>	<i>23</i>
2.3 KABELOVÉ KONCOVKY	23
2.3.1 <i>Koncovky pro kabely s papírovou izolací</i>	<i>24</i>
2.3.2 <i>Teplem smrštitelné koncovky</i>	<i>24</i>
2.3.3 <i>Koncovky smrštitelné za studena</i>	<i>25</i>
2.3.4 <i>Násuvné koncovky za studena</i>	<i>26</i>
2.4 KABELOVÉ SPOJKY A OKA	26
2.4.1 <i>Kabelová spojka.....</i>	<i>26</i>
2.4.2 <i>Kabelové oko.....</i>	<i>27</i>
2.5 PŘÍPOJNICOVÉ SYSTÉMY K ROZVADĚČŮM	28
2.5.1 <i>Kabelový konektor pro vnější kužel.....</i>	<i>28</i>
2.5.2 <i>Konektory na vnitřní kužel přístroje</i>	<i>29</i>
2.6 UTĚŠŇOVACÍ SYSTÉMY, IZOLAČNÍ TRUBICE, OPRAVNÉ PÁSKY A MANŽETY.....	30
2.6.1 <i>Utěšňovací systémy</i>	<i>30</i>
2.6.2 <i>Izolační trubice, opravné pásky a manžety</i>	<i>30</i>
3. PORUCHY A ZÁVADY KABELOVÝCH SOUBORŮ	31
3.1 TYPICKÉ ZÁVADY NA KABELOVÉM SOUBORU.....	31
3.1.1 <i>Přirozené stárnutí izolace</i>	<i>32</i>
3.1.2 <i>Tepelné namáhání.....</i>	<i>32</i>

3.1.3	<i>Chemická koroze</i>	34
3.1.4	<i>Elektrické stárnutí</i>	34
3.1.5	<i>Poškození způsobené různými typy dopadajícího záření</i>	38
3.1.6	<i>Mechanické namáhání a poškození</i>	38
3.1.7	<i>Stárnutí izolace při současném působení více druhů namáhání</i>	39
3.2	PORUCHY KABELOVÉHO SOUBORU	40
3.2.1	<i>Průraz izolace prvku souboru</i>	40
3.2.2	<i>Nízkoohmové poruchy</i>	40
3.2.3	<i>Vysokoohmové poruchy</i>	41
4.	DIAGNOSTIKA ZÁVADOVÝCH STAVŮ NA KABELOVÉM SOUBORU	42
4.1	ON-LINE DIAGNOSTICKÉ METODY	43
4.1.1	<i>Měření teploty</i>	43
4.1.2	<i>Použití Rogowského cívky</i>	43
4.1.3	<i>Částečné výboje</i>	44
4.2	ON-SITE DIAGNOSTICKÉ METODY	45
4.2.1	<i>Výdržné napětí</i>	46
4.2.2	<i>Dielektrická odezva</i>	47
4.2.3	<i>Částeční výboje</i>	50
4.2.4	<i>Reflektometrie v časové oblasti</i>	51
4.2.5	<i>Zkoušky používané v ČR</i>	52
5.	PRAKTICKÁ ČÁST	53
5.1	TESTOVANÝ OBJEKT	53
5.2	VÝDRŽNÁ ZKOUŠKA STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM	55
5.3	MĚŘENÍ PD	55
5.4	PROVEDENÍ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK	56
5.4.1	<i>První krok - měření bez kabelové koncovky</i>	56
5.4.2	<i>Druhý krok - měření s nepoškozenou kabelovou koncovkou</i>	56
5.4.3	<i>Třetí krok - měření s poškozenou kabelovou koncovkou</i>	57
6.	ANALÝZA VÝSLEDKŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI	58
6.1	INICIAČNÍ NAPĚTÍ PD A JEHO POČÁTEČNÍ NÁBOJ	58
6.2	NAPĚŤOVÁ HLADINA 13 KV A 30 KV	58
6.2.1	<i>Nepoškozená kabelová koncovka (referenční měření)</i>	58
6.2.2	<i>Zapojení bez kabelové koncovky (první krok měření)</i>	60
6.2.3	<i>Poškozená kabelová koncovka (třetí krok měření)</i>	61
6.3	NAPĚŤOVÁ HLADINA 50 KV	63
6.3.1	<i>Nepoškozená kabelová koncovka (referenční měření)</i>	63
6.3.2	<i>Poškozená kabelová koncovka (třetí krok měření)</i>	65
6.4	NAPĚŤOVÁ HLADINA 80 KV	66
6.4.1	<i>Nepoškozená kabelová koncovka (referenční měření)</i>	66
6.4.2	<i>Poškozená kabelová koncovka (třetí krok měření)</i>	68
6.5	NAPĚŤOVÁ HLADINA 90 KV A 100 KV	69
6.5.1	<i>Nepoškozená kabelová koncovka (referenční měření)</i>	69
6.6	VYHODNOCENÍ STAVU KABELOVÉ KONCOVKY	71
7.	ZÁVĚR	73
	LITERATURA	75

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	81
SEZNAM PŘÍLOH.....	84

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Schéma závěsného kabelu typ 1 [3]	13
Obrázek 1-2 Schéma závěsného kabelu typ 2 [3]	14
Obrázek 1-3 Topologie distribučních sítí [9]	16
Obrázek 2-1 Kabel PILC [14]	19
Obrázek 2-2 Kabel N2XS(F)2Y [19]	20
Obrázek 2-3 Kabel s XLPE izolací [23]	21
Obrázek 2-4 Elektrické pole na konci kabelu bez jeho řízení [26]	22
Obrázek 2-5 Řízení el. pole pomocí nelineárního materiálu řídicí vrstvy [26]	23
Obrázek 2-6 Elektrické pole na konci kabelu řízené geometrickým tvarem řídicí vrstvy [26]	23
Obrázek 2-7 Trojžilová a jednožilová dolévací koncovka pro PILC kabely [12]	24
Obrázek 2-8 Typy kabelových konektorů: a) Úhlový konektor b) Přímý konektor c) Odbočný konektor d) Přípojný konektor e) Konektor se svodičem přepětí [28]	29
Obrázek 5-1 Testovací pracoviště	54
Obrázek 5-2 Úmyslné poškození kabelové koncovky	54
Obrázek 6-1 Závislost velikosti náboje PD na čase u referenčního měření na napěťové hladině 30 kV	59
Obrázek 6-2 Povrchová teplota referenční kabelové koncovky při 30 kV a) na začátku měření b) na konci měření	60
Obrázek 6-3 Závislost velikosti náboje PD na čase u testovaného objektu bez kabelové koncovky	61
Obrázek 6-4 Závislost velikosti náboje PD na čase u poškozené kabelové koncovky	62
Obrázek 6-5 Povrchová teplota poškozené kabelové koncovky při 30 kV a) na začátku měření b) na konci měření	62
Obrázek 6-6 Časová závislost velikosti náboje PD nepoškozené kabelové koncovky při 50 kV	64
Obrázek 6-7 Povrchová teplota referenční kabelové koncovky při 50 kV a) na začátku měření b) na konci měření	64
Obrázek 6-8 Zvýšení napěťové hladiny na 50 kV u poškozené kabelové koncovky	65
Obrázek 6-9 Povrchová teplota poškozené kabelové koncovky na konci měření na napěťové hladině 50 kV	66
Obrázek 6-10 Závislost hodnoty náboje PD na čase u nepoškozené kabelové koncovky na hladině 80 kV	67
Obrázek 6-11 Povrchová teplota referenční kabelové koncovky při 80 kV a) na začátku měření b) nejvyšší naměřená	67
Obrázek 6-12 Časová závislost velikosti náboje PD u poškozené kabelové koncovky na napěťové hladině 80 kV	68
Obrázek 6-13 Povrchová teplota nejteplejšího místa po průrazu poškozené kabelové koncovky	69
Obrázek 6-14 Závislost hodnoty náboje PD na čase u nepoškozené kabelové koncovky na hladině 90 kV a 100 kV	70
Obrázek 6-15 Povrchová teplota referenční kabelové koncovky při 100 kV a) v průběhu měření b) po ukončení měření	70
Obrázek 6-16 Rozříznutá referenční kabelová koncovka	71
Obrázek 6-17 Rozříznutá poškozená kabelová koncovka	72
Obrázek 6-18 Zuhelnatělý zbytek řídicí vrstvy po průchodu průrazného výboje	72

SEZNAM TABULEK

Tabulka 4-1 Provozní zkoušky pro kabel s XLPE izolací převzato z [64]	52
---	----

ÚVOD

Z důvodu čím dál většího množství užívání elektrických spotřebičů roste důležitost přenosu elektrické energie z elektráren k jednotlivým odběratelům. V oblastech s vysokou hustotou obyvatel je problém se stavbou venkovních vedení, a proto se pro přenášení potřebné elektrické energie používají kabelová vedení.

Kabelový soubor je obecné označení pro všechny prvky, které obsahuje kabelové vedení. Kabelové vedení je označení pro vodivé spojení dvou míst, které je, jak název napovídá, vytvořeno pomocí kabelu, a které je (s výjimkou napět'ové hladiny nízkého napětí, kdy může být i kabelové vedení zavěšeno na elektrických sloupech) vedeno v zemi. Je proto vystaveno jiným podmínkám, než jaké jsou u tradičního venkovního vedení.

Tyto podmínky mohou mít škodlivé účinky na materiály, ze kterých jsou vyrobeny jednotlivé části kabelového souboru. Je proto nutné tyto účinky definovat a pochopit, aby bylo možné správně vyhodnocovat jejich dopady na délku doby života prvků kabelového souboru. Protože platí, že čím více jsou prvky kabelového vedení blíže ke konci své doby životnosti, tím více se na nich projevují závady.

Z důvodu čím dál větší kabelizace vedení se tyto problémy dostávají do popředí a je nutné pravidelně zjišťovat jejich stav. To se provádí pomocí diagnostických metod, na které je zaměřena tato práce.

Diplomová práce je rozdělena do 2 hlavních částí. První část je zaměřena na teoretické řešení problému (první čtyři kapitoly) a druhá část je praktická (kapitoly 5 a 6).

První kapitola je věnována použití kabelového souboru v distribuční soustavě, a další kapitoly se věnují jednotlivým komponentům, které se mohou nacházet v kabelovém souboru, jaké druhy závad a poruch se mohou na kabelovém souboru projevit a v poslední čtvrté kapitole této části jsou shrnuty používané diagnostické metody.

Druhá část je zaměřena na praktické měření kabelového souboru v laboratoři. V kapitole 5 je popsán samotný testovaný objekt a postup laboratorního měření. V kapitole 6 je provedena analýza naměřených hodnot.

1. KABELOVÉ SÍTĚ JAKO SOUČÁST DISTRIBUTIVNÍ SOUSTAVY

V České republice je elektrická energie (dále jen el. energie) rozváděna pomocí distribuční soustavy (DS). Tyto distribuční sítě je možné rozdělit na sítě venkovní, kabelové a smíšené. U venkovních sítí musí venkovní vedení tvořit nejméně 98 % celé sítě. U kabelových sítí musí kabelové vedení tvořit alespoň 90 % celkové sítě. A o smíšených sítích se hovoří, pokud mají současně nejméně 10 % venkovního vedení a nejméně 2 % kabelového vedení. [1]

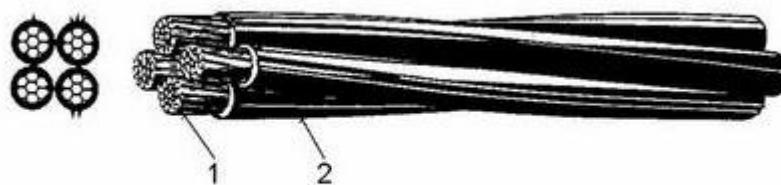
Kabelové sítě jsou téměř výhradně provozovány v DS. Hlavním důvodem, proč nejsou provozovány v přenosové soustavě, je, že kabelové sítě jsou výrazně dražší než venkovní. [2]

1.1 Napět'ové hladiny v DS

V DS jsou kabelové sítě provozovány nejčastěji na hladině 0,4 kV (nízké napětí), 10 kV (východní Čechy), 22 kV a 35 kV (vysoké napětí). Na ostatních napět'ových hladinách je možné se také setkat s kabelovými sítěmi, ale nejsou už tak běžné.

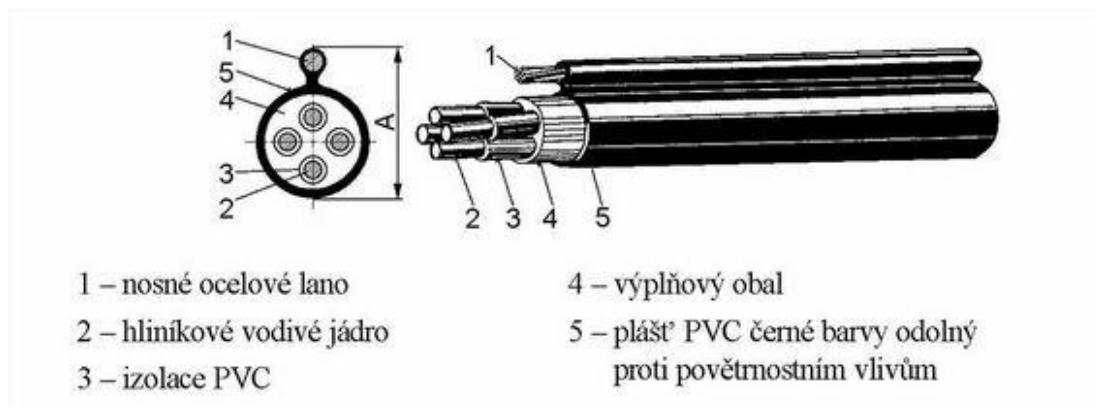
1.1.1 Napět'ová hladina 0,4 kV

Na napět'ové hladině nízkého napětí (NN) převažují kabelová vedení u všech distributorů. Důvodem je, že většina přípojních míst je již ve městech připojena pomocí kabelové přípojky, a i na okrajích měst a na vesnicích je postupně čtyřvodičový rozvod pomocí neizolovaných drátů nahrazován závěsnými kabely. Tyto závěsné kabely se na NN sloupy umísťují zavěšené na podpěrkách. Existují dva typy závěsných kabelů. První typ je tvořen čtyřmi samostatně izolovanými vodiči, které jsou stočeny do společného samonosného vedení (viz Obrázek 1-1). Druhým typem je kabel AYKYz, což je čtyřžilový kabel, který má ve společném plášti zalisované nosné lano (Obrázek 1-2). [2], [3]



- 1 – hliníkové kulaté komprimované jádro
- 2 – PE izolace černé barvy

Obrázek 1-1 Schéma závěsného kabelu typ 1 [3]



Obrázek 1-2 Schéma závěsného kabelu typ 2 [3]

1.1.2 Napěťová hladina 10/22/35 kV

Na napěťové hladině vysokého napětí (VN) 10/22/35 kV je délka kabelového a venkovního vedení výrazně větší než u sítí 110 kV (velmi vysoké napětí, VVN). U ČEZ distribuce, a. s., která dodává el. energii na největším území v ČR, se hodnota délek kabelového vedení pohybuje okolo 27,83 %, u druhého největšího (podle množství distribuované el. energie) distributora EG.D, a.s. se procento pohybuje kolem 22,26 %. U distributora PREdistribuce a.s. se hodnota pohybuje okolo 97,64 % - takto vysoká hodnota je zapříčiněna oblastí působení distributora - VN síť vedou často skrz nebo do městské zástavby. [4], [5], [6]

V městské zástavbě jsou kabelová vedení provozována hlavně proto, že potřebují méně prostoru pro své bezpečnostní pásmo, které může být tvořeno dostatečnou vrstvou zeminy. [2]

Nejčastější napěťová hladina na VN je 22 kV, ale v části východních Čech se objevují i napěťové hladiny 35 kV a 10 kV. Tyto napěťové hladiny se již moc nerozšiřují, protože se plánuje přechod všech vedení VN jen na napětí 22 kV. [7]

Na této napěťové hladině se nyní používají hlavně kabely z izolací ze zesíťovaného polyetylenu (XLPE). Typy kabelů budou více rozebrány v kapitole 2.1. [2]

1.1.3 Napěťová hladina 110 kV

Na hladině 110 kV (velmi vysoké napětí) najdeme kabelové vedení jen velmi výjimečně (zlomky procent z celkové délky vedení 110 kV). [2]

ČEZ distribuce, a.s. provozuje na této hladině kabelové vedení v délce 33 km a EG.D, a.s. má jen 14 km kabelového vedení. PREdistribuce, a.s., spravuje 83 km kabelového vedení, což je několikanásobně více než u ostatních dvou distributorů. Takto vysoká hodnota je způsobena tím, že PREdistribuce, a.s. dodává el. energii do Prahy a jejího blízkého okolí, kde je vysoká hustota zalidnění a je zde výhodnější použít kabelovou síť. [4], [5], [6]

Na této napěťové hladině se používají jedině kabely s izolací z XLPE. [2]

1.2 Způsob provozování

Způsob provozování distribučních sítí závisí na napěťové hladině dané sítě a také na způsobu uzemnění transformátoru dané napěťové hladiny.

1.2.1 Hladina VVN

Veškeré sítě VVN se provozují jako okružní (Obrázek 1-3d) nebo tak, aby je bylo možné zokruhovat. Je to z důvodu, aby při poruše na vedení nebyla přerušena dodávka el. energie nebo aby byla dodávka obnovena co nejrychleji i do odběrů za postiženou částí vedení.

Sítě 110 kV se provozují tak, že strana nižšího napětí autotransformátoru 400/110 kV resp. 220/110 kV je účinně uzemněná (střed transformátoru je přímo uzemněn). Zkratky jsou tak snadno detekovatelné, ale musí být okamžitě vypínány a to proto, že jimi prochází velký proud. [8]

1.2.2 Hladina VN

Topologie většiny VN sítí je buď paprsková nebo průběžná (Obrázek 1-3 a, c). Ale v příměstských oblastech a ve městech je možné danou síť provozovat i jako dvojpaprskovou nebo okružní (Obrázek 1-3 b, d).

U sítí VN se používá několik systémů uzemnění transformátorů. Ty definují, jak můžeme danou síť provozovat z hlediska bezpečnosti, chránění nebo nepřetržitosti dodávky el. energie. Rozdílné systémy uzemnění transformátorů se prakticky nijak neprojeví při bezporuchovém chodu symetrické sítě, ale mají zásadní vliv při vodivém spojení jedné fáze se zemí (pro tuto napěťovou hladinu se používá i pojem zemní spojení). Velikost průchozího proudu tímto zemním spojením nezávisí na impedanci vedení mezi zdrojem poruchového proudu a místem poruchy (jako při zkratu), ale závisí na celkové kapacitě galvanicky spojeného vedení. A dále zemní spojení způsobí vzrůst napětí na nepoškozených fázích z hodnot fázových na hodnoty sdružené.

V ČR jsou provozovány 3 typy VN soustav:

- izolované (střed transformátoru není spojen se zemí),
- nepřímo uzemněné přes zhášecí tlumivku (střed transformátoru je spojen se zemí přes tlumivku (Petersonova cívka)),
- nepřímo uzemněné přes uzlový odporník (střed transformátoru je spojen se zemí přes odporník, nejčastěji 1 kA).

Pro venkovní vedení je nejčastěji použito nepřímé uzemnění přes tlumivku. Pokud je zhášecí tlumivka naladěna do paralelní rezonance s kapacitou vedení, dokáže tlumivka kompenzovat kapacitní proud zemního spojení tak, že zbytkový proud je činného charakteru a tvoří jen 3 % - 10 % celkového kapacitního proudu. Síť s trvalým zemním spojením, která je nepřímo uzemněná přes tlumivku, lze provozovat maximálně do doby, kdy oteplení tlumivky nepřesáhne dovolenou mez.

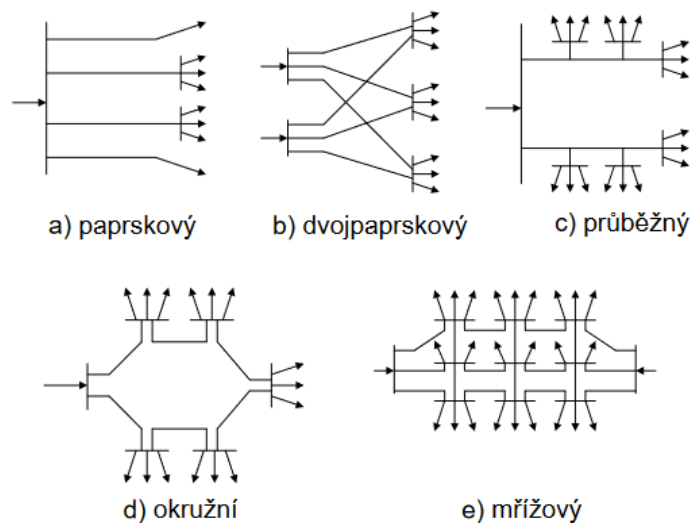
Pro kabelové sítě je nejčastěji používáno uzemnění středu transformátoru přes odporník, a to z důvodu, že kabelové vedení má daleko vyšší kapacitu na 1 kilometr než venkovní vedení a většina poruch je trvalého rázu. Protože je použit odporník, nevzniká při poruše zemní spojení, ale jednofázový zkrat a z tohoto důvodu jsou poruchy vypínány v co nejkratším čase. U kabelových vedení často přechází jednofázový zkrat do zkratu třífázového, při kterém se musí odstavit celá délka vedení.

Výhodou odporníku je, že omezí velikost zkratového proudu, případně zvedne hodnotu zbytkového proudu poruchy (v případě kompenzovaných sítí) na dostatečnou hodnotu, aby poruchu mohly detekovat ochrany. V tomto případě se připojuje odporník paralelně ke zhášecí tlumivce, obvykle na dobu 1 sekundy. [1]

1.2.3 Hladina NN

Nejpoužívanější topologií na napěťové hladině NN ve vesnicích je paprskový nebo průběžný rozvod, méně často se lze setkat s dvojpaprskovým rozvodem (Obrázek 1-3 a, b, c). Ve městech jsou nejčastěji mřížové sítě (Obrázek 1-3 e).

Sítě NN se provozují jako účinně uzemněné – ochrany vypínají poruchy ve krátkém čase z důvodu, že sítě NN většinou vedou v zalidněných oblastech, kde by při poruše mohlo dojít k ohrožení lidských životů. [9]



Obrázek 1-3 Topologie distribučních sítí [9]

1.3 Výhody a nevýhody kabelových sítí

1.3.1 Nevýhody

Jak už bylo řečeno v úvodu této kapitoly, tak jednou z největších nevýhod kabelových sítí je jejich cena. Platí, že čím vyšší napětí, tím vyšší cena, a to z důvodu větších průřezů izolace. U VVN vedení bývá cena kabelového vedení až několikanásobně větší než

u venkovního vedení, a u VN a NN kabelových vedeních je obecně cena vyšší než u venkovních vedení.

Další nevýhodou může být i to, že v ochranné zóně kabelů VVN (1 metr na každou stranu od krajního vodiče) nesmí projíždět těžší technika než 6 tun. Dále také ukládání kabelů poškozuje přírodu – výkopové práce narušují lokální hydrogeologické poměry, protože se kabely ukládají do pískového lože. Kabely se také při svém provozu zahřívají, to přispívá k vysušování okolního povrchu. [2]

Kabelové vedení má velký kapacitní nabíjecí proud, kdy i ve stavu na prázdko způsobuje proudové zatížení. Nevýhodou je i to, že odebírá jalový proud kapacitního charakteru, který se musí kompenzovat, jinak by došlo ke zhoršení účinníku sítě.

Rovněž odstraňování poruch trvá daleko déle než u venkovního vedení a je nutná těžká technika, protože se musí odstranit zemina, která je nad i okolo kabelu. [10]

1.3.2 Výhody

Největší výhodou kabelových vedení je výrazně vyšší spolehlivost - nehrozí pád nebo přetržení vedení při pádech větví či stromů nebo poškození způsobené povětrnostními vlivy a námrazou.

Výhodou je také to, že kabelové vedení má menší ochranné pásmo okolo vedení než vedení venkovní. Veřejnost také pozitivně vnímá to, že kabelové vedení není vidět a nekazí vzhled měst. [2]

2. KABELOVÝ SOUBOR

Kabelový soubor je možné definovat jako: „Zařízení určené ke spojování, odbočování, ukončování, kotvení kabelu nebo rozvětvení žil. Zabraňuje vnikání vlhkosti do kabelu a zamezuje vytékání kabelové hmoty.“ [11]

Do kabelového souboru můžeme podle [12] zařadit tyto prvky:

- kabely
- kabelové koncovky
- přípojnicové systémy
- kabelové spojky
- utěšňovací systémy
- izolační trubice
- opravné pásy a manžety

2.1 Kabely

Základ kabelu se skládá z jádra, izolace a pláště. Jádro může být složené z jednoho kusu materiálu – drátu, nebo je jádro slané z několika drátků, které jsou stočené. Jádra, která mají průřez větší 16 mm², jsou už vždy slaná.

Nejčastějšími materiály pro výrobu jader jsou elektrovodný hliník a elektrovodná měď. Hliník je levnější a má nižší hustotu než měď, ale má jen 60 % její vodivosti (což znamená, že jádro musí mít větší průřez) a má nevhovující mechanické vlastnosti (snadno se láme a pod tlakem teče). Měď je druhý nejvodivější známý kov, ale může negativně reagovat s některými složkami izolace vodiče jako je například síra.

Obalením jádra izolací vzniká žíla. Soustava dvou a více žil se nazývá kabel. Plášť kabelu může být tvořen pouze samotnou izolací nebo se používají další vrstvy materiálu, pokud je zapotřebí např. mechanická nebo chemická odolnost. K těmto základním vrstvám je možné ještě přidat kabelovou výplň, polovodivé vrstvy, stínění, mechanické bariéry či nosné lano. [13]

Pro kabelové vedení NN se nejčastěji používají kabely s pryžovou a plastovou izolací. Pro napětovou hladinu VN a výše se používají kabely s izolací ze zesíleného polyetylénu, které nahradily kabely s papírovou izolací a kovovým pláštěm.

