ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Rozložení elektrického pole ve vysokonapěťových kabelových koncovkách a spojkách

Electrical Field Distribution in Medium Voltage Cable Terminations and Joints

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Martin Kněnický

Tomáš Zeifart

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Zeifart**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Rozložení elektrického pole ve vysokonapěťových kabelových koncovkách a spojkách**

Pokyny pro vypracování:

1. Vysokonapěťové kabely a spojky.
2. Problematika rozložení elektrického pole na koncích vysokonapěťových kabelů.
3. Simulace rozložení elektrického pole u vysokonapěťových kabelových koncovek a spojek metodou konečných prvků.

Seznam odborné literatury:

[1] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. High Voltage Engineering Fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann/Newnes, 2000.
[2] Nikolajevic, S.V.; Pekaric-Nad, N.M.; Dimitrijevic, R.M., "A new concept in construction of cable terminations for medium voltages," in Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.13, no.3, pp.712-717, Jul 1998.
[3] De Vivo, B.; Spagnuolo, G.; Vitelli, M., "Variability analysis of composite materials for stress relief in cable accessories," in Magnetics, IEEE Transactions on, vol.40, no.2, pp.418-425, March 2000.

Vedoucí: Ing. Martin Kněnický

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne ……. …….

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Martinu Kněnickému za čas, připomínky a cenné rady, které mi pomohly při vypracování bakalářské práce.

Anotace

Tématem této práce je rozbor základních typů v současnosti používaných silových kabelů na hladině vysokého napětí a rozbor používaných kabelových koncovek a spojek. Další částí je teoretický popis rozložení elektrického pole v těchto kabelech a zakončeních a následná simulace rozložení elektrického pole metodou konečných prvků. Cílem práce je nalezení optimálního způsobu řízení elektrického pole vysokonapěťových kabelů.

Klíčová slova

vysokonapěťový kabel, kabelová koncovka, kabelová spojka, zesítěný polyetylen, řízení elektrického pole, simulace, metoda konečných prvků

Annotation

The main topic of this work is analysis of medium voltage power cables and analysis of cable terminations and junctions which are currently in use. Next part is focused on theoretical description of electrical field distribution in these cables and terminations followed by simulation of electrical field using finite element method. The main goal is finding an optimal solution of electrical field control for termination of medium voltage cables.

Key words

medium voltage cable, cable termination, cable junction, crosslinked polyethylene, electrical field control, simulation, finite element method

Obsah

Seznam použitý symbolů 13
Úvod 15
1 Vysokonapěťové kabely a spojky 17
1.1 Silové kabely 17
1.1.1 Kabely s papírovou izolací a olověným pláštěm 17
1.1.2 Kabely s plastovou a pryžovou izolací 18
1.1.3 Kabely s izolací ze zesítěného polyetylenu 18
1.1.4 Porovnání jednotlivých technologií 20
1.2 Části vysokonapěťových kabelů 20
1.2.1 Jádro 20
1.2.2 Vnitřní polovodivá vrstva 21
1.2.3 Izolace 22
1.2.4 Vnější polovodivá vrstva 22
1.2.5 Stínění 22
1.2.6 Separační vrstvy 23
1.2.7 Pancíř 23
1.2.8 Plášť a ochranný obal 23
1.3 Kabelové koncovky 24
1.3.1 Dolévací koncovky 24
1.3.2 Za tepla smrštitelné koncovky 25
1.3.3 Za studena smrštitelné koncovky 26
1.3.4 Za studena nasouvací koncovky 27
1.4 Kabelové soubory 27
1.4.1 Přímé spojky 28
1.4.2 Přechodové spojky 28
1.4.3 Opravné spojky 29

2 Problematika rozložení elektrického pole na koncích vysokonapěťových kabelů 30
2.1 Rozložení elektrického pole uvnitř kabelu 30
2.2 Rozložení elektrického pole na koncích kabelu 34
2.2.1 Bez řízení elektrického pole 34
2.2.2 Geometrické řízení elektrického pole pomocí deflektoru 34
2.2.3 Řízení elektrického pole pomocí SCT 35
2.2.4 Řízení elektrického pole pomocí SCT a zabudované elektrody 36
3 Simulace rozložení elektrického pole u VN kabelových koncovek a spojek metodou konečných prvků 37
3.1 Vytvoření modelu kabelu 37
3.2 Simulace bez řízení elektrického pole 39
3.3 Simulace s řízením elektrického pole pomocí SCT 40
3.3.1 Se změnou relativní permitivity SCT 40
3.3.2 Se změnou tloušťky SCT 41
3.4 Simulace s řízením elektrického pole geometrickou metodou 42
3.5 Simulace s řízením elektrického pole pomocí HPL s EE 43
3.5.1 Varianta s HPL podsunutou pod vnější polovodivou vrstvu 43
3.5.2 Varianta s vnější polovodivou vrstvou zasunutou do HPL 45
3.6 Simulace přímé kabelové spojky s řízením pole pomocí SCT 46
Závěr 49
Zdroje 51
Seznam grafů, obrázků a tabulek 53
Grafy 53
Obrázky 53
Tabulky 54