2.1.1 Kabely s papírovou izolací a kovovým pláštěm

Jedním z představitelů těchto kabelů jsou PILC kabely. Tato zkratka vznikla z jejich anglického názvu (Paper Insulated Lead Covered). U těchto kabelů je jádro (A) - viz Obrázek 2-1, obmotáváno několika vrstvami impregnovaného kabelového papíru, který slouží jako izolace (C). K impregnaci se používá buď stékavý nebo nestékavý dielektrický impregnant a po jeho vysušení je kabel dále ponořen do směsi minerálního oleje a kalafuny. To celé je překryto kovovým nebo oloveným pouzdrem (E), které zde

má několik funkcí: 1) slouží jako ochranná vrstva proti mechanickému poškození izolace, 2) chrání izolaci a jádro proti vlhkosti, 3) slouží jako bariéra proti úniku oleje a 4) stíní kabel. Kovové pouzdro je pokryto polymerovým pláštěm (F), který má zabránit korozi kovu. Mezi jádro a izolaci a mezi izolaci a pouzdro se ještě vkládají polovodivé vrstvy, které slouží pro řízení elektrického pole (B,D). [14][15]



Obrázek 2-1 Kabel PILC [14]

Tloušťka papírové izolace závisí na použité napěťové hladině a dle [16] se může pohybovat v řádu jednotek až nižších desítek milimetrů. Problémem je, že časem v papírová izolaci vysychá minerální olej a následně dochází ke snížení elektrické pevnosti a degradaci všeobecných izolačních vlastností. Pro řešení tohoto problému se využívají tzv. dolévací koncovky, které jsou vysvětleny v kapitole 2.3.1. Dalším problémem kabelů PILC je i jejich hmotnost, která je způsobena užitím olova jako pouzdra pro tento typ vodičů. [15]

Kabely PILC se dnes již nepokládají, ale lze je najít na starších kabelových vedeních, které byly položeny v 50. – 80. letech minulého století, a ještě toto vedení neprošlo renovací.

2.1.2 Kabely s pryžovou a plastovou izolací

U kabelů s plastovou izolací je izolace z polyvinylchloridu (PVC) nebo z polyethylenu (PE). Je možné se s ní nejčastěji setkat na napěťových hladinách do 6 kV. Kabely s izolací

z PVC jsou velice levné, ale mají i řadu nevýhod (vývin kouře, kyselého plynu a halogenvodíku při požáru, nízkou pracovní teplotu atd.). Proto se začala používat izolace z PE, která sdílí dobré mechanické a fyzikální vlastnosti s PVC, ale neobsahuje chlór, který by při hoření vytvářel nebezpečný plyn.[17][18]

Jádra žil ve vícežilových kabelech již nemusí mít kruhový průřez, ale používají se i tzv. sektorová jádra. Tato jádra mají zhruba tvar trojúhelníku, který se používá z důvodu co nejlepšího využití prostoru kabelu [13]. Mezi jádra se vkládá výplň, která je stažena nejčastěji plastovou páskou, ale může se použít i páska kovová. Na tuto pásku je možné umístit stínění jednotlivých žil. Poslední vrstvou je plášť většinou z PVC nebo PE. [15]



- 1 Kulatý, laněný měděný vodič (RM)
- 2 Vnitřní vodivá vrstva
- 3 Izolace žily ze síťovaného polyetylénu (PE)
- 4 Vnější vodivá vrstva
- 5 Vodivá, nekroucí se textilní páska
- 6 Stínění měděnými drátky s protisměrnou spirálou
- 7 Ovin z umělohmotné fólie
- 8 Vnější plášť z polyetylénu (PE), černý

Obrázek 2-2 Kabel N2XS(F)2Y [19]

Jediný rozdíl mezi pryžovými kabelem a plastovými kabelem je to, že pryžové kabelem používají jako izolaci etylen-propylenovou pryž (EPR) místo PVC nebo PE.

EPR má dobré dielektrické vlastnosti a velice dobrou odolnost proti ozónu a povětrnostním vlivům. Výhodou této pryže oproti ostatním přírodním pryžím je, že měděné kabelem nemusí být pocínované. Cínování se u přírodních pryží používá pro zabránění jejich poškození.

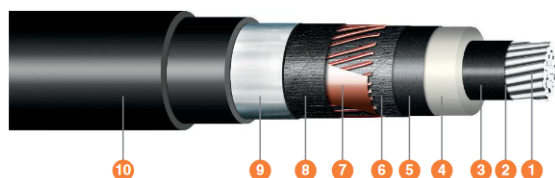
Jedinou nevýhodou EPR je, že má slabou odolnost proti olejům, která je však vyvážena odolností proti mnoha kyselinám a dalším rozpouštědlům. [20]

2.1.3 Kabelem s izolací ze zesíťovaného polyetylénu

Izolace tohoto druhu kabelů je tvořena zesíťným polyetylenem (XLPE). Termín „zesíťný“ značí, že lineární makromolekuly PE jsou propojeny příčnými můstky, díky kterým se se vytváří trojrozměrná makromolekulární struktura. [21]

XLPE se může vytvářet buď pomocí ozařování (svazky elektronů nebo paprsky gama) nebo chemickou cestou. V praxi se více používá chemická cesta. Do polyetylénu se přidávají peroxidy, které při vysokém tlaku a teplotě vytvářejí příčné můstky mezi jednotlivými lineárními makromolekulami PE. Pro zesíťování lze použít i silan, který je do PE naroubován. Silan zde bude působit jako prvek, který příčně spojí makromolekuly PE.

Zesítení se provádí z důvodu vylepšení vlastností PE. Kabely XLPE mají nižší permitivitu a kapacitu (což vede k nižším nabíjecím a svodovým proudům), vyšší jmenovité proudové zatížení, elektrickou pevnost a vyšší maximální dovolenou provozní teplotu než kabely s izolací z PE nebo PVC. Při zahoření kabelů z XLPE je díky zasíťování znatelně zmenšena schopnost tečení této izolace, to zvyšuje požární bezpečnost. [22]



Konstrukce:

Design:

- | | | | |
|---|--|---|--|
| 1 Hliníkové jádro
<i>Aluminium conductor</i> | 3 Vnitřní polovodivá vrstva
<i>Inner semiconducting layer</i> | 5 Vnější polovodivá vrstva
<i>Outer semiconducting layer</i> | 8 Vodoblokující páska
<i>Water-blocking tape</i> |
| 2 Vodoblokující nit
<i>Water-blocking strand</i> | 4 Izolace ze zesíťovaného polyetylénu
<i>XLPE insulation</i> | 6 Polovodivá vodoblokující páska
<i>Semiconducting water-blocking tape</i> | 9 Al folie
<i>Al foil</i> |
| | | 7 Stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky
<i>Cu wire screen and Cu tape counterhelix</i> | 10 Vnější PE + PVC plášť
<i>Outer PE + PVC sheath</i> |

Obrázek 2-3 Kabel s XLPE izolací [23]

Z důvodu větší tuhosti samotné izolace, která vznikla zesíťováním, je s těmito kabely těžší manipulace. To je ale vyváženo jejich velice výhodnými elektrickými vlastnostmi, a proto se hodně využívají při budování kabelových vedení na hladině VN a VVN.

2.2 Řízení elektrického pole

Řídit elektrické pole (dále el. pole) v prvcích kabelového souboru je možné několika způsoby. A to pomocí polovodivých vrstev, nelineárním materiálem řídicí vrstvy nebo pomocí geometrického tvaru řídicí vrstvy.

Řízení polovodivými vrstvami je používáno v celé délce kabelu, kromě jeho ukončení. Druhé dva způsoby se používají, pokud je potřeba z nějakého důvodu kabel ukončit. Většinou se jedná o připojení kabelu k přístroji nebo k rozvaděči nebo také z důvodu napojení dalšího kabelu. Jinak vznikne na konci kabelu mezi vnější polovodivou vrstvou a jádrem kabelu silné elektrické pole s tak velkým gradientem napětí (ekvipotencionální čáry jsou blízko sebe, viz Obrázek 2-4), že způsobí vysoké elektrické namáhání, to povede k ionizaci vzduchu na povrchu izolace kabelu. Teplota a vedlejší produkty ionizace vedou k postupné degradaci povrchu izolace, což pak může následně vést k průrazu izolace. [12][12]

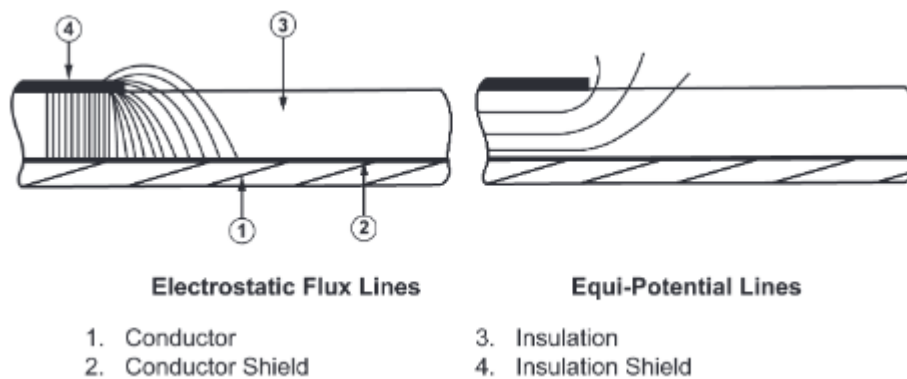
2.2.1 Polovodivé vrstvy

Polovodivé vrstvy se nacházejí na obou stranách izolační vrstvy. Z tohoto důvodu se rozlišují vnitřní a vnější polovodivé vrstvy. Vnitřní polovodivá vrstva je mezi jádrem a izolací a vnější polovodivá vrstva je mezi izolací a stíněním. Ale obě tyto vrstvy se využívají ke stejnému účelu a mají stejné vlastnosti.

V normě ČSN IEC 60050-461 se polovodivé vrstvy nazývají stínící mezivrstvy a mají následující definici: „Vodivá vrstva nebo sestava vodivých vrstev, jejíž funkcí je řízení elektrického pole v izolaci“ [24] Jak je řečeno, jejich hlavním účelem je řídit el. pole v daném prvku a vyhlazovat povrch izolace. Vyhlazení je důležité hlavně proto, že kdyby se na povrchu izolace nacházely vzduchové bublinky nebo ostré hrany, mohly by vytvářet nehomogenní elektrické pole, které bude způsobovat nerovnoměrné elektrické namáhání poškozující izolační vrstvu.

Polovodivé vrstvy se skládají ze zesíťného polymeru, do kterého se přidávají uhlíkové saze, které způsobují elektrickou vodivost. Díky těmto sazím se zvýší relativní permitivita polovodivé vrstvy z jednotek, které má XLPE izolace, na řády tisíců. I přes zvýšení vodivosti této vrstvy nebude docházet k podélnému vedení proudu polovodivou vrstvou, a to z důvodu, že relativní permitivita jádra se blíží k nekonečnu.

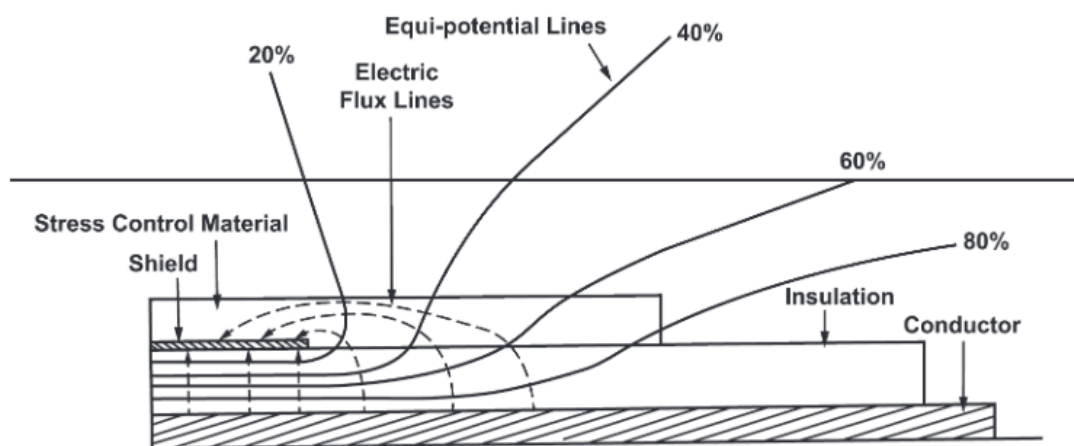
Kombinace relativních permitivit jádra, polovodivé vrstvy a izolace způsobí, že siločáry el. pole budou vycházet z polovodivé vrstvy kolmo na izolaci (Obrázek 2-4 v oblasti, kde je šipka 4) po celém obvodu kabelu, to způsobí, že elektrické pole bude v kabelu rovnoměrnější a tím pádem bude i elektrické namáhání rovnoměrnější. [15],[25]



Obrázek 2-4 Elektrické pole na konci kabelu bez jeho řízení [26]

2.2.2 Řízení el. pole nelineárním materiálem

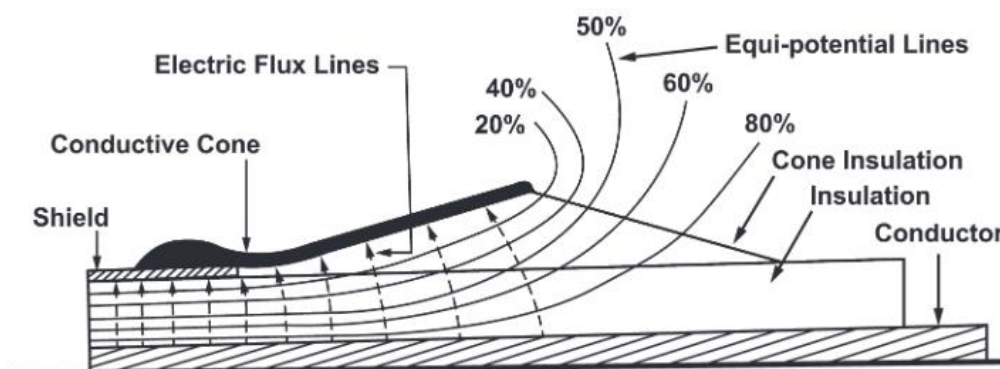
Na tuto řídicí vrstvu se používají materiály obsahující oxid zinečnatý (ZnO). Rozdíl elektrických vlastností mezi řídicí vrstvou a kabelovou izolací způsobí rozptýlení ekvipotencionálních čar dále od sebe, díky čemuž se zmenší gradient napětí na konci vnější polovodivé vrstvy. [12],[26]



Obrázek 2-5 Řízení el. pole pomocí nelineárního materiálu řídicí vrstvy [26]

2.2.3 Řízení el. pole geometrickým tvarem řídicí vrstvy

U tohoto typu řízení se na konec kabelu nasadí kužel z izolantu, který je na vnějším povrchu vodivý. Aby toto řízení správně fungovalo, je potřeba vodivý povrch kuželu propojit se stíněním zbytku kabelu. Kužel je nasazen tak, že nejširší místo je směrem ke konci kabelu. V tomto nejširším místě bude ukončena vnější polovodivá vrstva. Opět zde vznikne silné elektrické pole s vysokým gradientem napětí (naznačeno blízko u sebe ležícími ekvipotenciálami - viz Obrázek 2-6), ale díky přídavné izolaci kuželu a izolace kabelu je izolace dostatečně silná, aby zvládla toto pole. [26][26]



Obrázek 2-6 Elektrické pole na konci kabelu řízené geometrickým tvarem řídicí vrstvy [26]

2.3 Kabelové koncovky

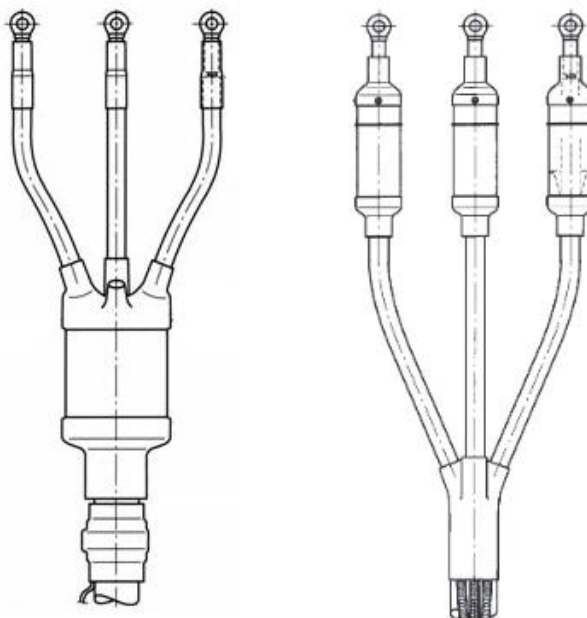
Kabelové koncovky se osazují na konce kabelových vedení a slouží k řízení elektrického pole na konci kabelu, k ochraně proti přímému dotyku s živou částí a zamezují přístupu vlhkosti na konce kabelu.

Kabelové koncovky můžeme dělit podle: prostředí kde se používají, použitého typu kabelu a jeho izolace, jmenovité hodnoty napětí, počtu žil a podle použité technologie nasazení na konec kabelu. Na napěťových hladinách VN a výše se používají následující typy koncovek.

2.3.1 Koncovky pro kabely s papírovou izolací

U kabelů s papírovou izolací napuštěnou stékvým nebo nestékvým impregnantem se používají dolévací nebo nedolévací koncovky. Pro možnost dolévání minerálního oleje je použita skleněná uzavíratelná nádobka.

Dolévací koncovky jsou vyráběny v jednožilových nebo trojžilových typech. V případě jednožilového typu je nádobka umístěna mezi koncem kovového pouzdra a kabelovým okem, kdežto u trojžilovém typu procházejí nádobkou všechny tři žíly, nádobka je umístěna blízko konce kabelu, až poté se kabel rozdělí na jednotlivé žíly.



Obrázek 2-7 Trojžilová a jednožilová dolévací koncovka pro PILC kabely [12]

Z důvodu použití nádobky s olejem se tyto dolévací koncovky používají jen ve vnitřních prostorech, kde je menší riziko rozbití a únik oleje nezpůsobí poškození životního prostředí.

Pro venkovní použití jsou používány koncovky, které jsou nedolévací. [12][12],[15]

2.3.2 Teplem smrštitelné koncovky

Teplem smrštitelné koncovky jsou jedny z nejpoužívanějších typů uchycení koncovek na kabelové vedení. Podle druhu kabelu a výrobce koncovky se lehce liší i její součásti.

Koncovka bude obsahovat kabelové oko nebo jiný typ úchytu. Ten se používá k uchycení jádra kabelu k přístroji a je mu věnována kapitola 2.4.2.

Další součástí je vrstva určená k řízení el. pole. Ta může být aplikována pomocí pásky, která se obmotává přes konec vnější polovodivé vrstvy a izolace. Nevýhoda této instalace spočívá v tom, že vrstva pásky nemusí být po celém obvodu kabelu stejná a závisí pouze na preciznosti montážní technika. Druhou možností je použití teplem smrštitelného elementu řídicí vrstvy el. pole. Vlivem smrštění je řídicí element tisknut na nerovný povrch izolace tak, aby měl co možná nejdokonalejší kontakt. Vzduch je při správné montáži vytlačován ven z této vrstvy. Při nedokonalé montáži budou ve vzduchových bublinkách nastávat přeskoky, které znehodnocují izolaci i řídicí vrstvu.

Další částí je výplňová páska, jejímž účelem je zabránění vzniku částečných výbojů ve vzduchové mezeře u konce polovodivé vrstvy kabelu, kde je velké elektrické namáhání.

Nesmí také chybět utěsnění proti vnikání vlhkosti a nečistot, které by mohly způsobovat zkrácení životnosti koncovky. K utěsnění se používají lepidla, které se vlivem ohřívání a smršťování roztečou po celé koncovce.

Svrchní vrstvou koncovky je izolační trubice, která je smrštitelná za tepla. Nasazuje se jednak přes řídicí vrstvu koncovky a přes nalisování oka, ale také i přes konec kabelu. Slouží tak jako náhrada odstraněné části izolace kabelu.

Na koncovku lze umístit tzv. kloboučky. Jejich účelem je prodloužení dráhy klouzavého výboje mezi okem a uzemněním. Kloboučky se umísťují jak na koncovky pro vnitřní, tak i pro venkovní použití. Platí pravidlo, že na stejné napěťové hladině bude mít koncovka stejného typu více kloboučků při venkovním použití než při vnitřním. Je to z důvodu, že se předpokládá větší znečištění povrchu koncovky při venkovním použití.

Poslední součástí koncovky je její uzemnění, které je chráněno těsnicí hmotou a musí být vodivě spojeno s uzemněním kabelu. [12],[15],[26]

Roztažitelné části jsou zákazníkům dodávány už roztažené a po nasazení na vybrané místo se pomocí propan-butanového hořáku zahřívají (dochází k roztavení krystalické mřížky) a smršťují (vytváří se nová krystalická mřížka s co možná nejmenší energií). Dodané koncovky, které jsou řádně skladovány, nemají danou dobu použitelnosti. [12]

2.3.3 Koncovky smrštitelné za studena

Jedná se o další velmi používaný typ koncovek. Skládají se ze typově stejných částí jako teplem smrštitelné koncovky. Jediným rozdílem je, že smrštitelné části jsou předepnuty na nosičích, které se při použití postupně vytahují, díky čemuž se jednotlivé části smršťují. Poté je koncovka okamžitě připravena k provozu.

Obecně se dá říct, že montáž zastudena smrštitelné koncovky je jednodušší a smrštění je více rovnoměrné než u teplem smrštitelné, protože není potřeba propan-butanový hořák, který nahřívá pouze část koncovky. Na druhou stranu při použití teplem smrštitelné trubice dochází k lepšímu utěsnění proti vlhkosti, protože se díky teplu lépe rozleje lepidlo, které koncovku dobře utěsní. [15],[26]

2.3.4 Násuvné koncovky za studena

Tyto koncovky jsou speciálním typem za studena smrštitelný koncovek. Na rozdíl od teplem a za studena smrštitelných koncovek, které se na vodič umísťují po jejich jednotlivých částech, tyto koncovky jsou vyráběny v celku. Při montáži se pouze nasunou na předpřipravený vodič a vytáhne se jejich aplikátor. Poté je opět koncovka připravena k provozu. [26]

2.4 Kabelové spojky a oka

Kabelové spojky a oka se používají při připojování kabelů k sobě nebo k připojení kabelu k určitému zařízení. Obě části se na kabel přichytávají nepájivou cestou, a to buď nalisováním nebo přišroubováním. Pro lisování se používají hydraulické kleště, pro šroubované kabelové spojky a oka se používají konektory, který v sobě obsahuje tržné hlavice šroubů, které se po dosažení předepsaného utahovacího momentu odlomí. [27]

2.4.1 Kabelová spojka

Jedná se o důležité části kabelových souborů, zejména u delších kabelových tras. Kabel je totiž možné dodat jen v určitých maximálních délkách, které jsou dány možnostmi současné nákladní dopravy a snadností manipulace. Spojky se proto používají pro vodivé spojení dvou kabelů. Spojky obsahují podobné části jako koncovky. Jedná se o trubice a pásy s řídicí vrstvou, výplňové pásy nebo teplem smrštitelné trubice s tavitelným lepidlem a izolační smrštitelné trubice. Spojky navíc ještě obsahují stínící síťku. [15]

Podle [25] spojky můžeme rozdělit podle jejich využití na:

- přímé
- přechodové
- opravné
- odbočné

Přímá spojka

Přímá spojka je zkonstruována pro propojení žíly dvou kabelů stejného typu. Jádra žil kabelů se spojí spojovačem, který je buď lisovací nebo s tržnými šrouby. Pro zajištění stejné délky zasunutí obou kabelů je uprostřed spojky umístěna vodivá zarážka a díky ní nejsou jádra žil v přímém kontaktu. Přes konce vnějších polovodivých vrstev obou kabelů se obmotá páska s řídicí vrstvou nebo se použije smrštitelná trubice s řídicí vrstvou. Pokud vznikly mezery mezi spojovačem a neodstraněnou izolací, je nutné použít výplňovou pásku nebo smrštitelnou trubici s výplňovým lepidlem. Jako další se použije izolační smrštitelná trubice, na kterou se dále nasadí stínící síťka, která tvoří stínění spoje a musí být vodivě spojena se stíněním obou kabelů. Původní stínění není potřeba odstranit, protože je možné stínění obou kabelů pomocí lisovacích spojovačů propojit a položit ho na stínící síťku. V případě spojení jednožilových kabelů se dále nasazuje poslední vrstva. Ta je tvořena teplem smrštitelnou silnostěnnou izolační trubicí, která

obsahuje tavitelné lepidlo. V případě trojžilových kabelů se ještě pod tuto vrstvu dává výplňový materiál.

Stejný způsob instalace je i u přechodných spojek, opravných spojek a u odbočných spojek. [15],[25]

Přechodová spojka

Přechodové spojky se používají všude tam, kde je potřeba přejít z jednožilového kabelu na trojžilový nebo když se mění typ izolace vodičů. Pokud se přechází z PILC kabelů na XLPE a naopak, tak tato spojka obsahuje trubici, která brání pronikání impregnantu z jednoho kabelu na druhý. Při přechodu mezi jednožilovým a trojžilovým kabelem je na konec trojžilového kabelu instalována rozdělovací hlava. [15],[25]

Opravná spojka

Jejím úkolem je nahrazení poškozené části kabelové žíly. Může to být provedeno vyříznutím poškozeného úseku a následným nahrazením novou kabelovou žílou, která se pomocí dvou spojovačů přichytí na stávající kabel, nebo se použije dlouhá opravná spojka, která je vyrobena z pocínovaného hliníku. Obvyklá délka opravitelného úseku se pohybuje kolem 500 mm. [15],[25]

Odbočná spojka

Odbočná spojka je speciální varianta přímé spojky, kdy se místo dvou kabelů spojují kabely tři. Spojovač má na jedné straně dvě místa pro připojení kabelu a na druhé straně je jen jedno místo na připojení kabelu. [25]

2.4.2 Kabelové oko

Kabelové oko nebo jiný typ úchyty se používá ke galvanickému propojení jádra kabelu a svorek elektrického zařízení, které je nutné napájet, a to ve vzduchem izolovaném rozvaděči nebo prostředí. V sítích NN se kromě kabelových ok používají také dutinky nebo vidlice. V sítích VN a VVN se používají již pouze kabelová oka.

Rozlišují se kabelová oka pro kabelovou koncovku a pro kabelový konektor. Rozdíly jsou jak ve tvaru samotného oka, tak i jeho floušťce. Kabelové oko nemá podstatný vliv na běžnou funkci kabelové koncovky nebo konektoru.

Kabelové oko se ke kabelu připevňuje nejčastěji těmito dvěma způsoby, které mají vliv na provedení přichytného místa kabelu u oka: prvním způsobem je nalisování konce oka na kabel, a proto musí být přichytné místo dostatečně měkké nebo tenké, aby je bylo možné lisovacími kleštěmi dostatečně dobře nalisovat; druhou variantou je přichycení kabelu v přichytném místě pomocí tržných šroubů.