Seznam použitý symbolů

a (mm)	- poloměr jádra
b (mm)	- poloměr stínění
C (μF/km)	- kapacita
Cu	- měď
ČR	- Česká republika
d (mm)	- tloušťka
$\vec{E}$ (kV/mm)	- intenzita elektrického pole
EAl	- elektrovodný hliník
ECu	- elektrovodná měď
EE	- vložená elektroda
E_p (kV/mm)	- elektrická pevnost
EPR	- etylen propylenová pryž
f (Hz)	- frekvence
FEA	- analýza konečných prvků
FEM	- metoda konečných prvků
G	- uzemněno
HDPE	- vysokohustotní polyetylen
HPL	- vrstva s vysokou permitivitou
I (A)	- elektrický proud
I_C (A/km)	- nabíjecí proud kabelu
K	- integrační konstanta
l (m)	- délka
LPE	- lineární polyetylen
MDPE	- polyetylen se střední hustotou
NG	- neuzemněno
p (Pa)	- tlak
PE	- polyetylen
PILC	- kabel s papírovou izolací a olověným pláštěm
PVC	- polyvinylchlorid
Q (C)	- elektrický náboj
Q_C (C)	- celkový elektrický náboj
r (mm)	- poloměr
R_{20} (Ω/km)	- elektrický odpor stínění při normální teplotě
S (m^2)	- průřez

S_J (mm^2) - průřez jádra

S_S (mm^2) - průřez stínění

SCT - vrstva pro řízení elektrického pole

T (°C) - teplota

T (ms) - perioda

$tan\ \delta$ (-) - ztrátový činitel

T_P (°C) - teplota při přetížení

T_T (°C) - trvalá teplota

T_Z (°C) - teplota při zkratu

U - efektivní hodnota sdruženého napětí mezi dvěma fázovými vodiči

U_0 - efektivní hodnota střídavého napětí mezi vodičem a zemí

U_m - maximální dimenzovaná efektivní hodnota sdruženého napětí

VN - vysoké napětí

XLPE - zesítěný polyetylen

ε (-) - absolutní permitivita

ε_0 (-) - permitivita vakua

ε_r (-) - relativní permitivita

ρ ($kg \cdot m^{-3}$) - hustota

ρ ($\Omega \cdot m$) - rezistivita

ρ ($\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$) - rezistivita

σ ($S \cdot m \cdot mm^{-2}$) - elektrická vodivost

τ (C) - lineární náboj

φ (V) - elektrický potenciál

Úvod

V současné době neustále roste spotřeba elektrické energie a stále více se setkáváme s případy, kdy je potřeba přivést energii do míst, kam není možné z technických nebo jiných důvodů přivést venkovní vedení. S tímto problémem se můžeme setkat například v hustě zastavěných městských oblastech. Řešením je využití podzemních kabelových vedení, která mohou být uložena přímo v zemině nebo ve speciálně k tomu určených kanálech a kolektorech. Toto řešení nám umožňuje přivádět elektrickou energii do požadovaných míst a zároveň skrýt kabelové vedení a místa náchylná k poruchám před okolním prostředím.

Mezi místa náchylná k poruchám se počítají především konce kabelů, kde dochází k nerovnoměrnému rozložení elektrického pole na koncích izolačních vrstev a ke zvýšení elektrického namáhání izolace. Konce kabelů musí být proto vhodně ošetřeny a to buď, koncovkami nebo spojkami v případě spojování dvou konců kabelů. V praxi se často setkáváme s případem, kdy se na jednom kabelovém vedení vyskytuje několik spojek a to po úsecích dlouhých pouze několik stovek metrů. Všem těmto zeslabeným místům musí být při znovuobnovování původních izolačních vlastností věnována zvýšená pozornost.

Tato práce se zaměřuje na základní rozbor v současnosti používaných kabelů, především s izolací ze zesítěného polyetylenu, na hladině vysokého napětí (1 kV až 52 kV) a způsobů jejich zakončování a spojování. Dále se zaměřuje na problematiku rozložení elektrického pole na koncích vysokonapěťových kabelů a na problematiku řízení tohoto pole. Ze získaných vědomostí jsou poté sestaveny počítačové modely koncovek a spojek. V simulacích rozložení elektrického pole pomocí metody konečných prvků je poté sledován vliv různých technologií a způsobů řízení na elektrické namáhání konce kabelu.

1 Vysokonapěťové kabely a spojky

1.1 Silové kabely

Kabely primárně určené k přenosu elektrické energie vysokého napětí (dále jen VN) nazýváme silové kabely a při jejich výběru se řídíme hodnotami napětí uvedenými ve tvaru U_0/U (U_m), kde U_0 (V) reprezentuje efektivní hodnotu střídavého napětí mezi vodičem a zemí, U (V) reprezentuje efektivní hodnotu sdruženého napětí mezi dvěma fázovými vodiči a U_m (V) reprezentuje maximální efektivní hodnotu sdruženého napětí na kterou je kabel dimenzován [1, 2]. V rozmezí VN se v ČR používají hladiny se jmenovitými hodnotami sdruženého napětí U 3, 6, 10, 20, 30 a 35 kV.

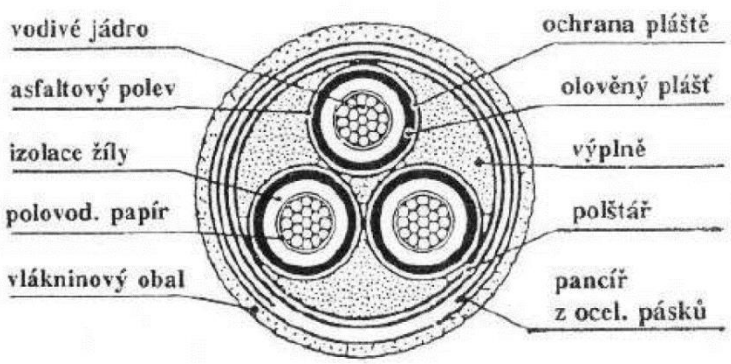
Základní částí VN kabelu je jádro a dále izolace a plášť. Sestava jádra a izolace se nazývá žíla a sestava jedné nebo více žil se nazývá kabel. Mezi další vrstvy, které se u jednotlivých typů kabelů liší, patří vnitřní a vnější polovodivé vrstvy, nevodivé a vodu blokující pásky, stínění, pancíř, výplňový materiál, nosné lano a ochranný obal [3]. Jednotlivé části a vrstvy kabelu mají specifické vlastnosti a účel. Použitím různých materiálů a různých průřezů jak pro jádra, tak pro izolační vrstvy lze ovlivnit výslednou proudovou zatížitelnost a jmenovité napětí kabelu. V současnosti používané kabely lze rozdělit do následujících kategorií.

1.1.1 Kabely s papírovou izolací a olověným pláštěm

Na starších kabelových trasách se dodnes setkáváme s kabely založenými na PILC (Paper Insulated Lead Covered) technologii s označením např. ANKTOYPV. Jedná se o kabely s izolací tvořenou kabelovým papírem impregnovaným stékavým nebo nestékavým impregnantem. Tato izolace se vytváří ovíjením pásky z kabelového papíru po povrchu jádra nebo po povrchu uhlíkového papíru. Výsledná izolace dosahuje tloušťky jednotek až desítek milimetrů podle požadované izolační hladiny. Následně dochází k jejímu sušení a impregnaci kabelovým olejem, který slouží k vyplnění vzduchových dutin v papíru a k zvýšení elektrické pevnosti [4]. Impregnací se také zlepšuje celková homogenita izolace a zároveň se omezuje vznik částečných výbojů v dutinách. Papír se vyrábí ze sulfátové celulózy v tloušťce 15 až 170 μm [5]. Používaný olej je kombinací minerálního oleje a kalafuny, která ovlivňuje závislost viskozity na teplotě. Olověný plášť plní zároveň funkci stínění a ochrany před pronikáním vlhkosti. Příčný řez PILC kabelem je na obrázku číslo 1.