Kabelová oka jsou vyráběna ze stejných materiálů jako jádra vodičů tzn. hliníku a mědi. Pokud jsou kabelová oka použita ve vnitřním prostředí, lze použít nepotažená oka cínem; pro oka, které budou venku, se cínování použít musí. Je to z důvodu, aby se mezi

okem a přístrojovou svorkou nevytvářelo vysoké chemické napětí. Oka jsou se přístrojovými svorkami stažena pomocí šroubů a matic. [28]

2.5 Přípojnicové systémy k rozvaděčům

Pro připojení kabelového vedení do rozvaděče je potřeba zvolit systém připojení. Pokud je kabelové vedení připojeno do vzduchem izolovaného rozvaděče (AIS – Air Insulated Switchgear), tak se obvykle používá kabelových koncovek, které jsou nasazeny na kabel ukončený kabelovým okem. Pokud se vedení připojuje do plynem izolovaného rozvaděče (GIS – Gas Insulated Switchgear) nebo do vakuem izolovaného rozvaděče (VIS – Vacuum Insulated Switchgear), je nutné použít kabelové konektory. Tyto konektory jednak zaručí galvanické propojení vedení a rozvaděče, ale také zajistí, že při instalaci či odstraňování kabelového vedení není potřeba otevírat rozvaděč, což by znamenalo nutnost odčerpat v případě GIS kompletně izolační plyn a v případě VIS by bylo potřeba po ukončení prací znovu vytvořit uvnitř rozvaděče potřebné technické vakuum. V obou případech by to znamenalo zbytečné další náklady. [28]

V GIS rozvaděčích se v tuto chvíli nejčastěji používá plyn SF₆, a to z důvodu jeho velice dobrých dielektrických a izolačních vlastností, které zaručují menší velikost rozvaděče. Jeho nevýhodou je, že i únik jedné molekuly SF₆ do atmosféry má velké následky vzhledem ke globálnímu oteplování. Vliv jedné molekuly SF₆ je stejný jako vliv téměř 24 000 molekul CO₂ a poločas rozpadu plynu SF₆ v atmosféře je až 3 200 let. [29]

2.5.1 Kabelový konektor pro vnější kužel

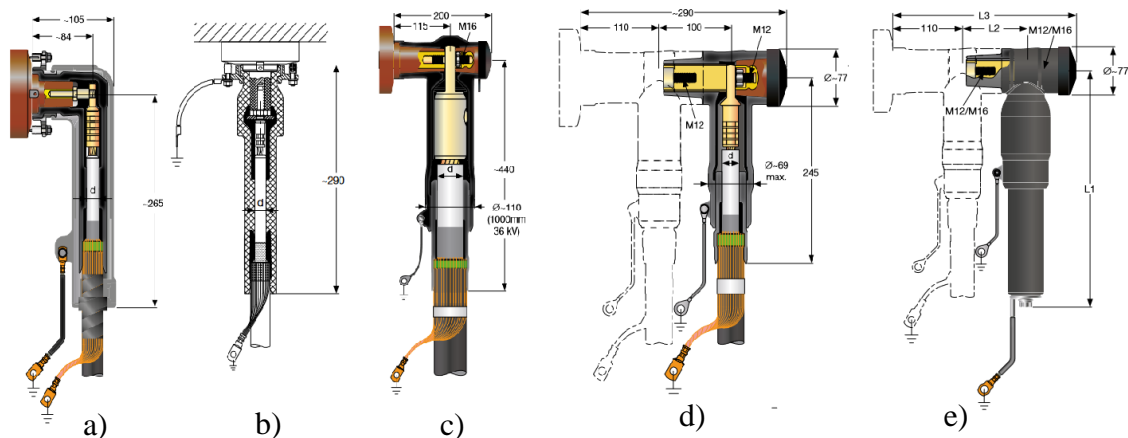
Tyto kabelové konektory můžeme rozdělit podle toho, na jakou rozvaděčovou průchodku se připojují. Průchodky jsou velikosti A, B, C1, C2 a F. Každá velikost má jinou proudovou zatížitelnost, kdy A má ji nejmenší a F největší. Tyto průchodky mají tvar kuželů, který vystupuje z rozvaděče ven, a proto se jim říká vnější kužel.

Pro průchodky A (dovolený proud 250 A) a B (dovolený proud 400 A) se používají konektory přímé, úhlové a odbočné. Odbočné konektory můžeme taky nazvat jako T – konektory, protože připomínají písmeno T.

Pro průchodky C1 (630 A), C2 (1250 A) a F (až 2500 A) se nejčastěji používají konektory se svodičem přepětí, odbočné a přípojné. Konektory se svodičem přepětí se připojují k odbočným konektorům pomocí propojovacího prvku, který se instaluje místo izolačních zátky. Stejně se montují i přípojné konektory, které místo metaloxidového svodiče přepětí mají v sobě nainstalovaný další kabel.

Další typ rozlišení konektorů je, zda se jedná o konektory deadbreak nebo loadbreak. Deadbreak konektor značí, že může být odpojen jen z rozvaděče, který je odpojen od el. energie, kdežto loadbreak konektor značí, že může být odpojen pod zátěží. Loadbreak konektory se většinou používají pouze u průchodek A nebo B a jsou úhlového typu.

Pro všechny varianty konektorů i velikosti průchodek se vyrábějí i konektory v zapouzdřené variantě s kovovým tělem.



Obrázek 2-8 Typy kabelových konektorů: a) Úhlový konektor b) Přímý konektor c) Odbočný konektor d) Přípojný konektor e) Konektor se svodičem přepětí [28]

Instalace konektoru je velmi podobná instalaci kabelové koncovky. Z kabelu se musí odstranit vnější polovodivá vrstva, dále se na určené místo, které je namazané lubrikantem, zasune díl, který slouží pro řízení el. pole a na konec odizolovaného kabelu se upevní kabelové oko. Po očištění kabelu (od nečistot vzniklých při předchozích krocích) se jak na polovodivou vrstvu kabelu, tak i dovnitř konektoru nanese lubrikační vrstva, která usnadní nasunutí konektoru na kabel. Pak u úhlových a přímých konektorů se do konektoru našroubuje připojovací pin. Takto připravený konektor se nasune na průchodku a konektor se upevní buď pomocí třmenu nebo kovové příruby (záleží na provedení konektoru). U odbočných a přípojných konektorů a konektorů se svodičem přepětí se používá šroub (nejčastěji o velikosti M12 nebo M16), který se nejprve našroubuje do průchodky, na ni se následně nasadí konektor s vloženým kabelem a z volné strany konektoru se přišroubuje matice. Volná strana se ucpě pomocí šroubovací izolační zátky, která je ještě zakryta gumovým krytkou. Na zátku může být kapacitní měřící bod. [28]

2.5.2 Konektory na vnitřní kužel přístroje

Jedná se o zásuvné spoje, které se po zasunutí připevňují pomocí šroubů, které jsou umístěny na kovové přírubě konektoru a průchodky. Průchodky mají opět tvar kuželu, který je nyní směrem do rozvaděče. Používají se průchodky typu 2 a 3 s jmenovitými proudy 800 A a 1250 A. Jejich použití je hlavně pro připojení transformátorů a GIS rozvaděčů na napěťových hladinách 12 až 52 kV.

Tyto konektory se používají i na hladině VVN a jejich použití je možné až do napěťové hladiny 245 kV. [28]

2.6 Utěšňovací systémy, izolační trubice, opravné pásky a manžety

2.6.1 Utěšňovací systémy

Do této kategorie se řadí kabelové průchodky zdivem, utěšňovací hlavy pro kabely a kabelové těsnící uzávěry.

Prvním typem kabelových průchodek je systém, který se skládá z ocelové spirály nebo trubky, na které je natažena teplem smrštitelná trubice, která s určitou délkou přesahuje přes konec ocelové spirály. Přesahující části se pak smrští na protažený kabel, díky lepidlu na vnitřní straně trubice je zaručena odolnost proti pronikání vody do průchodky. Na vnější straně smrštitelné trubice je nanesen speciální nátěr, který zlepší přilnavost ke stěně.

Druhým typem kabelových průchodek je systém využívající nafukovacích vaků, které mají na sobě dvě pásky s izolační hmotou. Vak se ovine kolem kabelů, vsune se do průchodu a následně se naplní plynem, který způsobí, že se pásky s izolační hmotou přitisknou k průchodu a ke kabelům. Tímto popsáním způsobem lze utěšnit pouze dva kabely. Pro utěsnění více kabelů je potřeba navíc použít utěšňovací spony. Utěsnění kabelové hlavy se používá tehdy, když je potřeba rozdělit kabel na jednotlivé žíly. Používají se teplem stažitelné trubice, ve kterých je nanášeno lepidlo, které se teplem rozleje a utěsní prostor kolem jednotlivých žil i otevřený konec kabelu.

Kabelové těsnící uzávěry se používají na konce kabelů z důvodu jejich ochrany a utěsnění, když jsou kabely přepravovány, skladovány nebo pokládány. Jsou opět vytvořeny z teplem smrštitelného materiálu a díky tomu jsou odolné proti pronikání vody a vzniku elektrostatického náboje. [30]

2.6.2 Izolační trubice, opravné pásky a manžety

Izolační trubice slouží k elektrické izolaci a utěsnění proti pronikání vody. Tyto trubice jsou většinou teplem smrštitelné a vyrábějí se v různých tloušťkách. Většinou se používají jako plášť při montáži spojek nebo koncovek, který nahrazuje původní plášť kabelu.

Při poškození pláště kabelu je možné plášť opravit pomocí opravné pásky nebo manžety. Po instalaci bude opravná vrstva sloužit jako nový plášť, proto musí být nainstalována s určitým přesahem. Jak opravná páska, tak i manžeta jsou opět teplem smrštitelné a obsahují na své vnitřní straně teplem tavitelné lepidlo, které zabrání vnikání vody pod opravný prvek. [31][31]

3. PORUCHY A ZÁVADY KABELOVÝCH SOUBORŮ

Rozdíl mezi poruchou a závadou je velmi těžké definovat, protože jsou obě tyto slova v obecné mluvě často používány jako synonyma. Pokud bychom se snažili tyto slova rozlišit, tak jedině díky jejich kauzální souvislosti, kdy porucha vznikne jako projev či následek závady, ale je zde problém, že závada může být způsobena ještě jinou závadou.

Pokud bychom se podívali na tyto pojmy do stavebnictví, tak zjistíme, že věcnou specifikací těchto pojmů se zabývá Ústav územního rozvoje v oblasti problematiky územního plánování a stavebního řádu, který spadá pod Ministerstvo pro místní rozvoj. [32]

Ten definuje tyto pojmy jako:

- Závada – „nedostatek konstrukce, předmětu (např. určitého prvku) způsobený chybným návrhem, nevhodným, či nedokonalým provedením, který může ovlivnit funkční způsobilost konstrukce, předmětu. Jedná se o stav, který není změnou proti původnímu stavu. Může vyplynout z přehodnocení stavby, konstrukce nebo prvku podle v současnosti platných předpisů a norem. Konstrukce, předmět s vadou, pak nemá vlastnosti vymíněné nebo obvyklé.“ [33]
- Porucha – „trvalé nebo dočasné vyčerpání schopnosti konstrukce plnit požadavky na ni kladené, které zhoršuje její spolehlivost, případně snižuje její bezpečnost, předpokládanou ekonomickou životnost, užitnou jakost apod. Je to změna konstrukce proti původnímu stavu. Může vzniknout jako důsledek vady, nebo z jiných příčin. Porucha stavební konstrukce má technické důsledky.“ [33]

V této práci se bude termín závada používat jako nedostatek předmětu, který je způsoben chybným návrhem nebo nevhodným či nedokonalým provedením. A porucha bude následkem závady a při poruše bude docházet ke změně stavu předmětu.

3.1 Typické závady na kabelovém souboru

Závady mohou vznikat na třech možných místech v kabelovém souboru.

Prvním místem je samotná izolační vrstva. Tato vrstva se časem degraduje díky stárnutí izolace. Na rychlost stárnutí má hlavní vliv tepelné namáhání a namáhání elektrickým polem. Na vnější vrstvu izolace, případně na povrch pláště prvku kabelového souboru, působí chemicky i okolní prostředí, což vyvolává rovněž jejich pozvolnou degradaci. I dopadající záření může způsobit závadu, hlavně na kabelových koncovech a konektorech.

Druhé místo vzniku závad se nachází mezi polovodivou a izolační vrstvou kabelu. Nejvýrazněji se zde projevují závady vznikající elektrickým namáháním a závady kvůli špatné montáži, kdy zde zůstávají bublinky vzduchu, ve kterých pak vznikají částečné výboje.

Třetím místem je vodivé jádro kabelu. Závady zde vznikají mechanickým namáháním kovového jádra nebo působením chemické koroze při špatném upevnění koncovek. Výjimečně zde může vzniknout závada pomocí tepelného namáhání, ale ve většině případů jsou kabely navrženy tak, aby jejich izolace fungovala jako tepelná pojistka, protože izolace má nižší teplotní odolnost.

3.1.1 Přirozené stárnutí izolace

Izolace na komponentech kabelového souboru se s časem mění. Tato změna je následkem mnoha různých vlivů, ať už jsou to klimatické vlivy, chemické reakce či mechanické namáhání. Všechny tyto nevratné vlivy mají za následek postupnou změnu fyzikálních a chemických parametrů izolace. Tuto postupnou změnu nazýváme stárnutí. Díky tomuto stárnutí mají prvky danou dobu jejich života. [34]

Dobu života můžeme definovat jako časový úsek, po který je schopná daná izolace udržet svoje dielektrické vlastnosti na dostatečně vysoké úrovni, při níž může stále vykonávat svoji funkci. Z tohoto vyplývá, že čím lepší budou vlastnosti materiálu izolace, tím delší bude její doba života. Dobu života a tím pádem i rychlost stárnutí ovlivňuje velké množství dalších faktorů. O nejvýznamnějších faktorech je psáno níže. [35]

3.1.2 Tepelné namáhání

Tepelné namáhání je způsobeno jednak Joulovými ztrátami v kabelu při průchodu proudu, tak i dielektrickými ztrátami. Tyto ztráty zapříčiňují zahřátí kabelu, což má za následek snížení jeho vodivosti. Snížení vodivosti znamená, že kabelem může proudit menší proud, který ale způsobí menší ztráty. Zmenšením ztrát klesne teplota, díky čemuž se opět zvýší vodivost a kabelem může protékat větší proud. Tento koloběh bude působit do té doby, dokud se nevyrovná vyrobené a pohlcené teplo s teplem odvedeným do okolí. Tomuto rovnovážnému bodu odpovídá i rovnovážná teplota.

Tento bod může ležet v dovolené oblasti, dochází sice k nevratným chemickým a fyzikálním dějům, ale tyto děje probíhají pomalu a zrychlení stárnutí vodiče je zanedbatelné. Za tímto bodem se rychlost reakcí zvyšuje. Hodnotu rovnovážného bodu můžeme spočítat z rovnice:

$$c \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \vartheta) = \left(\gamma + \frac{1}{d^2} \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \right) \cdot E^2, \quad (3-1)$$

kde c je objemová tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), ϑ je teplota ($^{\circ}\text{C}$), t je čas (s), λ je součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), γ je elektrická vodivost ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$), d je tloušťka materiálu (m), ω je úhlová frekvence přiloženého elektrického pole (s^{-1}), C je kapacita materiálu (F), $\operatorname{tg} \delta$ je ztrátový úhel materiálu ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{F}^{-1}$) a E je intenzita přiloženého elektrického pole ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)

Pro rychlost stárnutí izolace není důležité množství vyrobeného tepla, ale především hodnota dosažené teploty. Z tohoto důvodu byly zavedeny maximální dovolené teploty.

Těchto teplot může izolace dosáhnout, aniž by došlo k velké ztrátě životnosti materiálu izolace. [36]

Nepříznivě působí i střídání nízkých a vysokých teplot v krátkých časových intervalech. Při rychlém střídání teplot není snížení životnosti pomocí chemických dějů výrazné, ale projeví se mechanické namáhání izolace, a to z důvodu rychle se měnících rozměrů izolace.

Pro zjištění souvislosti mezi teplotou a dobou života se používají modely teplotního namáhání, které vychází z Montsingerovy rovnice:

$$\tau = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (3-2)$$

kde τ je životnost izolace (hodiny), A a B jsou materiálové konstanty, určené především aktivační energií a T je teplota (K)

Druhou možností, jak stanovit dobu života izolace v závislosti na teplotě, je pomocí Arrheniovy rovnice:

$$\tau = a \cdot e^{\frac{Wa}{RT}}, \quad (3-3)$$

kde Wa je aktivační energie procesu (eV), R je univerzální plynová konstanta ($8,315 \text{ J} \cdot \text{grad}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$), a je konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul a T je absolutní teplota (K) [37]

Množství tepla, které vznikne pomocí dielektrických ztrát v izolaci, je závislé na úhlu δ (tzv. ztrátovému úhlu), který vyjadřuje míru nedokonalosti izolantu. Velikost ztrátového výkonu v soustavě se střídavým napětím se odvodí z výkonu střídavého proudu, když budeme brát izolant jako kondenzátor:

$$P_z = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (3-4)$$

kde pro $\cos \varphi$ platí

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta, \quad (3-5)$$

Poté si vyjádříme efektivní hodnotu proudu jako

$$I = \frac{U}{Z} = U \cdot \omega \cdot C, \quad (3-6)$$

Po zpětném dosazení do rovnice (3-4) dostaneme rovnici

$$P_z = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \cos \varphi = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \sin \delta, \quad (3-7)$$

Protože reálná dielektrika mají malý ztrátový úhel a díky tomu, že pro úhly, které jsou pod 5° platí že $\sin \delta = \text{tg } \delta$, můžeme rovnici přepsat do tohoto tvaru

$$P_z = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg } \delta, \quad (3-8)$$

kde P_z je ztrátový výkon (W), U je napětí (V), I je procházející proud (A), φ je úhel, který svírá napětí a proud ($^\circ$), Z je velikost impedance kondenzátoru (Ω), ω je úhlová frekvence (s^{-1}), C je kapacita náhradního kondenzátoru (F), δ je ztrátový úhel ($^\circ$) a $\tan \delta$ je ztrátový činitel (-). U běžných dielektrických materiálů se ztrátový činitel pohybuje v rozmezí 10^{-4} až 10^{-1} . [35]

3.1.3 Chemická koroze

Při chemické korozi dochází k narušování pláště prvku kabelového souboru nebo přímo k narušení izolace prvku. Nejčastějším typem chemické reakce je oxidace materiálu vzdušným kyslíkem.

Oxidace způsobuje změny ve struktuře materiálu. Množství změn je závislé jak na teplotě, při které se oxidace provádí, ale také i na druhu materiálu. Při oxidaci vznikají zplodiny, které zvyšují elektrickou vodivost a rovněž se zvyšuje ztrátový činitel $\tan \delta$, díky čemuž vzroste teplota daného materiálu. Proto se dá říct, že kdykoliv bude nastávat oxidace, bude na materiál působit i teplené namáhání. Z tohoto důvodu se někdy této oxidaci říká termooxidace. Na druhou stranu má tato oxidace i své výhody. Dochází totiž díky ní k zasítování polymerů, ale jen při nízkých teplotách a malých koncentracích O_2 . [38],[39]

Dalším důsledkem oxidace je trhání makromolekul v organických polymerech. To má za následek snížení mechanické odolnosti i změnu dielektrických vlastností polymerů. [39]

Dalším z prvků, které způsobují chemické poškození materiálů, je ozón (O_3). Ozón vzniká ve vrchních vrstvách atmosféry a poté následně difunduje do jejích nižších vrstev. Ozón také vzniká při výbojové činnosti ve vzduchu a může být jedním z důkazů výskytu částečných výbojů v izolačním materiálu. Působí tak, že rozkládá izolaci a tím snižuje její mechanickou odolnost. [40]

Protože plášť a izolace nejsou složeny pouze z jedné látky, ale obsahují další příměsi, mohou se na jeho povrchu vyskytnout další chemické reakce, ale jejich počet bude zanedbatelný vůči počtu termooxidačních reakcí.

3.1.4 Elektrické stárnutí

Tento typ stárnutí je vyvolán elektrickým namáháním izolace. Podle přiloženého napětí se může jednat o elektrické namáhání střídavým napětím (většinou při frekvenci 50 Hz), stejnosměrným napětím nebo pulzním napětím.

Největšímu namáhání při použití střídavého napětí je vystavena izolace při vrcholové hodnotě tohoto napětí. Neuplatní se zde namáhání při změně polarity napětí, a to z důvodu, že se jedná o pomalý děj.

Při stejnosměrném namáhání vznikají v izolaci prostorové náboje a teče jí vodivostní proud. Tento proud může způsobovat elektrolytickou reakci na povrchu izolace.

Pulzní namáhání je způsobeno pulzními měniči, které se v síti používají k napájení elektrických točivých strojů. Izolace je namáhána střídavým napětím, které ale nemá sinusový průběh. Důsledkem je zvýšený výskyt částečných výbojů a tepelné stárnutí izolace. [41]

Mezi hlavní příčiny elektrického stárnutí izolace prvků kabelového souboru můžeme zařadit částečné výboje, plazivé proudy a výskyt přepětí v síti.

Vliv el. pole na dobu života jakéhokoliv materiálů je modelován pomocí těchto modelů:

Mocninný model

$$\tau_E = k \cdot E^{-n} , \quad (3-9)$$

Exponenciální model

$$\tau_E = e^{-b \cdot E} , \quad (3-10)$$

kde τ_E – je doba života (h), E – intenzita elektrického pole ($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$), k , n , b – konstanty, které je potřeba určit empiricky, e je Eulerovo číslo.

Pro výpočet těchto modelů není potřeba znát všechny procesy, které el. pole způsobuje v materiálu a ani konfiguraci elektrod a rozložení el. pole. I přesto, že tyto modely jsou empirické, dávají poměrně dobré výsledky a doby života souhlasí s realitou. [37]

3.1.4.1 Částečné výboje

Částečný výboj je v normě ČSN EN 60270 definován jako „*lokalizovaný výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče.*“ [42]

Částečné výboje se velmi často rozdělují podle místa jejich vzniku. A to na vnější částečné výboje, vnitřní částečné výboje a povrchové částečné výboje. V kabelovém souboru se mohou vyskytnout všechny tyto druhy, ale jen poslední dva snižují životnost prvků, na kterých vznikly. Z tohoto důvodu budou více rozebrány.

Vnitřní částečné výboje

Vnitřní částečné výboje vznikají díky nehomogenitě v izolačním materiálu prvku. Tyto nehomogenity vznikají nejčastěji při výrobě, silným lokálním elektrickým namáháním nebo nesprávnou montáží. Pokud došlo ke vzniku nehomogenit při výrobě nebo kvůli elektrickému namáhání, jsou nehomogenity většinou miniaturní kapsičky (několik μm), které jsou vyplněny vzduchem nebo plynem a jsou nahodile rozloženy v celém objemu izolace. Při špatné montáži bývají vzduchové kapsičky na rozhraní vnější vodivé vrstvy a řídicí vrstvy prvku, a/nebo mezi řídicí vrstvou a pláštěm prvku.

Pokud bude působit silné střídavé elektrické pole, budou v dutinkách vznikat výboje, protože jejich relativní permitivita je menší než u zdravé části izolace. Dochází k přerozdělování úbytku napětí v opačném poměru jejich permitivit, to způsobí

v kapsičce překročení elektrické pevnosti plynu a následný výboj. Během výboje dojde ke zvýšení úbytku napětí v neporušené části, následně i k vnitřnímu vyrovnání náboje, ale díky tomu, že vzroste kapacita celé izolace, dojde i k odběru náboje z napájecí soustavy. Při odběru vznikají velmi krátké proudové impulsy (v řádech ns, maximálně 1 μ s), které je možné změřit [43]

Výboj v plynové kapsičce způsobí ionizaci plynu a vytvoření vodivého kanálku, kterým se vyrovná potenciál na obou stranách kapsičky. Molekuly, které vznikly ionizací plynu, způsobí chemické a tepelné poškození stěn kapsičky a tím jí budou čím dál víc rozšiřovat. Vzniklé molekuly potřebují na rekombinaci řádově více času, než je doba výboje. Při výboji vznikne také UV záření, které také rozrušuje stěny kapsičky. Postupně se kapsička rozroste do takové velikosti, že vodivý kanálek propojí jádro kabelu se stíněním nebo zemí a dojde k poruše.

Při výboji dojde k vyrovnání potenciálu na obou stranách kapsičky a napětí zaniká. Ale protože stále dochází ke zvyšování napětí na prvku kabelového souboru až do vrcholové hodnoty napětí (vrcholu sinusovky), může se výboj několikrát opakovat, počet opakování je závislý na rychlosti rekombinace plynů v kapsičce. Z tohoto důvodu lze naměřit i několik proudových impulzů během půlperrody. Stejný princip nastává i v záporné části sinusovky, jen se zamění poloha pólů na stěnách kapsičky. [44]

Vzniku vnitřních částečných výbojů nejde předejít, ale je možné je monitorovat pomocí různých detekčních metod (viz kapitoly 4.1.3 a 4.2.3). Díky těmto metodám je možné naplánovat výměnu daného prvku tak, aby byl dopad na funkčnosti elektrizační sítě minimální. [45]

Povrchové částečné výboje

Jedná se o částečné výboje, které vznikají na rozhraní pevného a plynného dielektrika. V kabelovém souboru je najdeme na koncích kabelu s odstraněným stíněním nebo na koncokách a průchodkách. Typickým představitelem těchto částečných výbojů jsou klouzavé výboje.

Hlavní složkou el. pole u klouzavých výbojů je jeho tangenciální složka, díky které se náboje pohybují podél povrchu izolantu. Ale také se uplatňuje i normálová složka el. pole, která je kolmá na izolaci. Z tohoto důvodu vzniká podél povrchu dielektrika el. pole s nerovnoměrně rozloženým napětím, hlavně u ostrých hran a u kratší elektrody. Důsledkem tohoto nerovnoměrného napětí vzniká na rozhraní izolace a polovodivé vrstvy korona.

Dalším projevem klouzavého výboje je pohyb elektrických nábojů, ty se pohybují díky normálové složce el. pole. Náboje jsou tlačeny k povrchu izolace. Pohyb částic je vždy doprovázen třením, proto je izolace ohřívána. Teplota může dosáhnout takové úrovně, že může vznikat lokální tepelná ionizace. Kolem konců dielektrika budou vznikat praménky jisker, které se rychle rozvětvují. Ionizace izolace je nežádoucí, neboť snižuje její tloušťku a zrychluje její stárnutí.