Na koncích PILC kabelů může docházet k vysychání impregnační látky a tím ke snížení elektrické pevnosti a zhoršení izolačních vlastností obecně. V postiženém místě pak může dojít k elektrickému průrazu izolace mezi jádrem a uzemněným stíněním. Řešením vysychání je použití tzv. dolévacích koncovek. Další nevýhodou PILC kabelů je jejich vysoká hmotnost zapříčiněná pláštěm z olova. V tomto plášti navíc může docházet ke vzniku trhlin a následnému

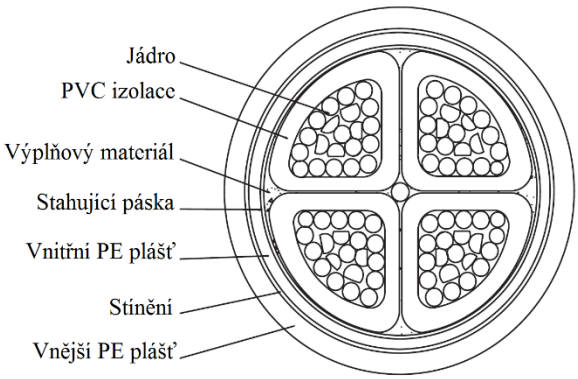
pronikání vlhkosti. V současnosti se již PILC kabely nepokládají, ale stále se s nimi setkáváme na všech vysokonapěťových hladinách. Jejich technologie byla nahrazena modernější technologií založenou na plastech a polymerech.



Obrázek č. 1 – Příčný řez třížilovým PILC kabelem [6]

1.1.2 Kabely s plastovou a pryžovou izolací

Na napěťové hladině 3 a 6 kV se můžeme setkat s kabely s plastovou izolací bez polovodivých vrstev a bez pancíře označované AYKCY, CYKCY apod. Jádra jednotlivých žil mají sektorový průřez a izolace bývá tvořena polyvinylchloridem (dále jen PVC) nebo polyetylenem (dále jen PE). Všechny tři resp. čtyři žíly jsou staženy plastovou páskou, která může být překryta další vrstvou PVC. Na této vrstvě se nachází stínění z měděné pásky a nad stíněním PVC plášť. Na hladině 3 a 6 kV se používají také kabely s izolací vyrobenou z etylen propylenové pryže (dále jen EPR). Označují se např. CHCU nebo CBVU [7]. Dále se můžeme setkat i s kabely s izolací ze zesítěného polyetylenu.



Obrázek č. 2 – Příčný řez čtyřžilovým plastovým kabelem

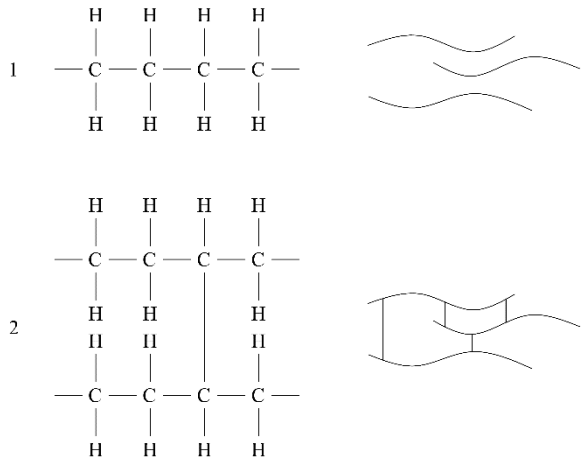
Zdroj: vlastní zpracování dle [8]

1.1.3 Kabely s izolací ze zesítěného polyetylenu

Izolace těchto kabelů je tvořena tzv. zesítěným polyetylenem (dále jen XLPE), který je variantou lineárního polyetylenu (dále jen LPE). Makromolekuly LPE mezi sebou netvoří vazby, ale vytváří pouze dlouhé řetězce. Výsledný materiál se při vyšších teplotách snáze

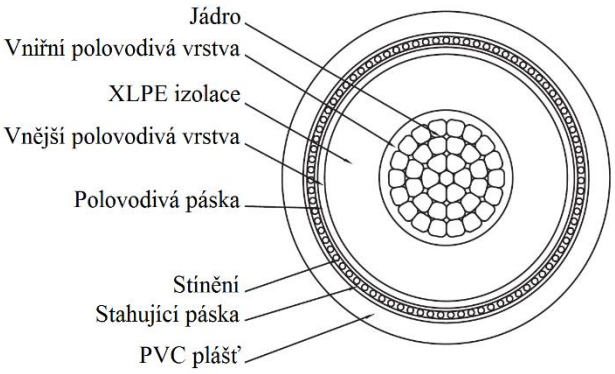
deformuje. Naopak XLPE tyto vazby mezi makromolekulami vytváří a výsledná izolace je charakterizována lepší tvarovou stálostí a lepšími mechanickými vlastnostmi při vyšších teplotách. Tyto vlastnosti umožňují trvale zatížit kabel proudem, při kterém dosáhne jádro pracovní teploty až 90 °C [2, 8]. Molekuly a řetězce LPE označené číslem 1 a XLPE označené číslem 2 jsou zobrazeny na obrázku číslo 3.