Aby se zabránilo účinkům plazivých výbojů, osazují se konce kabelů, průchodky i koncovky polovodivou řídicí vrstvou, která více rozloží el. pole (viz kapitola 2.2). [44][46]

3.1.4.2 Elektrické a vodní stromečky

Elektrické stromečky jsou problematické jevy, které negativně ovlivňují spolehlivost izolace. Jejich název je odvozen z podoby tvaru stromu nebo keře.

Stromečky vznikají vlivem působení el. pole s dostatečnou intenzitou mezi místy, které mají rozdílný el. potenciál, tím se vytváří mezi nimi vodivá cesta. Dostatečná intenzita el. pole je na místech, kde se nacházejí ostré hrany (například nečistota v izolaci nebo jakýkoliv ostrý hrot, který se nachází v izolaci). Na tomto místě pak vzniká i při jmenovitém napětí lokální výbojová činnost. Dostatečná velikost intenzity pro vznik výbojové činnosti se pro každý materiál liší.

Vodivá cesta má tvar kanálku, který může být dutý a vyplněný plynem, nebo je kanálek tvořen degradačními zplodinami, které vznikly rozkladem izolace. Vzniklé zplodiny jsou velmi často vodivé. Kanálkům se také může říkat větve. Ve vzniklém kanálku (počáteční větvi) začnou působit vnitřní částečné výboje, které budou kanálek rozšiřovat (jak je popsáno výše). Částečné výboje však nepůsobí všemi směry rovnoměrně, a tak mohou růst z počáteční větve do různých stran a vytvářet další větve.

Růst kanálku uvnitř izolace se nejčastěji modeluje pomocí hrotu jehly a uzemněné elektrody a má tři fáze. První fáze nastává v počátku růstu stromečku. Druhá fáze začíná, když dojde k vytvoření první větve stromečku a z této větve pak rostou další. Druhá fáze končí, když stromeček dosáhne uzemněné elektrody. V této fázi nenastane fatální destrukce izolace, protože větvemi nebude téct dostatečný proud (větve mají malou vodivost). V třetí fázi nastává rozvětňování stromečku a existující větve se rozšiřují (na více než 10 μm v průřezu). Pokud se jeden rozšířený kanálek dostane až k uzemněné elektrodě, nastává totální průraz izolantu, tím končí třetí fáze růstu stromečku. [47]

Vodní stromečky se vytvářejí v mnohem slabších el. polích než elektrické stromečky. Podmínkou jejich vzniku je kontakt izolantu s vodním elektrolytem. I když se vodní stromečky vyskytují dosti často, jejich dopad na izolaci ve vlhkých podmínkách je jen velmi malý. Přesto se může stát, že díky nim vznikne elektrický průraz. Může se také stát, že z konce vodního stromečku začne růst stromeček elektrický. [48]

3.1.4.3 Plazivé proudy

Plazivé proudy vznikají díky nečistotám, kondenzované vodě a nízké povrchové rezistivitě izolantů. Elektrická pevnost povrchu izolantů se může pohybovat i do 1 kV/cm, kdežto elektrická pevnost vzduchu v nehomogenním el. poli je 5-10 kV/cm.

Průchod plazivých proudů po povrchu izolace má degradační účinky (tepelné a ionizační) na izolační vrstvu. Nastává tehdy, když je překročena povrchová pevnost

izolace. Nebude se ale jednat o průraz materiálu, ale o přeskok na povrchu. Na povrchu izolace však bude vznikat výbojová čára, která se bude rozšiřovat do doby, než dojde k průrazu nebo k výměně prvku.

Proti účinkům plazivých proudů se používá metoda prodlužování povrchu izolace, díky čemuž dojde k zvýšení elektrické pevnosti povrchu izolace. [44]

3.1.4.4 Přepětí

Přepětí je jev, kdy je v síti větší hodnota napětí, než je jmenovitá hodnota zvýšená o povolenou odchylku (odchylka u sítí VVN, VN a NN je $\pm 10\%$). Rozlišujeme atmosférické přepětí a spínací provozní přepětí.

Atmosférické přepětí je způsobeno nepřímým úderem blesku do části elektrizační soustavy. Obvyklá hodnota přepětí je tři až šestnásobek jmenovitého napětí dané sítě. Tato přepětí se v kabelových sítích vyskytují pouze výjimečně.

Spínací provozní přepětí se v kabelových sítích objevují daleko častěji. Obvyklé je přepětí při zemním spojení, kdy napětí mezi fázemi a zemí vzroste na jeho sdruženou hodnotu. Pokud ale bude zemní spojení přerušované a bude na něm hořet oblouk, může se napětí na zdravých fázích dostat na hodnoty až 4x vyšší, než jsou jejich hodnoty v bezporuchovém stavu. [49]

3.1.5 Poškození způsobené různými typy dopadajícího záření

Na kabelových koncovkách a konektorech závadu může způsobit i dopadající záření, které předává molekulám izolace nebo pláště svoji energii a při jejím dostatečném množství může vyvolat fotochemickou nebo autooxidační reakci, která znehodnocuje materiál izolace i pláště. Největší poškození vyvolává ultrafialové záření a ionizační záření, a to z důvodu jejich velkých energií.

Ultrafialového záření je obsaženo ve slunečním záření jen v malém procentu (asi 5%), ale způsobuje rychlé horšení fyzikálních vlastností či destrukci některých organických látek v materiálu pláště a v izolaci. [50]

Pokud by na konektor nebo na koncovku dopadalo ionizující záření, bude toto záření způsobovat generování iontů a excitovaných molekul a vznik pohyblivých elektronů. Ionty a excitované molekuly budou trvale měnit chemické, mechanické a elektrické vlastnosti materiálu, kdežto pohyblivé elektrony změní elektrické vlastnosti jen dočasně. [51]

Na prvky kabelového souboru působí také jiné druhy dopadajícího záření jako např. mikrovlnné nebo infračervené záření, ale obvykle tyto typy záření nezpůsobují velkou ztrátu životnosti.

3.1.6 Mechanické namáhání a poškození

Prvky kabelového souboru jsou mechanicky namáhány po celý svůj život. Největšímu mechanickému namáhání jsou prvky vystaveny jak při dopravě (vibrace a otřesy), tak i poté během pokládky a při svém provozu. [52]

Mechanické namáhání může vést k poškození izolace prvku, jako je například její natržení, nebo i k samotnému přerušení žil vlivem dynamických sil. Ale nejčastější mechanická poškození nastávají při výkopových pracech, kdy kabel není vyznačen v územních plánech nebo je v plánech vyznačen na jiném místě, nebo pracovníci nedávají pozor a kabel překopnou. K mechanickému poškození izolace může dojít už i během samotné pokládky kabelu, kdy není uložen do pískového lože nebo je pískové lože malé. Pak dochází při pohybu vrstev půdy k natlačení kamenů na izolaci kabelu a k jejímu poškození. Poškození izolace kabelu může také vzniknout při vlečení kabelu při pokládce, kdy se musí dbát na dodržení maximálního namáhání v tahu. Při nedodržení postupu se může stát, že kabel je přetržen, nebo „pouze“ dojde k plastické deformaci v určitém místě a k zeslabení jeho izolace.

Při provozu mohou být izolace prvků kabelových souborů mechanicky namáhány dynamickými silami při poruchách, kmitočtem proudu, přechodnými jevy při zapínání motorů nebo při výpadku synchronních strojů ze synchronismu.

Mechanické poškození může nastat i u spojek, koncovek a konektorů. U spojek se často vyskytuje, že se do ní vkládá neočištěný kabel, nebo je přehřátá izolace (když se používá smršťování za tepla), dále špatná příprava polovodivé vrstvy nebo poškození izolace pod vodivou vrstvou. U spojek se lze setkat s pohybem před vytvrnutím nebo nedostatečným vytvrnutím spojky. A u konektorů je nejčastější závadou nedodržení kroutících momentů při instalaci. [52]

Existuje velké množství modelů, jak mechanické namáhání ovlivňuje dobu života jednotlivých materiálů. Například exponenciální model, který vychází z teorie mechanismu růstu trhlin při tahovém napětí, nebo Decht'arův a Usipovovův model vycházející z představ o úloze vakancí. [37]

3.1.7 Stárnutí izolace při současném působení více druhů namáhání

Ve valné většině případů se stává, že na materiál izolace prvků kabelového souboru působí více druhů namáhání současně. Výsledná ztráta životnosti materiálu nemusí být jen jejich prostý součet.

Interakce dvou mechanismů stárnutí může být přímá nebo nepřímá. U přímé interakce se působící mechanismy navzájem velmi ovlivňují, a proto mají úplně odlišné působení, než kdyby působily samostatně. U nepřímé interakce působí současně několik druhů namáhání, ale jejich působení zůstává stejné jako kdyby působily jednotlivě, ale k ovlivnění dojde prostřednictvím jejich účinků. [37]

Modely, které uvažují stárnutí materiálu při působení více druhů namáhání, jsou například Simoniho model, Ramuův model, Fallouův model a Crineho model. [41]

3.2 Poruchy kabelového souboru

Poruchy jsou vždy způsobeny alespoň jednou, ale obvykle více závadami. Poruchy můžeme rozdělit na průraz izolace, a na nízkoohmové a vysokoohmové poruchy.

3.2.1 Průraz izolace prvku souboru

Průraz izolace prvku kabelového souboru nastává v případě, že el. pevnost pevné či kapalné izolace už není dostatečná, aby vydržela potřebnou intenzitu el. pole. Při průrazu izolace dojde k nevratné změně jejích fyzikálních parametrů a k vytvoření trvalé vodivé cesty. Impedance této vodivé cesty poté rozhoduje, zda se jedná o nízko- nebo vysokoohmovou poruchu.

3.2.2 Nízkoohmové poruchy

Nízkoohmové poruchy neboli zkratky nastávají, jestliže velikost impedance postižené žíly (fáze) vůči zemi nebo vůči o ostatním fázím je menší než 100Ω . Dle normy ČSN EN 60909-0 je zkrat definován jako „náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule“ [53]. Při většině zkratů bude vodivé spojení, které bylo vytvořeno průrazem nebo mechanickým poškozením izolace, tvořeno el. obloukem, protože kovový zkrat je u prvků kabelového souboru velmi nepravděpodobný.

U kabelového vedení nejčastěji vzniká zkrat mezi vodivým jádrem a stíněním nebo přímo zemí. Z elektrického hlediska se jedná o totéž. Jediným rozdílem bude impedance zkratové poruchy, která se podle normy na výpočet zkratu ČSN EN 60909-0 stejně neuvažuje. O něco méně častěji se vykytuje zkrat mezi dvěma žilami.

Určení nejčastějšího typu zkratu v kabelovém souboru závisí na způsobu uzemnění nulových bodů transformátorů.

U kabelových souborů v síti NN a VVN, ve kterých jsou středy transformátorů účinně uzemněny, to bude jednofázový zkrat, který bude velmi rychle přecházet do třífázového zkratu, a to z důvodu, že při zkratu dojde k vývinu velkého množství tepla. To způsobí velké tepelné namáhání izolací nepoškozených žil a rychlou degradaci izolace.

Nejčastějšími poruchami v kabelové síti s neúčinně uzemněným středem transformátoru jsou zemní spojení a jednofázový zkrat. Jednofázový zkrat bude vznikat v sítích, které budou uzemněné pomocí odporníku.

Zemní spojení je speciální typ zkratu, který nastává v izolovaných nebo kompenzovaných sítích VN (viz kapitola 1.2.2). Zařadit zemní spojení podle velikosti jeho impedance je velice těžké, protože hodnota impedance poruchy je většinou neznámá a může se pohybovat od několika ohmů až po jednotky tisíc ohmů.

3.2.3 Vysokoohmové poruchy

Vysokoohmové poruchy nastávají, když se neúmyslně spojí jádro vodiče s materiálem, který má velkou rezistivitu. Tyto poruchy můžeme rozdělit na aktivní, které nastávají, když se přeruší vodič venkovního vedení a dotkne se země s vysokou hodnotou odporu, a pasivní, které vznikají v kabelových sítích, kdy se postupně zhoršuje izolace. Proud, který prochází touto poruchou, se výrazně neodlišuje od provozních hodnot a z tohoto důvodu jsou velmi těžko rozeznatelné nadproudovými ochranami. [54]

Tyto poruchy mají hodnotu impedance postižené žíly vůči zemi nebo další žíle v řádově ve stovkách $k\Omega$ a více. Vysokoohmové poruchy na kabelovém souboru se budou projevovat úplným přerušением vodivé části kabelu.

Další příčinou, která se může vyskytnout u všech prvků souboru, je stárnutí izolace, kdy se její tloušťka zmenší natolik, že se na ní výrazně projeví svodový proud.

Přerušением vodivé části nebo celého kabelu může dojít při výkopových pracích, dále oxidací díky přístupu vody nebo přepálením žíly vlivem oblouku. Mezi vodivými konci nebo mezi koncem a zemí vznikne vzduchová mezera, která má velkou elektrickou pevnost a díky tomu se tato mezera bude jevit jako velký odpor. Může se také stát, že vrcholové hodnoty okamžitého napětí mohou způsobit mezi jednotlivými částmi přeskoky nebo i trvalé průrazy.

4. DIAGNOSTIKA ZÁVADOVÝCH STAVŮ NA KABELOVÉM SOUBORU

Pojem „diagnostika“ lze definovat jako: „*obor zabývající se metodami a prostředky vhodnými ke zjišťování stavu, vlastností a parametrů objektů*“. Diagnostikou se dá též označit i samotný proces zjišťování stavu vlastností a parametrů měřeného objektu. [55]

Diagnostiku kabelového souboru je možné provést dvěma způsoby. Prvním způsobem je on-line diagnostika a druhý způsob je off-line diagnostika. Dále pak off-line diagnostiku můžeme rozdělit na diagnostiku on-site a off-site.

Pokud provádíme diagnostiku, je nutné, aby způsob jejího měření neměl, pokud možno, žádné nebo pouze minimální důsledky na zkrácení životnosti kabelového souboru.

Diagnostikování on-line znamená, že diagnostika se provádí při normálním provozu daného prvku. Tento způsob diagnostiky je možné provádět trvale, kdy jsou použité snímače, které jsou stále nainstalovány na daném prvku a kontinuálně zapisují data, nebo se mohou pouze použít snímače, které jsou přenosné, a tudíž se dají použít na více zařízeních. Z tohoto můžeme vyvodit, že použití stále on-line diagnostiky bude dražší, protože je nutné tyto snímače zakoupit pro všechny měřené prvky. Bude ale k dispozici dlouhodobý záznam, ze kterého bude možné vypočítávat postupné změny. Naopak použití přenosných snímačů bude levnější, protože jich nebude potřeba takové množství, ale budeme mít pouze znalosti o prvku v časových bodech měření.

Diagnostika off-line je prováděna při nezatíženém prvku, který je odpojen od elektrizační soustavy. Aby v době, kdy se vykonává diagnostika kabelového souboru, nebyli odběratelé bez dodávky el. energie, musí se daná síť překonfigurovat.

Diagnostika off-line on-site (dále jen on-site) značí, že tuto diagnostiku můžeme provést na místě, kde se daný prvek nachází. Veškeré potřebné měřicí přístroje a zdroje proudu a napětí jsou přivezeny ke zkoušenému prvku.

Tyto výše uvedené metody jsou považovány za nedestruktivní.

V diagnostice off-line off-site (dále jen on off-site) se odeberou vzorky kabelového souboru, které jsou dále vyhodnocovány v laboratoři. Protože se odebírají vzorky, je tato metoda považována za destruktivní. Dalšími typy diagnostiky off-site jsou tzv. typové a kusové zkoušky. Tyto zkoušky se provádějí před začátkem prodeje daného prvku a jejich provedení slouží k ověření praktického použití daného komponentu. Výhodou této metody je, že se provádí v kontrolovaných prostředích, kde je nízká úroveň šumu a nežádoucího rušení a jsou k dispozici velice přesné a citlivé přístroje. [56]

Diagnostiku můžeme ještě rozlišit na diagnostiku výchozí a preventivní. Provedení výchozí diagnostiky je přikázáno normami a musí se provést při uvádění kabelového

souboru do provozu. Preventivní diagnostika se provádí podle řádu preventivní údržby a má za cíl zjistit stav daného prvku, a tak zlepšit spolehlivost chodu. [56]

Při vyhodnocování změřených hodnot při diagnostice je důležité vzít v potaz okolní podmínky i samotné stáří kabelového souboru, protože ty mohou výrazně ovlivnit výsledky diagnostiky. Je to z důvodu, že při stárnutí jednotlivých komponentů se mění jejich elektrické vlastnosti. [57]

Dále se bude tato kapitola zabývat diagnostickými metodami on-line a on-site.

4.1 On-line diagnostické metody

Veškeré on-line diagnostické metody jsou prováděny z preventivního hlediska. Většinou se pro tyto metody používají přenosné snímače jako jsou termokamery, Rogowského cívky nebo ultrazvukové mikrofony.

4.1.1 Měření teploty

Touto metodou lze vyhodnotit stav prvků kabelového souboru, a to měřením nebo sledováním povrchové teploty. Touto metodou je možné detekovat vysoký odpor konektoru a neobvyklé zahřívání části příslušenství v důsledku lokalizovaných dielektrických ztrát.

Teplotní měření se provádí infračervenou kamerou. Při vyhodnocování je nutné vzít v úvahu zatížení kabelu a ostatních prvků kabelového souboru, protože teplo vzniklé průchodem proudu může ovlivnit měření. V případě, že se kolem spojů používají ochranné pásy proti el. oblouku, není tepelné monitorování obvykle možné. [57]

4.1.2 Použití Rogowského cívky

Rogowského cívka je proudový transformátor, který nemá magnetické jádro. Jeho jádro může být tvořeno pružnou plastovou nebo pryžovou trubicí, na kterou je navinuto toroidní vinutí. Díky pružnému jádru je možné cívku ohýbat tak, aby se přizpůsobila těsným prostorám. [58]

Pro co nejlepší potlačení vnějšího rušení se používají tři typy navinutí: 1) Měděný drát je ovinut kolem konce jádra, konec vinutí prochází zpět středem dutého vzduchového jádra a vrací se do stejné polohy jako druhý konec drátu. Tato konstrukce umožňuje cívku otevírat a zavírat pro její snazší instalaci kolem prvků kabelového souboru. 2) Nad první vinutí je navinuto druhé vinutí s opačným směrem návinu než první vinutí. 3) Dvě opačně navinuté cívky, které mají stejný tvar a počet závitů budou umístěny vedle sebe a vinutí budou zapojena sériově. [59]

Výstupem z Rogowského cívky není proud, jak je obvyklé u proudových transformátorů, ale napětí. Jeho velikost je daná derivací měřeného proudu za čas, ale má fázový posun 90° (napětí předbíhá proud). Zpracování výstupního napětí cívky se provádí pomocí integrace. Výsledné napětí je přímo úměrné měřenému proudu. Jako integrátor je

možné použít RC článek nebo použít elektronickou integraci. Při vhodně zvoleném integrátoru je možné změřit velikosti proudů až tisíce kiloampér.

Horní hranice frekvenčního rozsahu je určena vlastní rezonancí cívky (závisí na vzájemné indukčnosti) a může být v řádech jednotek MHz. Dolní hranice závisí na vlastnostech použitého integrátoru. [60]

Rogowského cívku lze použít jako snímač částečných výbojů místo dosud používaného vazebního kondenzátoru. Její výhodou je její snadné připnutí k měřenému obvodu, u kterého se musí pouze zajistit, aby stínění nebylo propojeno se zemí, nemá saturaci (má vzduchové jádro) a má velkou linearitu převodu.

Nevýhodou je, že Rogowského cívka musí být speciálně upravena, aby její frekvenční rozsah byl až do stovek MHz. [61]

On-line měřením částečných výbojů je věnována další podkapitola.

4.1.3 Částečné výboje

Diagnostické metody využívající částečné výboje (dále jen PD, z anglického partial discharges) se zaměřují na měření jejich důležitých parametrů jako jsou iniciační a zánikové napětí PD, velikost náboje proudových impulzů PD, vzory PD a jejich umístění v měřeném kabelovém souboru. Měření PD je možné použít u všech prvků kabelového souboru se všemi typy izolace.

Z důvodu, že PD jsou náhodný proces, který vyžaduje například dostatečně nízký tlak v dutince, vhodný iniciační elektron a dostatečně silné elektrické pole, nemusí výsledek bez PD znamenat, že dutinka v izolaci neexistuje. Dutinka může existovat, ale nedošlo v ní k výboji. Toto je vážný problém pro krátkodobá měření nebo pro měření s nízkou frekvencí. Tento problém může způsobit velké rozptyly mezi hodnotami naměřenými při různých měřeních nebo při měření identických kabelových souborů v podobných podmínkách.

Dalším problémem je identifikace závad, které vznikly při dielektrických ztrátách, které nejsou spojeny s výrazným elektrickým nebo vodním stromečkem nebo dutinkou. Tyto ztráty mohou být diskrétní nebo distribuované v celé izolaci kabelu.

Pro online diagnostiku PD je možné jednak použít neelektrické detekční metody (např. ultrazvukové mikrofony) ale i také elektrické snímače. Jako zdroj se používá pracovní napětí sítě, ke které je kabelový soubor připojen. [57]

4.1.3.1 Akustická metoda

Pokud dojde k částečnému výboji, dojde k okamžitému uvolnění energie. Toto uvolnění energie má za následek mechanické vlnění, které se šíří materiály zařízení, ve kterém k němu došlo. Místo PD tedy působí jako zdroj akustických vln. Vlny se šíří z místa PD a lze je detekovat pomocí externích mikrofonů. Vlnová frekvence akustických vln leží v ultrazvukové oblasti.

Akustické metody měření PD zvyšují možnosti použití detekce PD, protože je lze použít tam, kde je příliš velké elektromagnetické rušení pro použití elektrických snímačů. A navíc mohou ještě vylepšit získané informace o PD.

Akustické metody nejsou příliš vhodné pro detekci výbojů v kabelech z důvodu velkého snížení citlivosti se vzdáleností od zdroje. V důsledku toho musí být akustický senzor v kontaktu s kabelem v blízkosti zdroje PD, aby byla zajištěna přiměřená citlivost. Akustické metody se proto obvykle používají k detekci PD v koncovkách, spojích a úsecích kabelů, které jsou přístupné pro přímý kontakt se zařízením. Místo kontaktu musí být mimo jejich aktivní oblast. [57]

4.1.3.2 Měření pomocí elektrických snímačů

Při této metodě PD se měří velikost detekovaných signálů a jejich vzory, které mohou pomoci při identifikaci typu poruchy, která signál způsobila. K měření se používají snímače, které musí být umístěny na kabelový soubor, který není stíněn (nebo stínění je odpojeno) a v takové vzdálenosti, aby se zaručila detekce. Z tohoto vyplývá, že není testován celý kabelový soubor, jen část mezi snímači.

Výsledky zjištěné v jedné fázi je možné porovnat s výsledky ze sousedních fází, které mají stejnou konfiguraci a při kontinuálním monitoringu je možné provést analýzu trendu.

Nevýhodou této metody je, že některé závady nezpůsobí vznik PD při měřicím napětí, ale mohou vést k rychlé destrukci izolace. A naopak některé závady budou vykazovat PD, ale ty nemusí nutně vést k poruše izolace. Dále pak vstupy z více snímačů zvyšují složitost měřicí metody. Další, velkou nevýhodou této metody je, že je nutné co nejvíce potlačit šum, protože na tom závisí detekce a přesnost měření PD. Nebo je možnost použít měřicí techniky, která dokáže detekovat PD, které jsou ukryté v šumu. [57]

Příkladem může být použití metody diferenciální elektromagnetické sondy. Diferenciální sonda je tvořena sériově zapojenou dvojicí induktivních snímačů, které jsou zapojeny na krajích měřeného úseku. Pokud projde proudový impuls oběma sondami ve stejném směru, výstupní signály ze sond se vyruší. Je to z důvodu, že tento impuls byl způsoben mimo měřený objekt a z pohledu měření se jedná o rušení. V případě, že proudový impuls projde sondami v opačném směru, budou se výstupní signály sčítat a impuls se zaznamená.

4.2 On-site diagnostické metody

Tyto metody se mohou používat jak po pokládce nového kabelového vedení, kdy se zjišťuje, zda je kabelové vedení správně namontováno, tak i před opětovným zapojením kabelového vedení do elektrizační soustavy.

On-line diagnostické metody je možné provádět i při diagnostice on-site.

4.2.1 Výdržné napětí

Při výdržných testech je na měřený objekt přikládáno jmenovité nebo vyšší napětí po předem stanovenou dobu. Test je možné použít pro všechny prvky kabelových souborů. Tento typ testu lze rozdělit podle toho, co vše je sledováno.

Pokud je sledována pouze schopnost prvku vydržet působící napětí bez poškození nebo průrazu, většinou se jedná o jednoduchý test pomocí výdržného napětí. Jedná se o snadný test s jednoduchým vyhodnocením. Jeho výsledkem je pouze verdikt, jestli prvek vydržel nebo ne. Tento test se provádí z důvodu, že takto způsobená porucha neovlivní dodávku zákazníkům a výsledná oprava závady je levnější. Případné místo poruchy je vyhledáno pomocí lokátorů. Nevýhodou jednoduchého testu je, že neodhalí některé chyby, které vznikly špatnou montáží.

Pokud bude při testu sledován alespoň jeden další atribut, který se bude podílet na vyhodnocení, zda prvek vyhověl či nikoliv, označuje se tento test jako monitorovaný. Atributem mohou být např. částečné výboje nebo $tg \delta$.

Pro tuto zkoušku je možné použít několik typů napětí. Jejich velikost se pohybuje nejčastěji mezi 1,5 až 3násobkem jmenovitého napětí. Používané typy napětí jsou střídavé napětí (AC – Alternative Current) s frekvencí od 20 Hz do 300 Hz, napětí s nízkou frekvencí (VLF – Very Low frequency), kdy obvyklá frekvence je 0,01 Hz, tlumené střídavé napětí (DAC – damped AC), frekvence se zde pohybuje mezi 20–500 Hz a stejnosměrné napětí (DC – direct current).

Výhodou testovacího AC napětí je, že toto napětí má stejný průběh jako napětí, které se používá v síti, a jde použít na všechny typy izolačních poruch. Nevýhodou je, že dlouhé kabely jsou těžší na změření.

VLF napětí se používá z důvodu, že při jeho působení se rychleji projevují některé druhy poruch než při napájení síťovou frekvencí. Při sinusovém průběhu je možnost výdržný test spojit s testem na částečné výboje nebo na ztrátový úhel. Nevýhodou použití tohoto typu napětí je, že výsledky se liší od výsledků při síťové frekvenci.

Zdroj DAC je tvořen stejnosměrným zdrojem, cívku a vypínačem. Při jeho použití se nejprve stejnosměrným napětím nabije připojený kabel na zvolené zkušební napětí, poté se velice rychle sepne vypínač, který připojí do obvodu cívku. Při připojení dochází k přechodnému jevu a vytvoření LC rezonance. Díky těmto jevům dochází k aperiodickému vybíjecímu ději. Výsledky testů jsou porovnatelné s výsledky naměřenými při síťové frekvenci. Nevýhodou je, že u různých kabelů se bude lišit frekvence DAC. Je to proto, že rozdílné kabely mají různou kapacitu a při použití fixní cívky se bude lišit frekvence rezonance vytvořeného LC obvodu.

Zdroje AC, DAC i VLF napětí je možné použít při testování jakéhokoliv prvku z kabelového souboru.

DC napětí se pro kabely s vytlačovanou XLPE izolací nepoužívá z důvodu, že se v kabelu vytváří elektrický náboj, který může vést k poruše kabelu. Ale je možné ho použít u kabelů s papírovou izolací.

Při použití této diagnostické metody je nutné uvažovat, že při použití vyššího napětí než je jmenovitá hodnota, se může začít poškozovat izolace, aniž by do konce testu došlo k jejímu průrazu. Takto oslabené místo by pak mohlo později selhat i při normálním provozu. Proto je potřeba vybalancovat schopnost detekce a míru poškození izolace. [57]

Výdržná zkouška střídavým napětím

Jedná se o jeden z nejběžnějších typů napěťových zkoušek. Při této zkoušce je použito napětí s frekvencí mezi 45 až 65 Hz. Toto pásmo frekvencí je obecně nazýváno jako síťová frekvence. Pro zvláštní typy střídavých výdržných zkoušek může být použita jiná frekvence. Velikosti frekvencí u těchto typů zkoušek se věnuje norma ČSN EN 60060-3.

Tvar přiloženého napětí musí mít tvar sinusovky a rozdíl kladných a záporných amplitud musí být menší než 2 %. Dále je také nutné, aby se poměr efektivní a vrcholové hodnoty pohyboval s maximální odchylkou $\pm 5\%$ od hodnoty $\sqrt{2}$. Pokud prováděná zkouška trvá 60 sekund a méně, musí být efektivní hodnota zkušebního napětí v toleranci $\pm 1\%$ od určené napěťové hladiny. Pokud zkouška trvá více než 60 sekund, tak se efektivní hodnota napětí musí po celou dobu zkoušky pohybovat v rozmezí $\pm 3\%$ od zadané hodnoty.

Nejvíce typickou střídavou výdržnou zkouškou je tzv. krátkodobá (minutová) výdržná zkouška. Ale je možné se také setkat se zkouškami, které mohou trvat 15, 60, 240 minut nebo i 24 hodin. Tyto zkoušky se pak nazývají dlouhodobé výdržné zkoušky.

Na testovaný objekt se musí přikládat dostatečně nízké napětí, aby nedošlo k přepětí, které by mohlo být způsobeno spínacími procesy. Napětí z této nízké hladiny by se mělo zvyšovat dostatečně pomalu, aby bylo možné ho zapisovat, ale s dostatečnou rychlostí, aby se zamezilo zbytečnému prodlužování elektrického namáhání kolem zadané hodnoty zkušebního napětí. To samé platí i při snižování napětí po provedení zkoušky. Je doporučováno, aby růst napětí byl 2 % ze zadané zkušební hladiny. To v realitě odpovídá rychlostem zvyšování a snižování od 100 V/s do 1kV/s. Při nedodržení rychlosti může dojít k poškození měřeného objektu nebo ke zkreslení výsledků.

Zkouška je úspěšná, pokud během ní nedojde k průrazu nebo přeskoku na měřeném objektu. [62]

4.2.2 Dielektrická odezva

Do této kategorie se řadí měření $tg \delta$, DC svodového proudu, zotavovacího napětí, polarizačního a depolarizačního proudu a spektroskopické metody. Všechny tyto metody slouží k posouzení celkového stavu celého kabelového souboru, hlavně k posouzení stavu jeho izolace. Měření je možné provést s rozdílnými frekvencemi nebo pro různé časové úseky. Měřením dielektrické odezvy lze zjistit účinky jednotlivých vad, ale nelze tuto metodu použít pro jejich lokalizaci.

Měřené hodnoty jsou ovlivněny stavem prvků kabelového souboru (např. jejich stářím, kontaminací nebo vnikem vody). Při interpretaci měření se musí vzít v úvahu i chování řídicích vrstev, které mají nelineární ztrátové charakteristiky. [57]

4.2.2.1 Měření ztrátového činitele $tg \delta$

Ztrátový činitel vzrůstá se stářím izolace, a proto se může použít měření ztrátového činitele $tg \delta$ jako diagnostická metoda.

Ztrátový činitel při dané úhlové frekvenci a napětí lze definovat jako poměr odporového a kapacitního proudu

$$tg \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U/(1/\omega C)} = \frac{1}{\omega RC}, \quad (4-1)$$

kde $tg \delta$ značí ztrátový činitel (-), I_R je odporový proud (A), I_C je kapacitní proud (A), U je použité napětí (V), R je odpor izolace testovaného kabelového souboru (Ω), C je kapacita izolace testovaného kabelového souboru (F) a ω je úhlová frekvence (s^{-1})

Úhel δ je úhel, který vzniká mezi fázorem napětí a proudu při přiložení AC napětí. Používá se k rozkladu celkového proudu na nabíjecí složku I_{char} a ztrátovou složku I_D , tangenta úhlu δ je pak poměr ztrátového proudu k nabíjecímu proudu (tzv. ztrátový činitel)

$$tg \delta = \frac{I_D}{I_{char}} = \frac{\sqrt{I_T^2 - I_{char}^2}}{I_{char}}, \quad (4-2)$$

kde I_D je ztrátový složka celkového proudu (A), I_{char} je nabíjecí složka celkového proudu (A) a I_T je celkový proud (A).

Pro měření je možné použít napájecí napětí AC, DAC i VLF, ale pak nelze výsledky mezi sebou porovnat, protože každé používá jinou frekvenci. Pokud se použije DAC napětí, které bude mít přirozeně vzniklou frekvenci, je možné z výsledků měření mimo jiné vypočítat i kapacitu měřeného prvku.

Nejlepší využití této metody je v případě, kdy můžeme porovnat změřené hodnoty s hodnotami, které byly změřené hned po výrobě. Je to z důvodu, že se nebude znát jen velikost ztrátového činitele, ale i jeho přírůstek.

Jak je vidět z rovnice (4-1), ztrátový činitel má být nezávislý na napětí i čase. Pokud se při testu pomocí dvou různých napětí nebo při testování v různých časech změní, může to indikovat, že izolace daného systému stárne například vznikem vodních stromečků. [57]

4.2.2.2 Měření polarizačních a depolarizačních proudů

Tento test se provádí pomocí přiložení relativně nízkého DC napětí na zkoumaný kabelový soubor po předem stanovený čas. Pak je kabelový systém na určitý časový úsek zkratován. Při zkratování se vybíjí kapacitní (depolarizační) proud, který je měřen. Délka měření vybíjecího proudu je obvykle stejná jako doba nabíjení.

Měřenou veličinou při testu je el. proud. Proud odebíraný během doby, kdy je přiložené napětí, se nazývá nabíjecí proud. Tento proud je složen z absorpčního proudu, který velice rychle odezní, když napětí dosáhne testovací úrovně, a polarizačního proudu, který odeznívá pomaleji. Podobně je to i u vybíjecího proudu. Desorpční proud odeznívá rychleji než depolarizační proud. Depolarizační proud vzniká z relaxace procesu polarizace poté, co bylo napětí odebráno.

Pro vyhodnocení této metody je možné použít polarizační a depolarizační proudy, kterými se monitoruje degradace izolace. Dalšími způsoby vyhodnocení jsou např. porovnání celkového polarizačního proudu (tzn. součet hodnot polarizačního a depolarizačního proudu) na jednotku délky u nového a stárnuícího kabelového souboru nebo porovnání hodnot depolarizačního proudu při dvou různých napětích, kdy zdvojnásobení napětí by mělo mít za následek dvojnásobný proud. Což u kabelového souboru, ve kterém se projevilo stárnutí, neplatí a poměr je větší než 2. Mezi další zajímavé vyhodnocení patří výpočet polarizačního indexu. Ten se obvykle vypočte z podílu hodnoty rezistivity, kterou izolace má 10 minut po přiložení napětí ku hodnotě rezistivity 1 minutu po přiložení napětí. Je možné použít i jiné časové intervaly, ale výsledný poměr by měl být 1 nebo vyšší. Pokud je hodnota menší než 1, značí to, že izolace kabelového souboru je v abnormálním stavu.

Výhodou této metody je, že je velmi snadná a jde ji zautomatizovat. Nevýhodou je, že při měření malých proudů mohou být tyto proudy ovlivněny okolím, stínění kabelu obvykle musí být neuzemněné, dále také kabel musí mít dostatečnou délku, aby proudy vůbec byly měřitelné a kabel musí být před tímto měřením napájený, aby byla zajištěna dostatečná polarizace.

I když bylo výše zmíněno, že se na kabelovém souboru, který má izolaci z XLPE, se neprovádí diagnostika DC napětím, tato metoda má výjimku z důvodu, že je kabelový soubor zkratován, díky čemuž se vybíjí i nebezpečný el. náboj, který obvykle zůstává po zkouškách DC napětí. [57]

4.2.2.3 Dielektrická spektroskopie

Při této metodě se měří reálné a imaginární složky svodového proudu izolací kabelového souboru ve frekvenčním rozsahu 0,001 Hz až 100 Hz. S těmito složkami proudu je možné vypočítat ztrátový činitel (jak bylo uvedeno v kapitole 4.2.2.1). Z výpočtu ztrátového činitele pro různou frekvenci jsou k dispozici další informace o stavu izolace.

Ztrátový činitel je vyšší pro nižší frekvence, a proto při použití těchto nižších frekvencí je možno výrazně zmenšit velikost napájecího zdroje ve srovnání se zdroji pro

frekvenci 50/60 Hz. Získaná data jsou v podstatě frekvenční spektra, která obsahují mnoho informací a z tohoto důvodu vyžadují pečlivější výklad.

Dielektrickou spektroskopii je možné provést i v časové oblasti a převést jí do grafu závislosti ztrátového činitele na frekvenci pomocí Hamonovy aproximace. Toto ale lze použít pouze pro lineární systémy, ve kterých není napěťová závislost dielektrické odezvy. [57]

4.2.3 Částeční výboje

Stejně jako diagnostika PD on-line, tak i diagnostika on-site měří důležité parametry jako jsou počáteční a zánikové napětí PD, velikost proudových impulzů PD, vzory PD a jejich umístění v měřeném kabelovém souboru. Jedinou změnou je, že se používá vyšší napětí, než je napětí v síti. Vyšší napětí je používáno pro zjištění, zda nevznikají izolační vady, u kterých je počáteční napětí PD nad provozním napětím. Toto je měřeno proto, že tyto vady mohou způsobit poruchu izolace při dočasném přepětí. Avšak příliš velké napětí může způsobit PD, které by při normálních hodnotách napětí nevznikly.

Na rozdíl od on-line metody měření PD může metoda měření PD on-site probíhat z jednoho bodu. Ale pokud je kabelový soubor rozvětvený, je nutné použít několik měřících jednotek, proto je metoda více časově náročná. Tato měření se nazývají globální. Globální metody jsou založeny na přímých elektrických metodách. Přímé elektrické metody jsou metody, které měří proudové impulzy, které vznikají částečnými výboji. [57]

Jednou z nejčastěji používaných globálních metod je globální galvanická metoda, která měří PD pomocí měřící impedance. Impedance je realizovaná jako RLC článek, jehož úkolem je také odfiltrovat superponované pulzy PD z frekvence napájecího zdroje. Podle místa zapojení impedance se rozeznávají 3 typy zapojení.

Pokud je měřený objekt uzemněn tak, že uzemnění se nedá rozpojit nebo objekt má velkou kapacitu, používá se měřící obvod, kdy je měřící impedance zapojena do stejné větve jako vazební kondenzátor a měřený objekt je zapojen paralelně k ní. Výhodou tohoto zapojení, je že pokud dojde k průrazu měřeného objektu, nepoškodí se detekční obvod.

Druhou možností, která se používá u objektů, které lze odpojit od uzemnění, je použití obvodu, ve kterém je testovaný objekt zapojen do série s měřící impedancí. Výhoda této možnosti spočívá ve větší citlivosti měření, a to díky vlivu rozptylových kapacit, které jsou paralelně k vazebnímu kondenzátoru. Pokud je kapacita obvodu větší než kapacita měřeného obvodu, nemusí se do obvodu zařazovat vazební kondenzátor.

Třetí možností zapojení je můstkové zapojení. To dokáže potlačit vliv vnějšího rušení. V můstku jsou dvě individuálně nastavitelné měřící impedance, na kterých se měří rozdílové proudové impulzy. K jedné měřící impedanci je připojen měřený objekt, k druhé vazební kondenzátor nebo jiný měřený objekt se známou hladinou PD a s podobnou kapacitou, jakou má měřený objekt. [63]

Nevýhodou je, že odpojením souboru od sítě je umožněno vychladnutí souboru, což může způsobit zánik dutinek a ztuhnutí vzniklých tekutin a soubor se tak bude jevit bez PD. Dále pak dlouhé kabely mohou deformovat a zeslabovat tvar impulzů PD, to může ztěžovat identifikaci typu PD a místo jeho vzniku. Důležité je také dobře zvolit délku měření, protože při příliš dlouhém měření může zvýšené napětí způsobit poruchu, ale naopak při příliš krátkém čase se nemusí některé závady projevit. [57]

Při měření PD on-site je možné použít i jiné typy napájecího napětí než sinusový průběh s 50 Hz. Je možné také použít VLF nebo DAC napětí.

4.2.4 Reflektometrie v časové oblasti

Reflektometrie v časové oblasti (v angličtině time-domain reflektometry – TDR) se používá k lokalizaci a charakterizaci změn impedance v kabelovém souboru. Tyto změny impedance mohou být způsobeny například poruchami, poškozenými nulovými vodiči, pronikáním vysoce vodivé vody do izolačního materiálu spojky nebo konektory s vysokým odporem.

Tyto a další nespojitosti v obvodu budou odrážet část impulsu, který na ně dopadne, zpět ke zdroji. Umístění těchto nespojitostí lze určit stejným způsobem jako konec obvodu. Tvar odražených pulzů na displeji přístroje pomáhá operátorovi určit, o jaké nespojitosti se jedná.

Velikost odrazu na nespojitosti lze vypočítat pomocí koeficientu odrazu

$$\rho = \frac{Z_d - Z_o}{Z_d + Z_o}, \quad (4-3)$$

kde ρ je koeficient odrazu (-), Z_d je impedance nespojitosti (Ω) a Z_o je charakteristická impedance kabelu (Ω).

A zároveň platí

$$V_{ref} = \rho \cdot V_{inc}, \quad (4-4)$$

kde V_{ref} je velikost odraženého napětí (V) a V_{inc} je hodnota dopadajícího napětí na nespojitost (V). [57]

Mezi vodič a izolační stínění kabelového obvodu se aplikuje nízkonapěťový impuls s rychlou dobou náběhu. Jak impuls prochází kabelovým obvodem, vznikají odrazy v důsledku nesouladu impedance obvodu, například v kabelových spojkách. Složky odraženého impulsu budou kladné nebo záporné v závislosti na tom, zda je impedance větší nebo menší než charakteristická impedance kabelu.

Počáteční a odražené impulzy jsou zobrazeny v závislosti na čase na displeji, který vypadá jako displej osciloskopu a operátor je musí vyhodnotit. Protože je od výrobce známá rychlost pohybu impulsu v daném kabelu, lze čas potřebný pro odraz převést navzdálenost nebo místo. Zdroj impedanční diskontinuity může být určen podle tvaru

odraženého signálu. Identifikace a také lokalizace anomálie vyžaduje zkušeného operátora pro interpretaci signálů TDR. [57]

4.2.5 Zkoušky používané v ČR

Povinné zkoušky kabelového vedení, které je nutné provést po montáži, opravě, dlouhodobé odstávce nebo po provozním zestárnutím izolace jsou definovány normou PNE 34 7626 a slouží pro ověření provozních schopností kabelového vedení. Proto se těmto zkouškám říká provozní. Norma doporučuje začít zkouškou pláště a po jejím splnění přejít na zkoušku izolace. [64]

Jednotliví distributoři se touto normou řídí, ale dále ji ve svých vnitřních normách rozšířili o další typy zkoušek anebo upravili. Upravené zkoušky musí být vždy přísnější než ty udané ve výchozí normě.

Požadavky, které stanovuje norma PNE 34 7626 pro nejpoužívanější kabely s XLPE izolací, jsou uvedeny v Tabulka 4-1. U_{0ef} v tabulce značí efektivní hodnotu fázového napětí pro danou napěťovou hladinu.

Tabulka 4-1 Provozní zkoušky pro kabel s XLPE izolací převzato z [64]

Číslo	Napěťová zkouška	Napětí	Trvání	Požadavek
1	Zkouška PE pláště Stejnoseměné napětí DC Svodový proud < 0,2 mA/100 m	5 kV	2–5 minut	Bez průrazu
2	Zkouška PVC pláště Stejnoseměné napětí DC Svodový proud < 0,2 mA/100 m	5 kV	2–5 minut	Bez průrazu
3	Zkouška izolace Střídavé napětí 50 Hz AC Střídavé napětí 0,1 Hz AC	$2U_{0ef}$ $3U_{0ef}$	60 minut 60 minut	Bez průrazu Bez průrazu

5. PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci praktické části práce byly na testovacím kabelového souboru (viz. kap. 5.1) provedeny dva druhy diagnostických testů, které byly provedeny současně. Prvním testem byly výdržné zkoušky střídavým napětím a druhým testem bylo měření velikostí nábojů PD. Po těchto testech se dále pokračovalo v degeneračních zkouškách, při kterých se také měřily velikosti nábojů PD. Samotná degenerace se prováděla pomocí zvýšeného napětí.

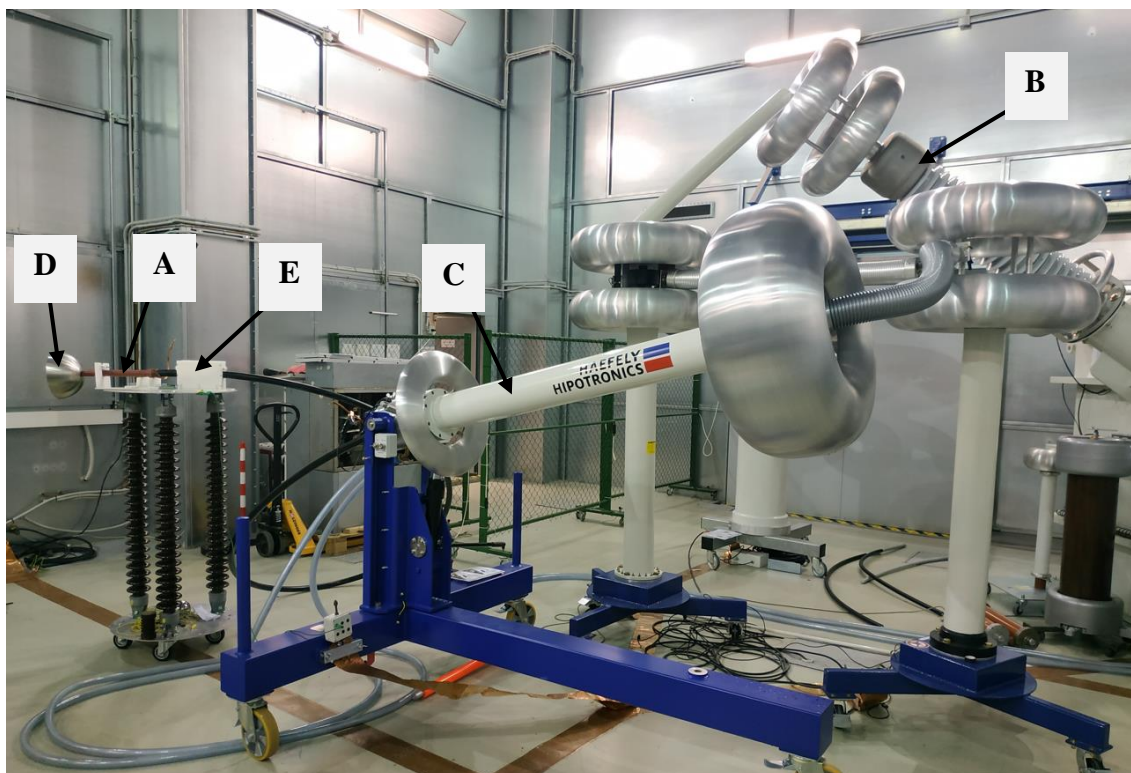
Jako zkušební střídavý zdroj napětí byl pro praktickou část diplomové práce použit zdroj Heafely AC TEST SET 300 kV (dále jen laboratorní střídavý zdroj). Tento zdroj je napájen ze sítě NN, kde je zapojen mezi dvě fáze. Z tohoto důvodu je výsledné napětí zdroje citlivé na kolísání napětí v síti NN. Zdroj ale stále splňuje normu ČSN EN 60060. Díky sestavě filtrů a transformátorů je na výstupních kontaktech zdroje možné dosáhnout střídavého napětí až 300 kV, s požadovaným sinusovým průběhem a maximálním výstupním proudem 1 A.

Laboratorní střídavý zdroj se ovládá pomocí přístroje AC Control OT 248, který také slouží k zobrazení výstupního napětí $\frac{U_{pk}}{\sqrt{2}}$ zdroje, výpisu alarmů a dokáže také vykreslit graf výstupního napětí na čase.

5.1 Testovaný objekt

Testovaný objekt byl tvořen z kabelu 22-AXEKVCE 1x240RM/25 od firmy NKT. Průřez tohoto kabelu byl 240 mm² a jeho délka byla cca 8 metrů, na jednom konci byl osazen kabelovou koncovkou a na druhé straně koncovkou vodní. Přes vodní koncovku byl testovaný objekt spojen s laboratorním střídavým zdrojem.

Na testovaný objekt byla namontována kabelová koncovka (její umístění na pracovišti viz Obrázek 5-1 A). Nejdříve šlo o kabelovou koncovku bez poškození – instalace byla provedena podle postupu, který je v praxi považován za správný. Po ukončení měření byla kabelová koncovka odstraněna a nainstalovaná druhá kabelová koncovka. Ta byla provedena tak, že na ní při instalaci vzniklo úmyslné poškození.

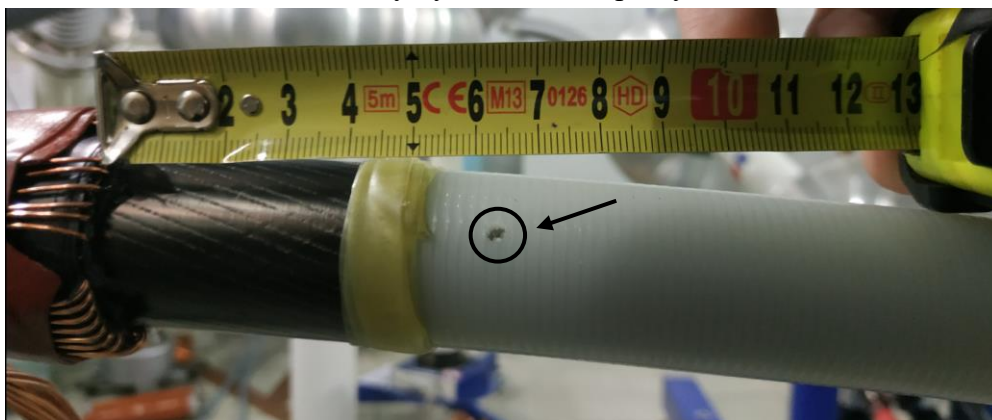


Obrázek 5-1 Testovací pracoviště

Obě koncovky byly místo kabelového oka zakončeny kovovým válcem, který kabelové oko nahradil.

V obou případech byly použity teplem smrštitelné kabelové koncovky od firmy Raychem POLT – 24D/1XI. Jedná se o vnitřní koncovku pro stíněné kabely s izolací ze zesíťovaného polyetylenu s použitím do 24 kV.

Poškození koncovky bylo vytvořeno vyvrtanou dírkou o průměru 3 mm, která představovala bodové ztenčení izolace kabelu v kabelové koncovce. Dírka se nachází 6,5 cm od ukončení pláště kabelu a 2 cm od konce vnější polovodivé vrstvy kabelu (Obrázek 5-2). Hloubka samotné dírky byla zhruba do půlky XLPE izolace (asi 3 mm).



Obrázek 5-2 Úmyslné poškození kabelové koncovky

Aby při měření nevznikaly PD i mimo zájmovou oblast, bylo propojení testovaného objektu s laboratorním střídavým zdrojem (Obrázek 5-1 B) provedeno vodní koncovkou (C). Ta díky svému provedení zamezuje vzniku PD, ale její příprava je časově náročná. Je to zejména z toho důvodu, že je nutné odstranit plášť a vnější řídicí vrstvu kabelu v délce přes 2 metry.

Použitá vodní koncovka CTT 350-115 byla vyrobena firmou Haefely Hipotronics. Vodní hospodářství koncovky bylo zajištěno pomocí jednotky na úpravu vody WPU také od firmy Haefely Hipotronics. Úkolem této jednotky je chlazení vody a úprava její vodivosti na požadovanou hodnotu pro použití ve vodní koncovce.

Na konec kabelové koncovky byla také nainstalován polokulová elektroda (D), jejíž účelem bylo hlavně zabránění vzniku koróny při nižších úrovních napětí. Při nich by totiž koróna mohla vykazovat větší výbojovou činnost než PD uvnitř kabelové koncovky.

Testovaný objekt byl upevněn v držáku (E), který byl umístěn na podstavci, jehož úkolem bylo jak zvětšení přeskokové vzdálenosti od podlahy, která je uzemněná, tak i zlepšení přístupnosti k testovanému objektu při samotném měření.

5.2 Výdržná zkouška střídavým napětím

Tyto zkoušky jsou prováděny k věrohodnému prokázání, že výdržné napětí izolace zkoušeného objektu je minimálně na úrovni normalizovaného jmenovitého výdržného napětí. Normalizované jmenovité výdržné napětí činí většinou alespoň dvojnásobek jmenovitého provozního napětí (například pro komponenty na napěťovou úroveň 22 kV je normalizované jmenovité výdržné napětí 50 kV a pro komponenty na úrovni 35 kV je výdržné napětí 70 kV). [65]

5.3 Měření PD

Měření PD probíhalo pomocí měřicího přístroje DDX-7000 od firmy Haefely pomocí galvanické metody s pouze jednou měřicí sondou. Z tohoto důvodu je měření ovlivňováno i vnějším rušením/šumem. Díky tomu, že toto měření probíhalo ve vysokonapěťové laboratoři, která je velmi dobře stíněná, pohyboval se venkovní šum po celou dobu praktické části této práce v rozmezí od 1,5 pC do 4 pC.

Velkou výhodou přístroje DDX-7000 je možnost jeho dálkové kalibrace na libovolnou hodnotu náboje. V případě této práce se kalibrace prováděla na hodnotu náboje 5 pC nebo 50 pC, a to v závislosti na hodnotě okolního šumu.

Nevýhodou tohoto přístroje je, že čas měření je ukazován podle času, který je nastaven v operačním systému a dále také to, že změřená hodnota napětí neodpovídá skutečné hodnotě, protože DDX-7000 byl zkalibrován na napěťovou hladinu 12 kV.

5.4 Provedení laboratorních zkoušek

Laboratorní zkoušky byly provedeny ve třech krocích. V prvním kroku bylo prováděno měření na testovaném objektu, který byl osazen na jedné straně nepoškozenou kabelovou koncovkou a u druhé strany byl odstraněn plášť kabelu a vnější polovodičová vrstva. Ve druhém kroku měření byl testovaný objekt již vložen do vodní kabelové koncovky. A ve třetím kroku měření byla nepoškozená koncovka odstraněna a místo ní byla namontována koncovka s poškozením.

5.4.1 První krok - měření bez kabelové koncovky

Před umístěním testovaného objektu do vodní koncovky byl testovaný objekt krátkodobě připojen k laboratornímu střídavému zdroji. Počáteční přiložené napětí bylo 5 kV a další zvyšování napětí probíhalo krokově s krokem 5 kV až do hodnoty napětí 35 kV pro ověření celkové funkčnosti testovaného objektu. Poté byl laboratorní střídavý zdroj a testovaný objekt vypnut, a to z důvodu přepojení obvodu na měření PD.

Při měření PD byl použit filtr s rozsahem 20 kHz až 500 kHz. Velikost šumu pozadí se při měření pohybovala kolem 1,5 pC a kalibrace zařízení byla na hodnotu náboje 5 pC. Při hodnotě napětí 13,4 kV (fázová hodnota napětí na napěťové hladině 22 kV) bylo spuštěno měření náboje PD. Toto měření trvalo 18 minut.

5.4.2 Druhá krok - měření s nepoškozenou kabelovou koncovkou

V tomto kroku byl testovaný objekt spojen s laboratorním testovacím zdrojem přes vodní koncovku a na konec kabelové koncovky byla nainstalovaná půlkulová elektroda, jejíž funkcí bylo potlačení korónové výbojové činnosti.

Nejprve bylo provedeno měření iniciačního napětí PD. Velikost šumu pozadí u tohoto měření byla 3 pC, rozsah filtru zůstal na rozsahu 20 kHz až 500 kHz a DDX-7000 byl kalibrován na 5 pC.

Poté proběhlo 25minutové měření PD na napěťové hladině 30 kV. Po této době proběhla minutová výdržná zkouška střídavým napětím. Po těchto zkouškách byl na noc testovaný objekt odpojen.

Měření pokračovalo další den degeneračním testováním na testovacím objektu. Nastaven byl opět stejný filtr 20 kHz – 500 kHz, šum pozadí byl 4 pC a byla provedena kalibrace měřicího přístroje na 50 pC. Jako počáteční hodnota napětí byla zvolena hodnota 50 kV. Pro získání informací byla použita termokamera Flir i7, kterou se měřilo oteplení povrchu kabelové koncovky (emisivita byla nastavena na hodnotu $\epsilon_r = 0,9$). Měření termokamerou probíhalo vždy v 5minutových intervalech. Zároveň po celou dobu degeneračních zkoušek bylo spuštěné kontinuální měření PD. Po 20 minutách došlo ke zvýšení napětí. Nejprve došlo ke zvýšení napětí na 80 kV. Napětí 80 kV působilo také 20 minut a poté následovalo zvýšení na napětí 90 kV. Zde byla doba měření zkrácena na 5 minut a pak následovalo zvýšení napětí na 100 kV. Tady bylo měření po necelých 3 minutách vypnuto z důvodu podezření na požár kabelové koncovky, který se však

nepotvrdil. Poté byla kabelová koncovka odstřižena, a po jejím vychladnutí i rozříznuta pro podrobnější vnitřní kontrolu.

5.4.3 Třetí krok - měření s poškozenou kabelovou koncovkou

Ve třetím kroku byla na testovací objekt provedena montáž poškozené kabelové koncovky, taktéž s půlkulovou elektrodou. Také i v tomto kroku byl frekvenční filtr nastaven na hodnoty mezi 20 kHz až 500 kHz, kalibrace byla provedena na velikost náboje 50 pC, z důvodu, že šum pozadí byl 4 pC.

Jako první proběhlo měření iniciačního napětí PD, které v tomto případě pokračovalo do měření výbojové činnosti při postupném zvyšování napětí, a to až do hodnoty 25 kV. Poté byly provedeny degenerační zkoušky. Pro získávání informací byla opět použita termokamera Flir i7 a kontinuální měření PD pomocí měřiče DDX-7000. Počáteční hodnota napětí u těchto zkoušek byla zvolena 30 kV. Toto napětí působilo 30 minut a poté bylo zvýšeno na 50 kV. Po provozování testovaného objektu na 50 kV po dobu 15 minut bylo napětí opět zvýšeno, a to na hodnotu 80 kV. Na této hodnotě napětí byl objekt provozován jen po dobu 13 sekund, a to z důvodu, že poté došlo k průrazu kabelové koncovky a k jejímu zničení.

Po zničení této kabelové koncovky byla tato koncovka odstřižena a po vychladnutí opět rozříznuta, aby bylo možné najít dráhu, kterou za sebou zanechal proudový výboj, a zkontrolovat správnost montáže této kabelové koncovky.

Minutová výdržná zkouška u této fáze neproběhla, ale byla nahrazena 15minutovým provozováním testovaného objektu na napěťové hladině, na které probíhá minutová výdržná zkouška.

6. ANALÝZA VÝSLEDKŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI

Za referenční hodnoty budou považovány výsledky z druhého kroku měření. Je to z důvodu, že v tomto kroku byla měřena kabelová koncovka bez úmyslného poškození, a kdy druhý konec testovaného objektu byl již vložen do vodní koncovky. Kabelová koncovka byla nainstalována podle postupu, který je v praxi považován jako správný.

Hodnocení výbojové činnosti nebylo možné založit jen na hodnotách PD, protože rozdíl dvou po sobě jdoucích naměřených hodnot byl mnohdy obrovský. Proto byl pro hodnocení zvolen průběh trendu hodnot PD.

6.1 Iniciační napětí PD a jeho počáteční náboj

Iniciační napětí PD u referenčního měření bylo 25 kV. Hodnota iniciačního napětí, která byla změřena u testovaného objektu v prvním kroku zkoušek, byla pouze 10 kV a u poškozené kabelové koncovky byla zjištěna hodnota iniciačního napětí 13 kV. Z těchto hodnot je vidět, že jak osazení konce kabelového souboru kabelovou koncovkou, tak i poškození uvnitř kabelové koncovky, mají značný vliv na iniciační napětí PD. V případě neosazení kabelové koncovky se iniciační napětí sníží o 15 kV. A v případě, že v kabelové koncovce nastala závada, klesá iniciační napětí o 12 kV.

Velikost počátečních nábojů PD u referenčního měření byla mezi 100 až 120 pC. Srovnáním těchto hodnot s naměřenými hodnotami v prvním a třetím kroku měření je možné vidět, že počáteční náboj v prvním kroku měření byl výrazně vyšší. Dosahoval hodnot kolem 10 nC. A v třetím kroku se hodnota nábojů PD při iniciačním napětí pohybovala okolo 30 pC. Při zvýšení napětí na 25 kV byl náboj PD nejprve 250 pC, ale poté se snížil na hodnotu 200 pC. I z těchto hodnot vyplývá, že instalace kabelových koncovek má velký vliv na velikost náboje PD a že vnitřní poškození kabelové koncovky zvyšuje velikost náboje PD.

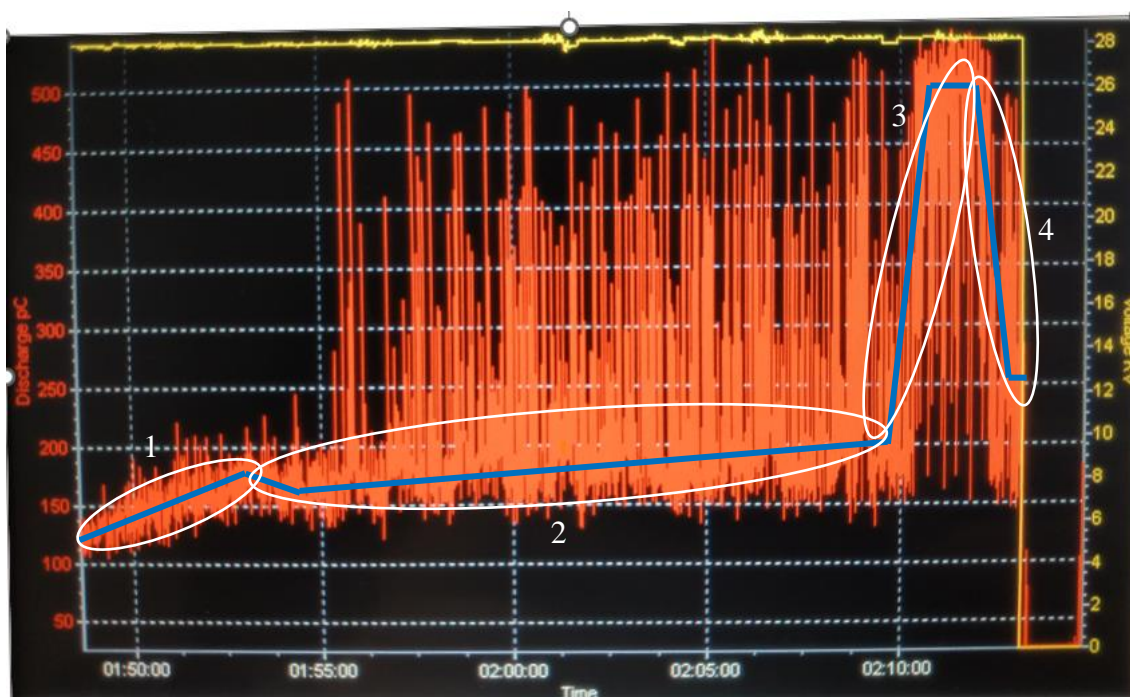
6.2 Napět'ová hladina 13 kV a 30 kV

V prvním kroku měření probíhalo testování pouze na napět'ové hladině 13,4 kV. Tato napět'ová hladina odpovídá fázovému napětí v síti 22 kV a byla také zvolena z důvodu, aby nedošlo k poškození testovaného objektu. Na napět'ové hladině 30 kV potom probíhalo pouze testování u druhého a třetího kroku měření. Tyto napět'ové hladiny byly zvoleny proto, že se nachází nad hodnotami iniciačního napětí PD daných kabelových koncovek.

6.2.1 Nepoškozená kabelová koncovka (referenční měření)

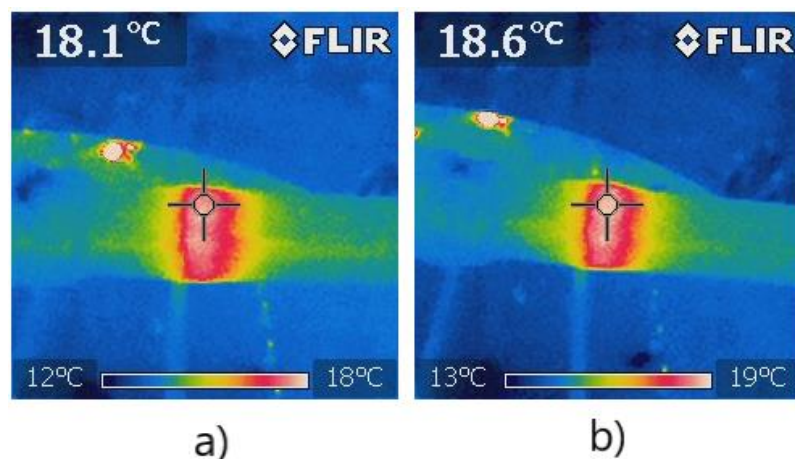
Obrázek 6-1 znázorňuje závislost velikosti náboje PD na čase u referenčního měření. Modrá čára je vykreslením trendu velikosti náboje. Tento trend lze rozdělit na čtyři oblasti, které jsou na obrázku zakroužkovány bílými čarami.

V oblasti 1 dochází k postupnému rozvoji PD, a proto má trend rostoucí charakter. Nejspíše dochází k postupné ionizaci plynů v miniaturních kapsičkách a vzniku PD vlivem velkého elektrického namáhání na nehomogenitách v izolaci kabelové koncovky. Tato oblast trvala asi čtyři minuty a nejvyšší hodnota trendu se pohybovala okolo hodnoty 175 pC. V oblasti 2 dochází nejprve ke krátkému (asi minutovému) snížení náboje PD až k průměrné hodnotě 150 pC a poté hodnota náboje má slabý, ale setrvale rostoucí trend (z hodnoty 150 pC na hodnotu 200 pC). Tento pozvolný růst trval asi 14 minut. V oblasti 3 dochází k náhlému, ale krátkodobému zvýšení náboje PD, a to na průměrnou hodnotu 500 pC (zvýšení o 300 pC). V oblasti 4 klesá trend na hodnotu 250 pC a následně se na této hodnotě ustálil.



Obrázek 6-1 Závislost velikosti náboje PD na čase u referenčního měření na napěťové hladině 30 kV

Oteplení nepoškozené kabelové koncovky pomocí PD je zobrazeno na obrázku (Obrázek 6-2), kde jsou zobrazeny snímky termokamery na začátku a na konci měření. Teplota povrchu kabelové koncovky během celé doby 25minutového měření se zvýšila jen o 0,5 °C z počátečních 18,1 °C na konečných 18,6 °C. Toto zvýšení nemusí být zapříčiněno PD, ale může být způsobeno jen nepřesností měření s termokamerou, kdy s pomocí termokamery byla vždy snaha změřit nejvyšší možnou teplotu v měřené oblasti. Nejteplejší oblast se nacházela v místě, kde byla ukončená vnější polovodičivá vrstva, a to z důvodu největšího elektrického namáhání. Povrchová teplota ostatních částí kabelové koncovky byla 14,8 °C.



Obrázek 6-2 Povrchová teplota referenční kabelové koncovky při 30 kV a) na začátku měření b) na konci měření

6.2.2 Zapojení bez kabelové koncovky (první krok měření)

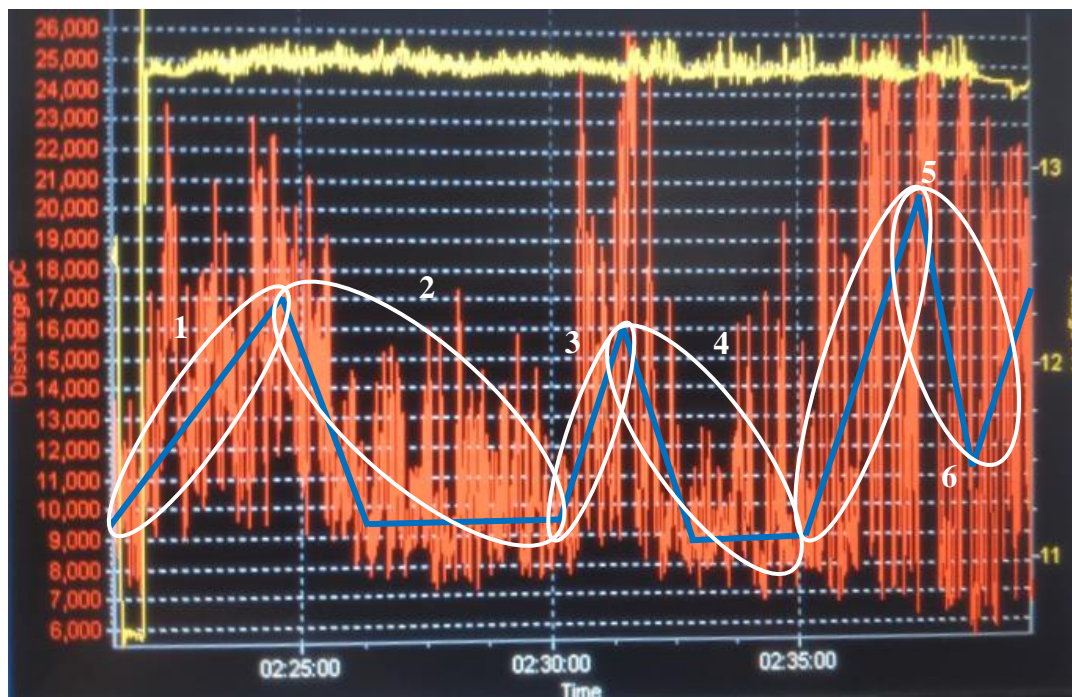
Na obrázku (Obrázek 6-3) je zobrazen průběh měření na hladině 13,4 kV. Tento průběh je opět možné rozdělit do několika oblastí podle tvaru trendu v jednotlivých oblastech. Průběh jednotlivých oblastí se velmi podobá oblastem v referenčním grafu. Trend je vyznačen modrou čarou a oblasti jsou vyznačeny bíle. Už i při zběžném pohledu na tento graf je zřejmé, že se zde hodnoty náboje se pohybují o dva řády výše než u ostatních grafů.

V oblasti 1 je možné rozpoznat stejný vzor trendu jako i u ostatních průběhů zobrazených v kap. 6.2. Čas trvání oblasti 1 jsou 4 minuty a maximální hodnota trendu náboje je 17 nC.

Oblasti 2 a 4 jsou si velmi podobné, protože v nich nejprve dochází k poklesu trendu náboje a potom k chvilkovému ustálení trendu na nových hodnotách.

Oblasti 3 a 5 jsou opaky oblastí 2 a 4, a to proto, že v nich má trend rostoucí charakter. V oblasti 5 je možné najít nejvyšší zaznamenanou hodnotu náboje z celé praktické části diplomové práce. Náboj zde dosáhl velikosti až 26 nC.

V oblasti 6 opět dochází nejprve k poklesu a pak k následnému nárůstu trendu.

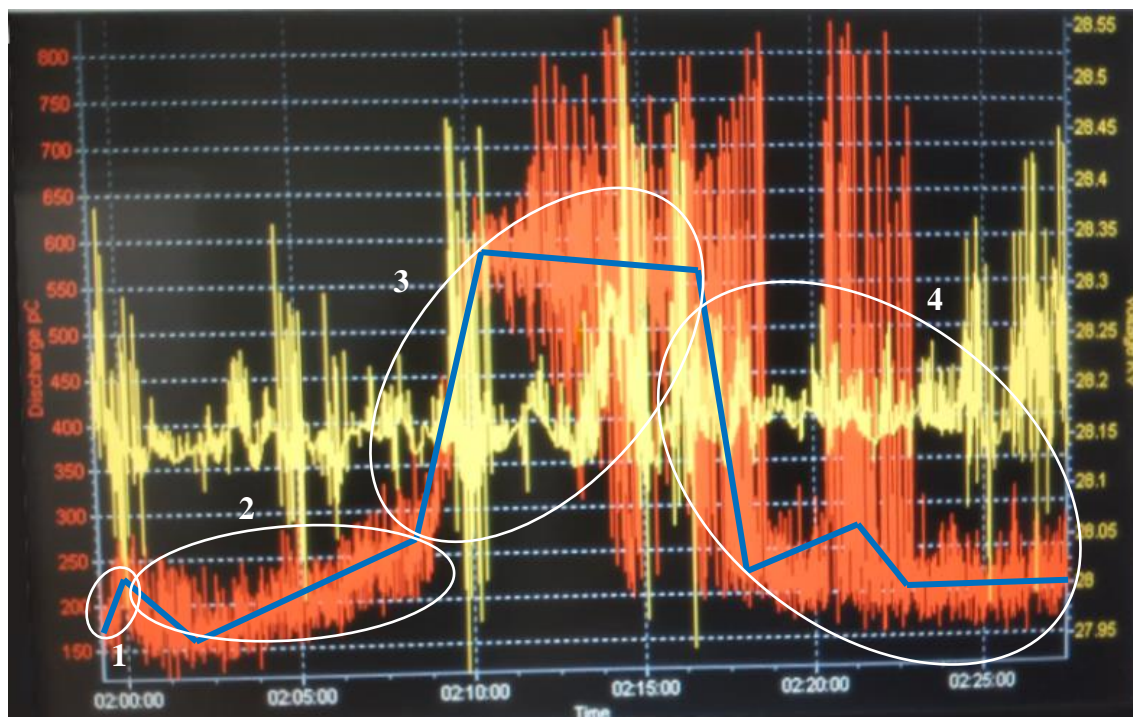


Obrázek 6-3 Závislost velikosti náboje PD na čase u testovaného objektu bez kabelové koncovky

6.2.3 Poškozená kabelová koncovka (třetí krok měření)

Obrázek 6-4 zachycuje průběh měření náboje PD poškozené kabelové koncovky na napěťové hladině 30 kV. Opět je zde modrou barvou vyznačen trend náboje PD, a i tento trend je možné rozdělit do 4 oblastí. Oblasti v grafu s poškozenou kabelovou koncovkou se tvarem podobají grafu s nepoškozenou koncovkou, jsou v něm ale rozdíly:

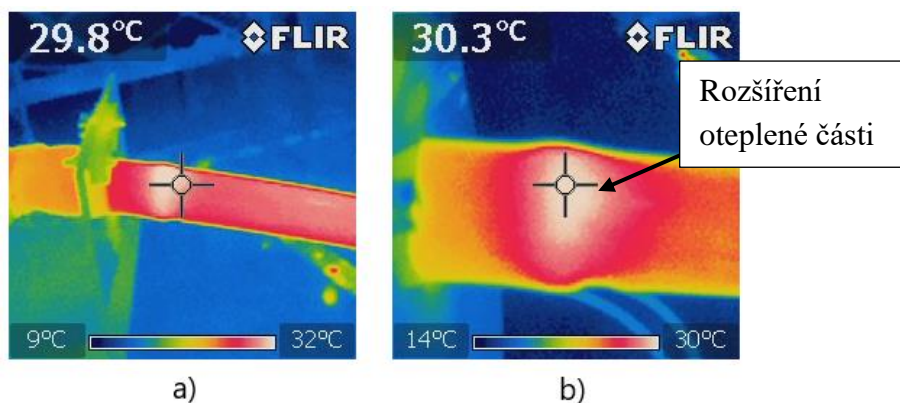
- V oblasti 1 jde o délku trvání oblasti (místo 4 minut pouze 30 sekund), je také daleko vyšší strmost nárůstu trendu náboje a trend má na konci této oblasti o 50 pC vyšší hodnotu.
- Rozdíly v oblasti 2 jsou: strmější nárůst i pokles trendu kabelové koncovky (nejprve pokles z 225 pC na 150 pC a poté nárůst na 250 pC) a doba trvání oblasti 2 je výrazně kratší, necelých 10 minut (u nepoškozené koncovky 15 minut).
- Oblast 3 v tomto grafu se podobá oblasti 3 v grafu nepoškozené koncovky. Jedinými rozdíly jsou délka trvání této oblasti (6 minut místo 2 minut) a o 50 pC vyšší hodnota trendu náboje (z 550 pC na 600 pC).
- Nejvíce se odlišuje oblast 4, kde u grafu s poškozenou kabelovou koncovkou sice dochází k poklesu hodnot náboje, ale než se hodnota ustálí na 200 pC, tak dojde ke krátkodobému zvýšení a snížení hodnoty náboje. Tato výsledná hodnota je však níže, než hodnota trendu na konci oblasti 2 (u nepoškozené koncovky byla hodnota trendu na konci oblasti 4 výše než hodnota trendu na konci oblasti).



Obrázek 6-4 Závislost velikosti náboje PD na čase u poškozené kabelové koncovky

Obrázek 6-5 zobrazuje teploty povrchu poškozené kabelové koncovky na začátku a na konci měření. Povrchová teplota koncovky v místě největšího elektrického namáhání na počátku měření byla 29,8 °C. Takto vysoká teplota měla dvě příčiny. První z nich bylo to, že tato koncovka byla nově osazena a na začátku měření ještě nestačila vychladnout na okolní teplotu (nahřátí bylo z důvodu instalace koncovky na testovaný objekt). A druhou příčinou bylo i samotné teplo vyprodukované PD. Teplota povrchu na konci měření v nejvíce namáhaném místě byla 30,3 °C. Teplota ostatních částí kabelové koncovky se pohybovala okolo 21,8 °C. Rozdíl koncových hodnot povrchového oteplení poškozené a nepoškozené kabelové koncovky byl 11,7 °C.

Na obrázku je také vidět, že oblast s největším oteplením se rozšířila mírně doprava do míst, kde se nachází poškození kabelové koncovky.



Obrázek 6-5 Povrchová teplota poškozené kabelové koncovky při 30 kV a) na začátku měření b) na konci měření

6.3 Napět'ová hladina 50 kV

Na této a vyšších napět'ových hladinách byly prováděny zkoušky jen ve druhém a třetím kroku praktického měření. Tato napět'ová hladina byla zvolena z důvodu, že se na této hladině provádí krátkodobé a dlouhodobé výdržné zkoušky komponentů, které jsou určeny pro napět'ovou hladinu 22 kV.

6.3.1 Nepoškozená kabelová koncovka (referenční měření)

Nejprve na této napět'ové hladině byla provedena minutová výdržná zkouška nepoškozené kabelové koncovky, kterou koncovka úspěšně splnila. Poté následovalo její degenerační testování, při kterém byla měřena velikost náboje PD.

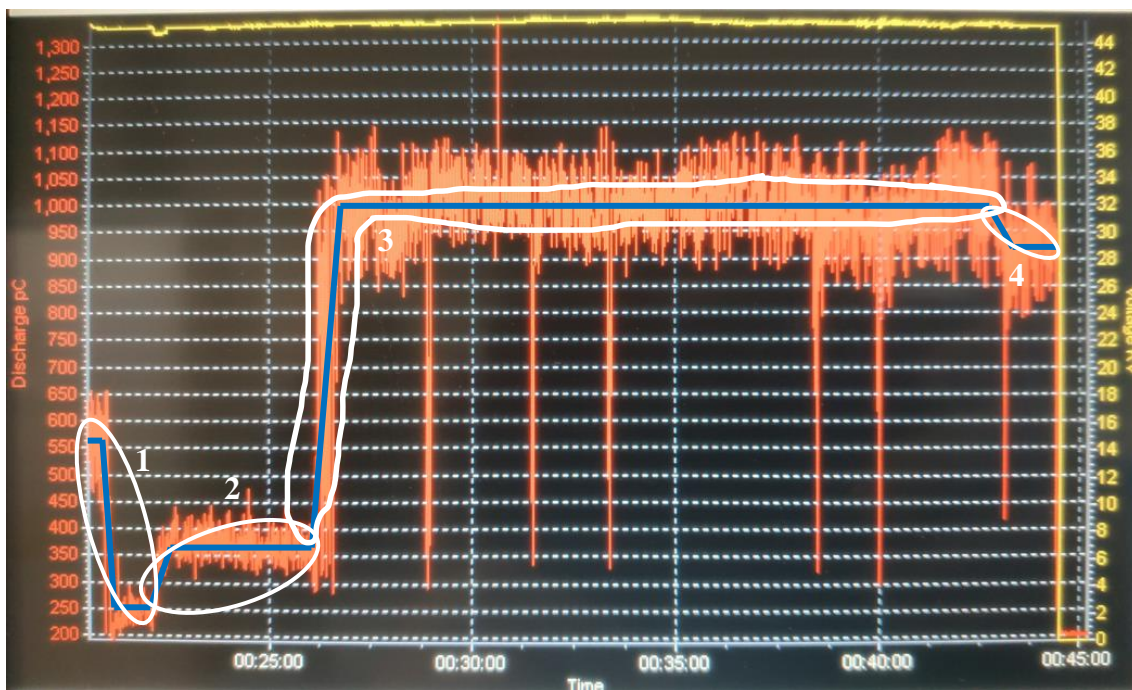
Obrázek 6-6 zobrazuje naměřenou závislost velikosti náboje PD na čase. Trend náboje je opět vyznačen modrou čarou, kterou je možné rozdělit na 5 oblastí (vyznačeny bíle).

Oblast 1 na napět'ové hladině 50 kV se odlišuje od všech oblastí 1 na hladině 30 kV. Toto mohlo být způsobeno prodloužením při zapnutí měření. Výsledkem je, že na napět'ové hladině 50 kV je z počátku trend vyrovnaný na hodnotě 550 pC, ale poté trend klesá až na hodnotu 250 pC a na této hodnotě setrvává zhruba minutu.

Po této minutě se trend zvýší na hodnotu 350 pC a na ní zůstává po dobu třech minut. Tato oblast je v grafu označena jako oblast 2.

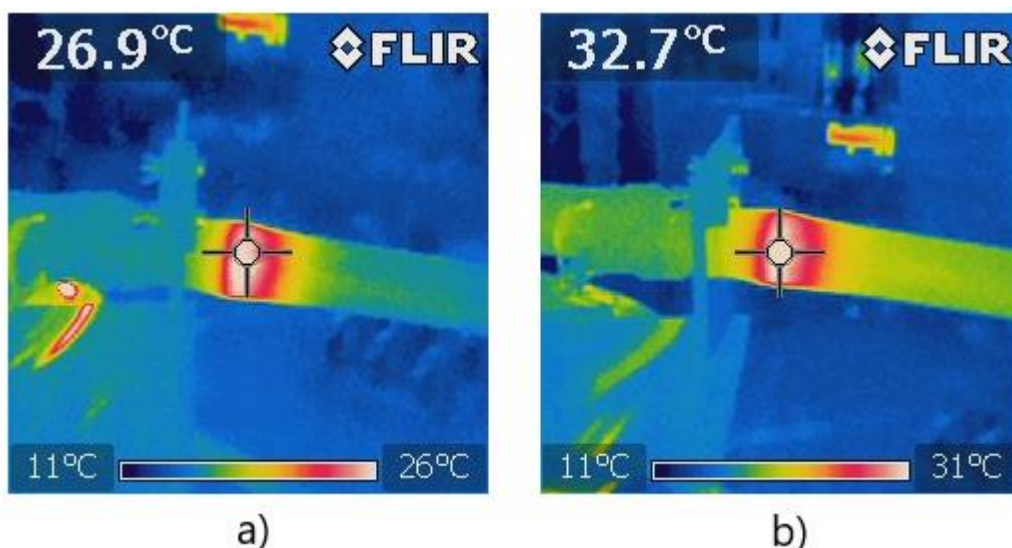
Na počátku oblasti 3 dochází k prudkému růstu trendu, a to z hodnoty 350 pC na hodnotu 1000 pC, kde se trend ustaluje a na této hodnotě náboje pak setrvává 16 minut.

V oblasti 4 dochází nejprve k mírnému poklesu o 50 pC na průměrnou ustálenou hodnotu 950 pC, která se poté udržela až do konce měření na této napět'ové hladině.



Obrázek 6-6 Časová závislost velikosti náboje PD nepoškozené kabelové koncovky při 50 kV

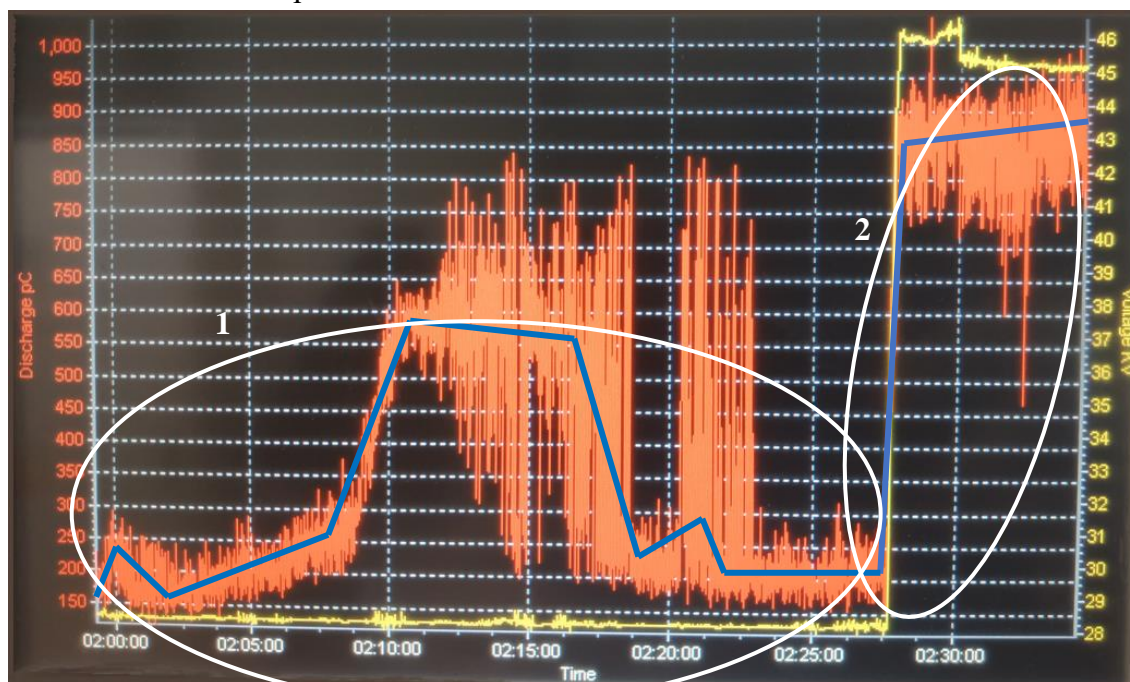
Na počátku měření na napěťové hladině 50 kV byla povrchová teplota nepoškozené kabelové koncovky v nejteplejším místě 26,9 °C a v průběhu měření se teplota zvýšila o 5,8 °C na konečnou hodnotu 32,7 °C (Obrázek 6-7). Teplota ostatních částí kabelové koncovky se pohybovala mezi 12 až 16 °C podle vzdálenosti od nejteplejšího místa.



Obrázek 6-7 Povrchová teplota referenční kabelové koncovky při 50 kV a) na začátku měření b) na konci měření

6.3.2 Poškozená kabelová koncovka (třetí krok měření)

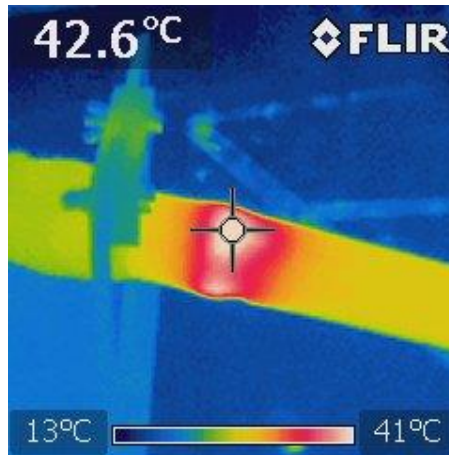
Při měření na poškozené kabelové koncovce (Obrázek 6-8) nedošlo při přepínání z hladiny 30 kV (oblast 1) na hladinu 50 kV (oblast 2) k vypnutí laboratorního střídavého zdroje jako při měření nepoškozené kabelové koncovky, ale došlo ke skokovému zvýšení napětí o 20 kV. To vyvolalo i skokové zvýšení velikostí měřených hodnot náboje PD, jak je možné vidět na obrázku (oblast 2). Hodnota trendu náboje se skokově zvýšila z hodnoty 200 pC na hodnotu 875 pC. A dále pak měla hodnota náboje mírně rostoucí trend až na hodnotu 1000 pC.



Obrázek 6-8 Zvýšení napět'ové hladiny na 50 kV u poškozené kabelové koncovky

V důsledku zvýšení přiloženého napětí dochází v kabelové koncovce k vyššímu vývinu tepla, což se projevilo ve zvýšení oteplení povrchu poškozené kabelové koncovky. Za počáteční povrchovou teplotu poškozené kabelové koncovky na této hladině (hladině 50 kV) je považována koncová teplota naměřená na hladině 30 kV (Obrázek 6-5b), která byla 30,3 °C. Povrchová teplota během měření na napět'ové hladině 50 kV vystoupala v nejteplejším místě až k hodnotám 42,6 °C (Obrázek 6-9).

Při porovnání naměřených hodnot mezi poškozenou a nepoškozenou kabelovou koncovkou na této napět'ové hladině bylo zjištěno, že rozdíl teplot na konci obou měření se blížil k 10 °C.



Obrázek 6-9 Povrchová teplota poškozené kabelové koncovky na konci měření na napět'ové hladině 50 kV

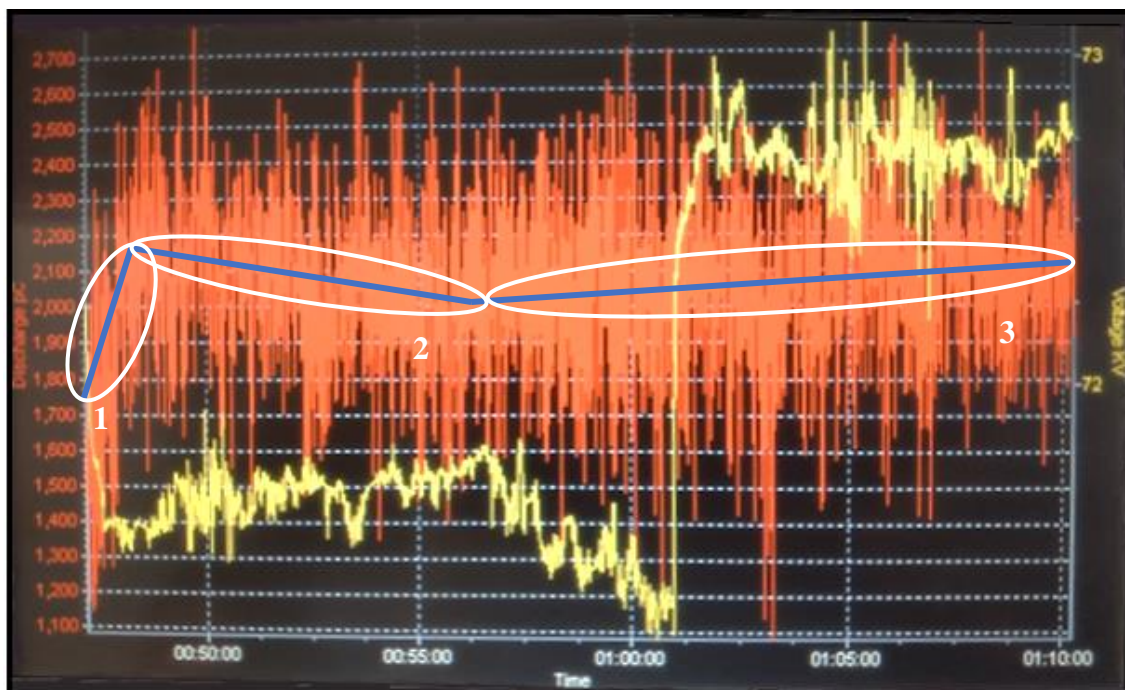
6.4 Napět'ová hladina 80 kV

6.4.1 Nepoškozená kabelová koncovka (referenční měření)

Na obrázku (Obrázek 6-10) je zobrazen časový průběh velikostí náboje PD nepoškozené kabelové koncovky během jejího testování na napět'ové hladině 80 kV. Modrou čarou je vyznačen trend hodnot náboje a bíle jsou vyznačeny jeho jednotlivé oblasti.

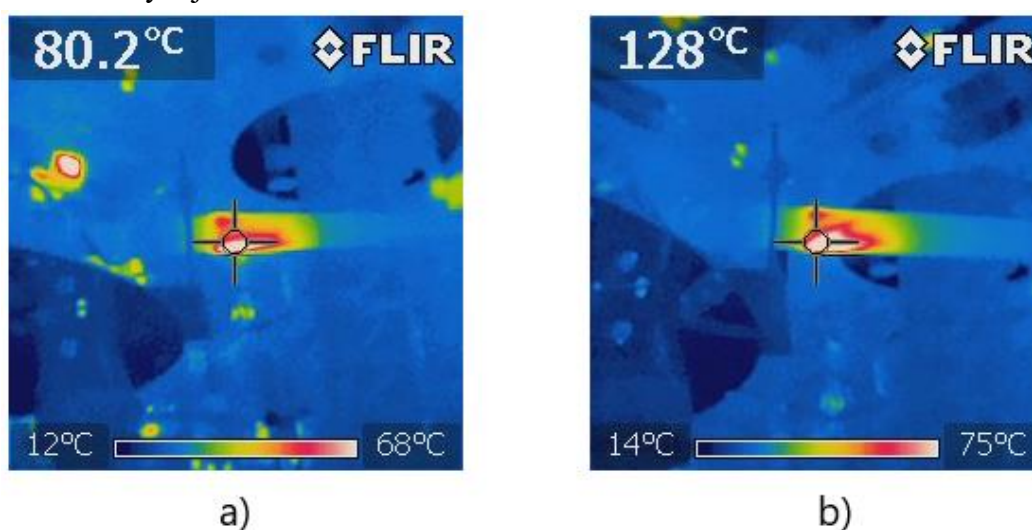
Z důvodu, že bylo napětí zvyšováno na hladinu 80 kV z téměř nulové hodnoty, je v oblasti 1 možné vidět strmě rostoucí trend, který dosahoval hodnot až 2 200 pC.

V oblasti 2 se projevuje mírně klesající trend, kdežto v oblasti 3 je naopak mírně rostoucí trend. Rozdíl mezi nejnižší hodnotou trendu v oblasti 2 (2 000 pC) a nejvyšší hodnotou trendu v oblasti 3 (2 100 pC) byl pouhých 100 pC. A zároveň se koncová hodnota trendu v oblasti 3 se blíží k počáteční hodnotě trendu v oblasti 2. Při spojení těchto dvou informací lze předpokládat, že společný trend pro oblasti 2 a 3 by byl stálý na hodnotě okolo 2 100 pC, což lze potvrdit na základě grafu v kapitole 6.5.1.



Obrázek 6-10 Závislost hodnoty náboje PD na čase u nepoškozené kabelové koncovky na hladině 80 kV

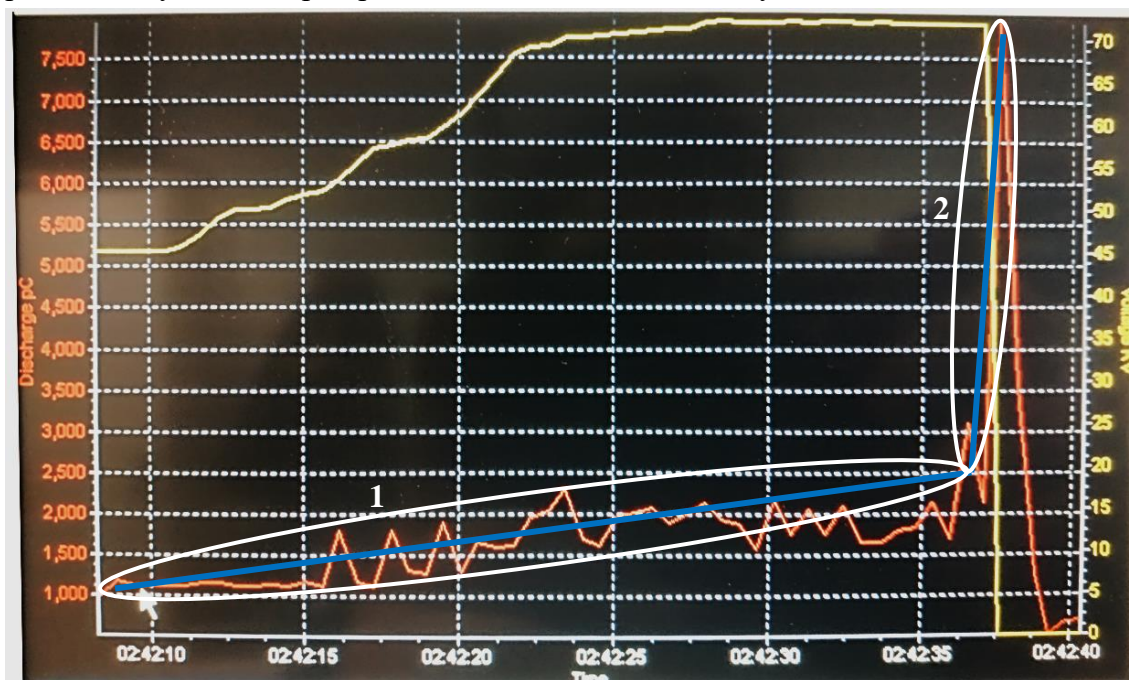
Při měření termokamerou bylo zjištěno, že se na spodní straně koncovky asi začíná tvořit výbojový kanál. To bylo usuzováno z toho, že oblast s vysokou teplotou byla protažená směrem ke konci kabelové koncovky. U předchozích měření měla vysokoteplotní oblast tvar proužku v místě, kde byla zakončena vnější polovodiivá vrstva. Povrchová teplota naměřená v místě výbojového kanálu na počátku měření byla 80,2 °C a nejvyšší naměřená povrchová teplota u tohoto měření byla 128 °C (Obrázek 6-11). Teplota povrchu dalších částí kabelové koncovky se pohybovala od 16 °C do 31 °C podle vzdálenosti od výbojového kanálu.



Obrázek 6-11 Povrchová teplota referenční kabelové koncovky při 80 kV a) na začátku měření b) nejvyšší naměřená

6.4.2 Poškozená kabelová koncovka (třetí krok měření)

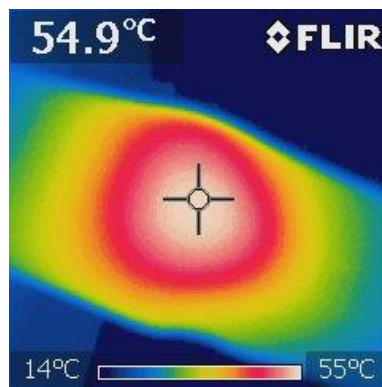
Graf zobrazený na obrázku (Obrázek 6-12) znázorňuje průběh měření velikosti náboje PD u poškozené koncovky na napěťové hladině 80 kV. Délka testování na této napěťové hladině byla pouze 13 sekund, protože pak došlo k proražení kabelové koncovky. Jak je vidět v oblasti 1, trend, jenž je vyznačen opět modrou barvou, zde má rostoucí charakter. V okamžiku těsně před průrazem dochází k prudkému zvýšení velikosti náboje z 2 200 pC na hodnotu přesahující 7 500 pC – viz oblast 2. To představuje hodnotu náboje potřebnou pro proražení poškozené kabelové koncovky. Izolační materiál poškozené kabelové koncovky měl už nižší izolační pevnost, a to díky tomu, že byl předem vystaven působení zvýšeného napětí při testování kabelové koncovky na hladinách 30 a 50 kV.



Obrázek 6-12 Časová závislost velikosti náboje PD u poškozené kabelové koncovky na napěťové hladině 80 kV

Povrchová teplota kabelové koncovky, která byla naměřena po jejím zničení, byla 54,9 °C (Obrázek 6-13), ale skutečná povrchová teplota v době průrazu musela být ještě vyšší, protože měření proběhlo asi minutu po průrazu a část tepla už byla odevzdána do okolí.

I za pouhých 23 sekund (10 sekund probíhalo zvýšení napětí z 50 kV na 80 kV a 13 sekund probíhalo samotné měření) se zvýšila teplota o 12,3 °C z 42,6 °C (teplota na konci měření 50 kV u poškozené koncovky) na výše zmíněnou teplotu 54,9 °C.



Obrázek 6-13 Povrchová teplota nejteplejšího místa po průrazu poškozené kabelové koncovky

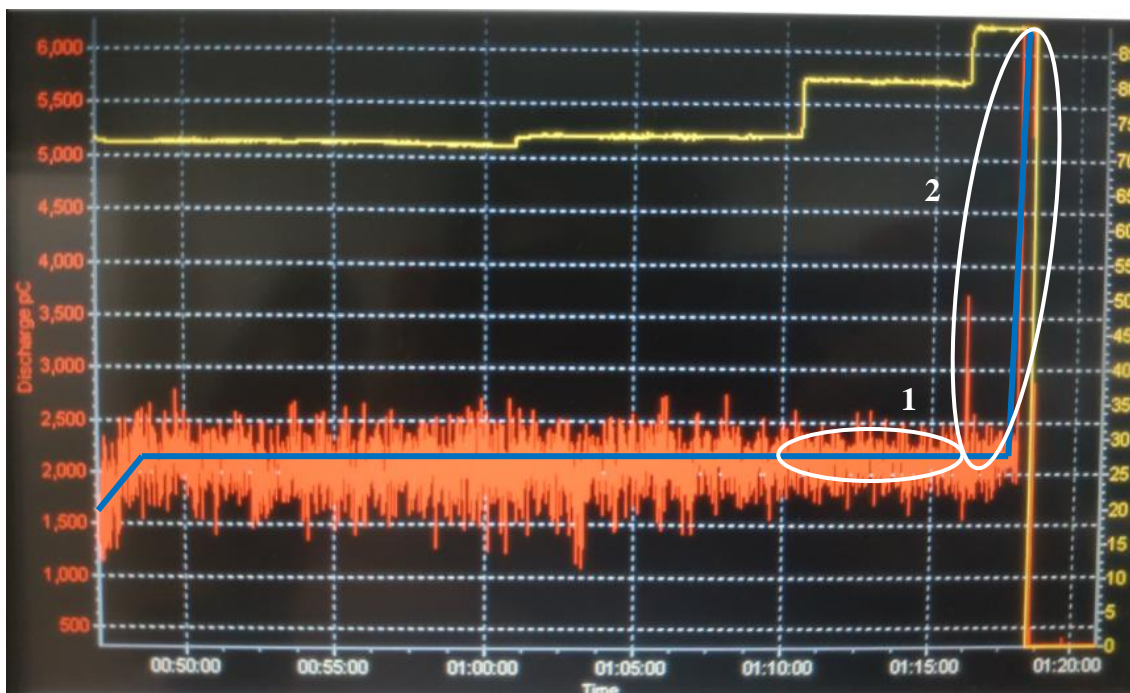
6.5 Napěťová hladina 90 kV a 100 kV

Pro zjištění průrazného napětí nepoškozené kabelové koncovky bylo prováděno zvyšování napětí jen s krokem 10 kV a čas působení dané napěťové hladiny byl snížen na 5 minut.

6.5.1 Nepoškozená kabelová koncovka (referenční měření)

Měření na napěťové hladině 90 kV začíná na grafu (Obrázek 6-14) až v čase 1:10:00 a to skokovým zvýšením napětí z 80 kV na 90 kV. Změřené hodnoty jsou v grafu označeny jako oblast 1. Hodnota trendu náboje je v oblasti 1 stálá, a to na hodnotě 2 100 pC, což je stejná hodnota, jakou měl trend již při měření na hladině 80 kV.

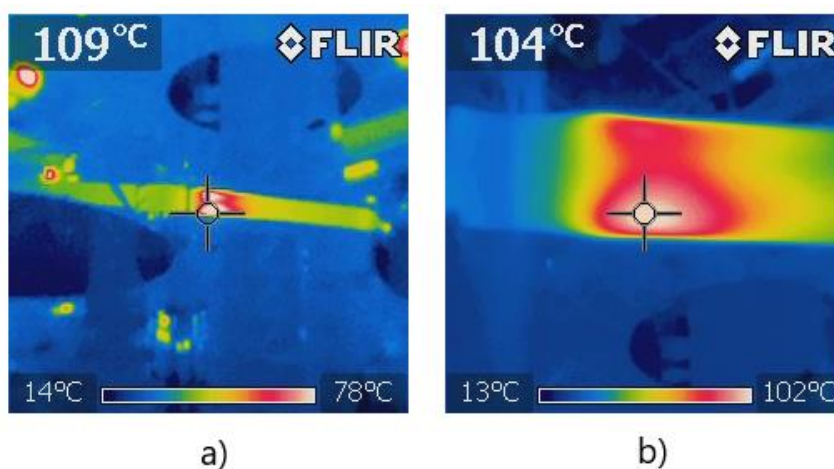
Měření na napěťové hladině 100 kV je v grafu (Obrázek 6-14) zobrazeno jako oblast 2. Tato oblast začíná v čase 1:16:00 zvýšením napětí na 100 kV. Trend v oblasti 2 měl nejprve stejnou hodnotu jako při měření na hladině 90 kV, ale po 90 sekundách dochází ke strmému růstu trendu. Růst končí na hodnotě náboje 6 000 pC a zde setrvává asi 30 sekund, dokud není laboratorní měření ukončeno (v grafu není vidět, protože průběh hodnot náboje zde překrývá průběh měřeného napětí). Laboratorní měření bylo ukončeno z důvodu, že změřené hodnoty náboje, resp. jejich minimální a maximální hodnoty se od sebe odlišovaly minimálně, což může být projev požáru samotné kabelové koncovky. Po vizuální prohlídce se však požár nepotvrdil.



Obrázek 6-14 Závislost hodnoty náboje PD na čase u nepoškozené kabelové koncovky na hladině 90 kV a 100 kV

Z důvodu dodržení bezpečné vzdálenosti pro tyto hodnoty napětí bylo velmi těžké změřit povrchovou teplotu v nejteplejších místech kabelové koncovky (ve výbojovém kanálu). Z fotografie pořízené pomocí termokamery z větší vzdálenosti v průběhu měření lze vidět, že změřené teploty se pohybují kolem 110 °C.

Minutu po ukončení měření nábojů PD, kdy byla možnost přiblížit se blíž k testovanému objektu, byla na kabelové koncovce naměřena povrchová hodnota 104 °C (Obrázek 6-15). Ale z důvodu, že při měření té samé kabelové koncovky na hladině 80 kV byla změřena daleko vyšší teplota (128 °C), musela být reálná teplota alespoň stejná nebo vyšší.



Obrázek 6-15 Povrchová teplota referenční kabelové koncovky při 100 kV a) v průběhu měření b) po ukončení měření

6.6 Vyhodnocení stavu kabelové koncovky

Poškozená i nepoškozená kabelová koncovka byly po ukončení jejího měření a vychladnutí odstříženy z testovaného objektu. Po odstřížení byly koncovky rozříznuty a byla provedena jejich podrobná kontrola pro zjištění dopadů testování.

Nejprve byla prohlédnuta referenční kabelová koncovka (viz Obrázek 6-16). Na první pohled bylo patrné, že většina řídicí vrstvy kabelové koncovky (vrstva se zelenou barvou) se nepřilepila na izolaci kabelu. Důvodem bylo nedostatečné prohřátí kabelové koncovky při její instalaci. Nepřilepením řídicí vrstvy po celé délce izolace kabelu uvnitř kabelové koncovky vzniklo v kabelové koncovce nedokonalé řízení elektrického pole. To mělo za následek zvýšení výbojové činnosti. Jediným místem, kde se řídicí vrstva přilepila na izolaci, bylo místo, kde probíhaly PD. Bylo to nejspíše z důvodu, že PD způsobily dostatečně vysokou teplotu pro přilepení řídicí vrstvy.

Další zajímavou věcí byla absence jakéhokoliv důkazu o vytvoření či působení výbojového kanálu, který začal být patrný na termokameře od napěťové hladiny 80 kV.



Obrázek 6-16 Rozříznutá referenční kabelová koncovka

Následně byla prohlédnuta poškozená kabelová koncovka. Kontrolou v této poškozené kabelové koncovce (Obrázek 6-17) bylo rovněž zjištěno, že se její řídicí vrstva nepřilepila k izolaci kabelu, kromě míst, kde opět docházelo k výbojové činnosti. Zajímavostí také je, že průrazný výboj byl přenesen řídicí vrstvou a jediným poškozením izolace kabelu bylo proražení zbytku izolace v místě úmyslného poškození (Obrázek 6-18). V místě označeném číslem 1 v obrázku (Obrázek 6-17) lze vidět řídicí vrstvu umazanou od sazí, které vznikly průrazným výbojem.



Obrázek 6-17 Rozříznutá poškozená kabelová koncovka



Obrázek 6-18 Zuhelnatělý zbytek řídicí vrstvy po průchodu průrazného výboje

7. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se v teoretické části zabývala definováním jednotlivých prvků kabelového souboru, jejich možnými poruchami a závadami, a jak je odhalit dříve, než způsobí totální zničení daného komponentu. V praktické části byl pak vybrán jeden komponent – kabelová koncovka, která byla podrobena výdržným zkouškám a degeneračním zkouškám. Během těchto zkoušek byly měřeny velikosti nábojů PD.

Naměřené hodnoty jak náboje, tak i napětí závisí na velké spoustě faktorů, které mají menší nebo větší vliv. Mezi tyto faktory patří: teplota, tlak, vlhkost, množství nečistot v izolaci, soustřednost kabelu, prohřátí kabelové koncovky a mnoho dalších. Z těchto důvodů se provádí několik desítek sérií testů, aby bylo možné pomocí statistiky a pravděpodobnosti určit chování kabelové koncovky na dané napěťové hladině. Ale z důvodu časové náročnosti těchto testů a vytížení vysokonapěťové laboratoře byla provedena jen jedna série testů pro každou kabelovou koncovku.

Testovaným komponentem byla vnitřní teplem smrštitelná kabelová koncovka POLT – 24D/1XI od firmy Raychem, kterou lze použít do 24 kV. Její datasheet se nachází v příloze A. V rámci testování byly instalovány dvě kabelové koncovky, jedna bez poškození a druhá, která byla úmyslně poškozena pomocí vyvrtané dírky. Každá z nich byla postupně nainstalována na kabel 22-AXEKVCE s průřezem 240 mm² od firmy NKT.

Jedním z nejdůležitějších parametrů při měření výbojové činnosti je její iniciační napětí. Iniciační napětí u nepoškozené kabelové koncovky bylo 25 kV a počáteční náboj PD se pohyboval mezi 100 – 120 pC. U poškozené kabelové koncovky se PD objevily už při napětí 13 kV s velikostí náboje 30 pC. Při zvýšení napětí na stejnou hladinu jako u nepoškozené kabelové koncovky byl náboj PD nejprve 250 pC, ale pak okamžitě klesl na úroveň 200 pC.

Při porovnání trendů v grafech od napěťové hladiny 30 kV do napěťové hladiny 80 kV lze vidět, že trendy mají podobné chování - v případě, že se napětí zvedá z nulové na požadovanou hodnotu, v počáteční oblasti se vždy nachází rostoucí trend, který je následován klesajícím trendem, který se ustálí na určité hodnotě a setrvává zde po určitý čas. Podobné chování se objevuje i v jiných oblastech.

Na vyšších napěťových hladinách (90 kV a 100 kV) je chování jiné - nedochází ke změnám trendu, a trend tudíž nevykazuje stoupající a klesající tendence (mimo stav těsně před jejich proražením).

U výdržných a degradačních zkoušek bylo kromě velikosti výbojové činnosti také měřeno povrchové oteplení v 5minutových intervalech. Při napětích, které jsou minimálně 1,25násobkem jmenovité hodnoty (30 kV) je téměř nemožné zjistit, zda je kabelová koncovka nějak poškozena. Rozdíl počáteční a koncové teploty u obou koncovek se byl jen kolem 0,5 °C. Tento rozdíl teplot je zanedbatelný, a lze ho považovat za chybu měření. Na vyšších napěťových hladinách se tento rozdíl začínal zvětšovat.

Na hladině 50 kV byl už rozdíl 5,8 °C u nepoškozené kabelové koncovky, kdežto u poškozené byl už rozdíl 12,3 °C. Rozdíl povrchových teplot mezi poškozenou a nepoškozenou kabelovou koncovkou se pohyboval mezi 10 – 12 °C.

Testování nepoškozené kabelové koncovky bylo ukončeno na napěťové hladině 100 kV z důvodu podezření na její požár, který se nepotvrdil. U poškozené kabelové koncovky došlo k průrazu po 13 sekundách při přiloženém napětí 80 kV. Z těchto hodnot je patrné, že kabelové koncovky jsou dimenzovány na mnohem vyšší napětí, než je jejich jmenovitá hodnota.

Z výsledků měření a prohlídky kabelových koncovek je možné usoudit, že kabelové koncovky nelze diagnostikovat podle aktuální velikosti náboje PD, ale je nutné měřit hodnotu náboje kontinuálně nebo alespoň v časových úsecích s určitou periodou měření (např. co 3 měsíce) a z nich pak zjišťovat tendenci trendu náboje PD.

LITERATURA

- [1] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2022-12-04]. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz/course/view.php?id=259145>
- [2] Kabelová vedení. Svět energie [online]. Praha: ČEZ, c2020 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/kabelova-vedeni/vyklad>
- [3] Co víte o přípojkách ze závěsných kabelů a izolovaných vodičů?. *Elektrika* [online]. Brno, c1998-2022, 25.08.2017 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/co-vite-o-pripojках-ze-zavesnych-kabelu-a-izolovanych-vodicu/view>
- [4] *Dosahovaná úroveň kvality distribuce elektřiny: Souhrnná zpráva za rok 2021*. Děčín, 2021. Dostupné také z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/uroven-kvality-distribuce-elektriny>
- [5] Technické informace o distribuční soustavě elektřiny: Zpráva o dosažené úrovni kvality distribuce elektřiny a souvisejících služeb. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.egd.cz/technicke-informace-o-distribucni-soustave-elektriny>
- [6] Legislativní předpisy: Souhrnná zpráva o dosažené úrovni kvality distribuce elektřiny a souvisejících služeb za kalendářní rok 2021. Praha, 2021. Dostupné také z: <https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/legislativni-predpisy/>
- [7] Distribuční soustava. *Svět energie* [online]. Praha: ČEZ, c2020 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/distribucni-soustava/vyklad>
- [8] TOPOLÁNEK, David. *MMEZ – Distribuční a průmyslové sítě 1. přednáška: Distribuční sítě 110kV*. Brno, 2022, 50 s. Dostupné také z: <https://moodle.vut.cz/course/view.php?id=259145>
- [9] TOPOLÁNEK, David. *MMEZ – Distribuční a průmyslové sítě 1. přednáška: DISTRIBUČNÍ SÍTĚ NÍZKÉHO NAPĚTÍ*. Brno, 2022, 50 s. Dostupné také z: <https://moodle.vut.cz/course/view.php?id=259145>
- [10] Jsou podzemní kabelová vedení řešením pro českou krajinu?. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, c2022, 11. květen 2018 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/jsou-podzemni-kabelova-vedeni-resenim-ceskou-krajinu>
- [11] *Pro dodavatele: Standardy pro zařízení veřejného osvětlení*. Děčín, 2020. Dostupné také z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/uroven-kvality-distribuce-elektriny>
- [12] RAYCOMAT A.S. *SILOVÉ KABELOVÉ SOUBORY*. Velké Meziříčí, 2015. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/12467710-Energy-silove-kabelove-soubory-silove-kabelove-soubory.html>

- [13] SCHENK, Ferdinand. Jak se dělá kabel. *Elektro* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2011, 7/2011, **2011**(7), 49-52 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jak-se-dela-kabel--9622>
- [14] EXPONENT. *Environmental Impacts of Lead from Paper-Insulated Lead-Covered Cable*. Palo Alto, California, 2004, 49 s. Dostupné také z: <https://www.epri.com/research/products/000000000001009513>
- [15] ZEIFART, Tomáš. *Rozložení elektrického pole ve vysokonapěťových kabelových koncovkách a spojkách*. Praha, 2016. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10467/64664>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická; Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Kněnický.
- [16] *Medium Voltage - PILC – Aluminium: 33kV MV P1 Aluminium 3 Core DSTA Table 21*. Vereeniging, South Africa, 2006. Dostupné také z: <https://www.africancables.com/products.php?Medium-Voltage-PILC-Aluminium-18>
- [17] Rozdíl mezi PVC, PE a XLPE kabelovými izolačními materiály. *Luoyang Asian Sun Wire & Cable Co., Ltd.* [online]. Luoyang, 05 July 2017 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://cz.lyyrcable.com/news/the-difference-between-pvc-pe-and-xlpe-cable-50331536.html>
- [18] Zdravotní (ne)závadnost kabelových izolací: Přehled běžně používaných materiálů k izolaci kabelů a jejich působení na zdraví lidí a životní prostředí. ASOCIACE VÝROBCŮ KABELŮ ČESKÉ A SLOVENSKÉ REPUBLIKY. *Asociace výrobců kabelů a vodičů* [online]. Jihlava: Asociace výrobců kabelů a vodičů ČR a SR, Zář 2015 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.vyrobci-kabelu.cz/kvalita-kabelu/zdravotni-nezavadnost-kabelovych-izolaci/>
- [19] N2XS(F)2Y (6 / 10 kV): Jednožilový kabel s VPE izolací, podélně vodotěsný, s vnějším pláštěm z PE. In: *Allkabel: Kabelové centrum* [online]. Žebrák, c2011 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <http://www.allkabel.eu/vysokonapetove-kabely-n2xsf2y-6-10-kv/>
- [20] What are the benefits of EPR insulated cables? *ELAND CABLES* [online]. London, c2022 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.elandcables.com/the-cable-lab/faqs/faq-what-are-the-benefits-of-epr-insulated-cables>
- [21] MORAVEC, Jan. Nejdůležitější izolanty používané v kabelové technice - 1. díl: Plasty: Síťovaný polyetylén. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, c2022, 3. únor 2016 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/nejdulezitejsi-izolanty-pouzivane-v-kabelove-technice-1-dil-plasty>
- [22] ČERMÁK, Michal. *Analýza úrovně síťování kabelové izolace*. Plzeň, 2012. Dostupné také z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/2665>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická; Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Radek Polanský.

- [23] NKT S.R.O. *10-AVXEKVCVEY*. Kladno, c2019. Dostupné také z: <https://www.nkt.cz/nase-vyroby/vn-kabely-do-50-kv/energeticke-kabely/10-avxekvcvey>
- [24] ČSN IEC 60050-461. *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 461: Elektrické kabely*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 164 s.
- [25] KYNČL, Tadeáš. *Vliv kabelových souborů na výbojovou činnost v kabelech*. Plzeň, 2017. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11025/27968>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická; Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Josef Pihera.
- [26] "IEEE Guide for Selection and Application of Terminations for Shielded AC Power Cable Rated 5 kV to 46 kV," in IEEE Std 1637-2020 (Revision of IEEE Std 1637-2010) , vol., no., pp.1-54, 5 Feb. 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9351807.
- [27] RAYCOMAT A.S. *Spojky VN*. Velké Meziříčí, c2015. Dostupné také z: <https://www.raycomat.cz/katalogy-a-ceniky>
- [28] NKT S.R.O. *Příslušenství pro vn kabely 12,7 kV až 42 kV*. Kladno, c2018. Dostupné také z: <https://www.nkt.cz/hledat?tab=downloads&dtab=catalogues>
- [29] BAKER INSTITUTE. SF6: The Little Gas That Could... Make Global Warming Worse. *Forbes* [online]. New York: Forbes Media, c2022, March 25, 2021 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/thebakersinstitute/2021/03/25/sf6-the-little-gas-that-could-make-global-warming-worse/?sh=763ea8fd22ad>
- [30] RAYCOMAT A.S. *Utěšňovací systémy*. Velké Meziříčí, c2015. Dostupné také z: <https://www.raycomat.cz/katalogy-a-ceniky>
- [31] RAYCOMAT A.S. *Trubice a manžety*. Velké Meziříčí, c2015. Dostupné také z: <https://www.raycomat.cz/katalogy-a-ceniky>
- [32] TICHOMIROV, Vladimír a Marek KERVITCER. Řešení stavebních vad a poruch – rutinní postup nebo expertní přístup?. *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o, c2001-2022, 13.1.2020 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/20100-reseni-stavebnich-vad-a-poruch-rutinni-postup-nebo-expertni-pristup>
- [33] Systém stavebně technické prevence: Definice pojmů. *Ústav územního rozvoje* [online]. Brno, c2022 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://www.uur.cz/stavebni-rad/system-stavebne-technicke-prevence/>
- [34] KUČERA, Miroslav. *Účinky vícefaktorového namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů*. Brno, 2009. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/22825>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Zdenka Rozsivalová.
- [35] RÁČEK, Tomáš. *DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE PLNĚNÉ NANOČÁSTICEMI* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/31814>. Diplomová práce. Vysoké

- učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Helena Polsterová.
- [36] ŠEFL, Ondřej. *Aging of Insulation Materials under Non- Standard Voltage Stresses* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/70098>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická; Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Radek Procházka.
- [37] TRNKA, Pavel. *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů*. Plzeň, 2007. ISSN: 1823-4564. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11025/394>
- [38] DOC. ING. VIMMROVÁ, Alena , Ph.D. *Degradace polymerů*. Praha, [2016]. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/40763611-Degradace-polymeru-polymeru-plasty-zkratky-polymeru-rozdelene-polymeru-doc-ing-alena-vimmrova-ph-d-interakce-materialu-a-vnejsiho-prostredi.html>
- [39] ING. HANGYA, Josef. *Účinky elektrického namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů* [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-12-19]. <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/74179>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. Zdenka Rozsivalová.
- [40] DUCHANOVÁ, Karolína. *Stárnutí izolačních systémů a modelování stárnutí* [online]. Plzeň, 2011 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/yrqf5x/>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Bohumil Paslavský
- [41] DUCHANOVÁ, Karolína. *Stárnutí izolačních systémů a modelování stárnutí* [online]. Plzeň, 2011 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/yrqf5x/>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Bohumil Paslavský.
- [42] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. 1A. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [43] DVOŘÁK, Martin. *Moderní metody sledování degradace izolačních systémů velkých elektrárenských točivých strojů* [online]. České Budějovice, 2010 [cit. 2022-12-07]. Available from: <https://theses.cz/id/zplvq5/>. Bachelor's thesis. University of South Bohemia in České Budějovice, Pedagogical Fakulty. Thesis supervisor Ing. Michal Šerý.
- [44] KRBAL, Michal. *Technika vysokých napětí*. Brno, [2014]. Dostupné také z: <https://moodle.vut.cz/course/view.php?id=241842>
- [45] BAEV, D. Diagnostika vysokonapěťových kondenzátorů pro kaskádní napěťový násobič. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Krbal, Ph.D.
- [46] KRBAL, Michal. *Klouzavé výboje – výboje na klouzavém uspořádání*. Brno. Dostupné také z: <https://moodle.vut.cz/course/view.php?id=241842>

- [47] TRNKA, Pavel, Josef PIHERA a Martin ŠIRŮČEK. Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech. *Elektro* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2010, 1/2010, **2010**(7), 18-22 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricke-stromecky-fenomen-v-elektroizolacnich-materialech--10217>
- [48] JABŮREK, Ladislav. *Studium elektrického namáhání drážkových izolací* [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/22824>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [49] *Zemní spojení v trojfázových soustavách*. Praha, [2008]. Dostupné také z: <https://www.powerwiki.cz/wiki/ES>
- [50] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006 [cit. 2022-12-08]. ISBN 80-708-0617-6. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/obsah.html
- [51] ČSN EN 60544-1 ED. 2. Elektroizolační materiály - Stanovení účinků ionizujícího záření - Část 1: Interakce ionizujícího záření a dozimetrie. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [52] REJMON, Jiří. Pokládka kabelů a pohled revizního technika. *Elektrika* [online]. Brno, c1998-2022, 31.03.2009 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/pokladka-kabelu-a-pohled-revizniho-technika>
- [53] ČSN EN 60909-0 ED. 2. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 0: Výpočet proudů*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [54] ALJOHANI, Abdulaziz a Ibrahim HABIBALLAH. High-Impedance Fault Diagnosis: A Review. *Energies* [online]. 2020, **13**(23), 6447. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13236447
- [55] JANČÍK, Jaroslav a Jiří VACÁTKO. Diagnostika v řídicích systémech. *Automa* [online]. Děčín, 2008, 2/2008, **2008**(2), 62-66 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/diagnostika-v-ridicich-systemech-2008_02_36672_5719/
- [56] KŘIVÁNEK, František. Diagnostika kabelových vedení 22 kV v PREDistribuce, a.s. a vývoj poruchovosti kabelů VN za dobu používání diagnostiky částečných výbojů [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/10067>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická; Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [57] "IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above," in IEEE Std 400-2012 (Revision of IEEE Std 400-2001) , vol., no., pp.1-54, 5 June 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6213052.

- [58] What is a Rogowski Coil?. *Accuenergy* [online]. Toronto, c2022, 26. 1. 2022 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.accuenergy.com/articles/what-is-a-rogowski-coil/>
- [59] "IEEE Guide for the Application of Rogowski Coils used for Protective Relaying Purposes," in IEEE Std C37.235-2021 (Revision of IEEE Std C37.235-2007) , vol., no., pp.1-57, 12 April 2022, doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9756401.
- [60] VOJÁČEK, Antonín. Co je, k čemu je a jak funguje Rogowského cívkka ?. *Hw.cz: vše o elektronice a automatizaci* [online]. Praha, c1997-2022, 29. října 2007 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>
- [61] W. Chonpathomphikunloed, B. Paophan, A. Kunakorn, P. Yutthagowith and M. Leelachindakraierk, "Analyses of Rogowski coils for partial discharge measurement," *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, 2017, pp. 378-381, doi: 10.23919/ISEIM.2017.8088764.
- [62] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 68 s. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/Vysledky.aspx>
- [63] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [64] PNE 34 7626. Provozní zkoušky VN kabelových vedení v distribuční síti do 35 kV. Praha: Energoprojekt Praha, 2001.
- [65] ČSN EN IEC 60071-1 ED. 3. *Koordinace izolace - Část 1: Definice, principy a pravidla*. Ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 36 s. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/Vysledky.aspx>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

A	Ampér
AC napětí	střídavé napětí
AIS	Air Insulated Switchgear
cm	centimetr
CO ₂	Oxid uhličitý
ČSN	Česká státní norma
ČR	Česká republika
DAC napětí	tlumené střídavé napětí
DC napětí	stejnoseměrné napětí
DS	distribuční soustava
El. energie	elektrická energie
El. pole	elektrické pole
EPR	etylen-propylenová pryž
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
GIS	Gas Insulated Switchgear
Hz	Hertz
kHz	kilohertz
kV	kilovolty
kV/cm	kilovolt na centimetr
kΩ	kiloohmy
LC rezonance	rezonance způsobená frekvencemi cívky a kondenzátoru
MHz	Megahertz
mm	milimetr
mm ²	milimetry čtvereční
M12	šroub o průměru 12 mm
M16	šroub o průměru 16 mm
Např.	například
nC	nanocoulomb
nm	nanometr
NN	nízké napětí
O ₂	Kyslík
O ₃	Ozón
pC	pikocoulomb
PD	Partial Discharge (částečný výboj)
PE	Polyetylen
PILC kabel	kabel s papírovou izolací a olověným pláštěm
PVC	Polyvinylchlorid

RLC článek	článek obsahující odpor, cívku a kondenzátor
SF ₆	Fluorid sířový
TDR	Reflektometrie v časové oblasti
tzv.	takzvaný
tzn.	to značí
UV záření	Ultrafialové záření
VIS	Vacuum Insulated Switchgear
VLF napětí	napětí s velmi nízkou frekvencí
VN	vysoké napětí
VUT	Vysoké učení technické v Brně
VVN	velmi vysoké napětí
ZnO	Oxid zinečnatý
XLPE	zesíťený polyetylen
Ω	ohm
°C	stupeň Celsia

Symbols:

<i>A</i> a <i>B</i>	materiálové konstanty	
<i>a</i>	konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul	
<i>k</i> , <i>n</i> , <i>b</i>	konstanty, které je potřeba určit empiricky	
<i>c</i>	objemová tepelná kapacita	(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)
<i>C</i>	kapacita materiálu	(F)
<i>d</i>	tloušťka materiálu	(m)
<i>E</i>	intenzita přiloženého elektrického pole	(V·m ⁻¹)
<i>I</i>	proud	(A)
<i>I_R</i>	odporový proud	(A)
<i>I_C</i>	kapacitní proud	(A)
<i>I_D</i>	ztrátový složka celkového proudu	(A)
<i>I_{char}</i>	nabíjecí složka celkového proudu	(A)
<i>I_T</i>	celkový proud	(A)
<i>μs</i>	mikrosekunda	(μs)
<i>P_z</i>	ztrátový výkon	(W)
<i>R</i>	univerzální plynová konstanta	(J·grad ⁻¹ ·mol ⁻¹)
<i>R</i>	odpor izolace testovaného kabelového souboru	(Ω)
<i>t</i>	čas	(s)
<i>T</i>	teplota	(K)
<i>tg δ</i>	ztrátový úhel materiálu	(S·m·s·F ⁻¹)
<i>U</i>	napětí	(V)
<i>U_{ref}</i>	velikost odraženého napětí	(V)
<i>U_{inc}</i>	hodnota dopadajícího napětí na nespojitost	(V)

W_a	aktivační energie procesu	(eV)
Z	velikost impedance kondenzátoru	(Ω)
Z_d	impedance nespojitosti	(Ω)
Z_o	charakteristická impedance kabelu	(Ω)
γ	elektrická vodivost	($S \cdot m^{-1}$)
δ	ztrátový úhel	($^\circ$)
φ	úhel, který svírá napětí a proud	($^\circ$)
τ	životnost izolace	(hodiny)
τ_E	doba života	(hodiny)
λ	součinitel tepelné vodivosti	($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
ϑ	teplota	($^\circ C$)
ρ	koeficient odrazu	(-)
ω	úhlová frekvence přiloženého elektrického pole	(s^{-1})
ε_r	relativní emisivita	(-)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - DATASHEET KABELOVÉ KONCOVKY POLT – 24D/1XI.....	85
PŘÍLOHA B - FOTODOKUMENTACE INSTALACE KABELOVÉ KONCOVKY	86

**Příloha A - Datasheet kabelové koncovky
POLT – 24D/1XI**

Příloha B - Fotodokumentace instalace kabelové koncovky



Sejmutí pláště kabelu



Kabel po sejmutí pláště



Odstranění izolace kabelu



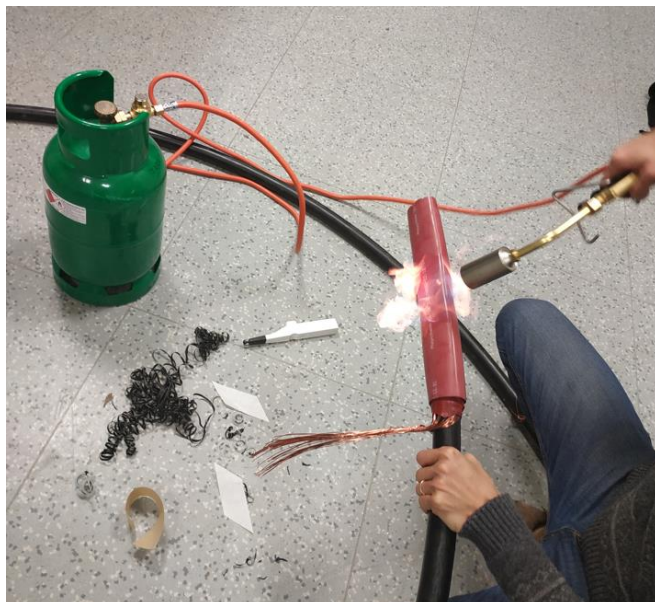
Nástroj pro odstranění pláště kabelu



Aplikace výplňových pásek



Ohřev kabelové koncovky



Ohřev kabelové koncovky