LPE se nanáší pomocí extruze a poté se pod tlakem zahřívá a v reakci s přídavnými peroxidy dochází k jeho zesítění. Zesítění LPE může být také dosaženo po ozáření elektronovým paprskem nebo zdrojem radioaktivního záření [9]. Výsledný XLPE má oproti kabelům s izolací z LPE nebo papíru lepší celkovou homogenitu izolace, lepší termooxidační odolnost, vyšší zkratovou zatížitelnost, menší kapacitu a dielektrické ztráty, menší permitivitu a menší nabíjecí proud. Všechny tyto vlastnosti umožnují hotovému kabelu přenášet vyšší výkon. Další výhodou oproti PILC kabelům je možnost montáže v šikmých a svislých polohách díky absenci kabelového oleje, dále pak nižší hmotnost a jednodušší montáž kabelových spojek a koncovek. Kabely s XLPE izolací se označují např. AXEKVCE, NA2XSY apod. a můžeme se s nimi setkat na všech napěťových hladinách VN. Nákres XLPE kabelu je na obrázku číslo 4.



Obrázek č. 3 – Molekuly a řetězce LPE a XLPE

Zdroj: vlastní zpracování dle [8]



Obrázek č. 4 – Příčný řez jednožilovým XLPE kabelem

Zdroj: vlastní zpracování dle [8]

1.1.4 Porovnání jednotlivých technologií

Z hodnot v tabulce číslo 1 zjistíme, že impregnovaný papír má ze všech uvedených izolací největší relativní permitivitu ε_r. Výhodou této technologie je dlouholetá zkušenost s těmito typy kabelů. Nevýhodami jsou ztrátový činitel *tan δ*, teplotní expanze impregnační látky a její okamžitá degradace i při krátkodobém přehřátí, navlhání impregnantu, nutnost údržby kabelu a pracnost při zakončování a spojování kabelů z důvodu přítomnosti asfaltového polevu, olova a dalších špatně odstranitelných vrstev.

PVC se díky své vysoké elektrické pevnosti E_p používá u třížilových kabelů bez polovodivých vrstev do 6 kV. Z uvedených materiálů má největší ztrátový činitel. Teplotní stálost PVC, tím pádem i proudová zatížitelnost je oproti ostatním materiálům menší. Výhodou je snadné zakončování a spojování kabelů kvůli malému počtu vrstev a jejich snadnému oddělování.

EPR má nižší elektrickou pevnost než PVC, ale díky lepším teplotním vlastnostem je možné provozovat 6 kV kabely s touto izolací při větším zatížení.

Nejpoužívanějším izolačním materiálem je XLPE, případně LPE. Oba materiály mají podobnou elektrickou pevnost a malou relativní permitivitu a ztrátový činitel. Teplotní vlastnosti LPE jsou oproti XLPE horší a z toho vyplývá i menší proudová zatížitelnost. Všechny izolační materiály založené na polymerech jsou však odolnější vzhledem k degradaci v průběhu jejich života než kabely s papírovou izolací [5].

Tabulka č. 1 – Hodnoty parametrů jednotlivých izolačních materiálů

Materiál	Imp. papír	PVC	EPR	LPE	XLPE
E_p (kV/mm)	80	40 ÷ 50	17 ÷ 25	22 ÷ 27	22
ε_r (-)	2,7 ÷ 3,7	3,4	3 ÷ 5	2,2 ÷ 2,3	2,3
tan δ (-)	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
ρ (Ω·cm)	10^{18}	10^{15}	$10^{15} \div 10^{16}$	10^{10}	10^{18}
T_T (°C)	85	70	90	70	90
T_P (°C)	120	90	130	110	130
T_Z (°C)	160-220	135	250	150	250

Zdroj: vlastní zpracování dle [5]

1.2 Části vysokonapěťových kabelů

1.2.1 Jádro

Jádro slouží k přenosu elektrické energie a je vyrobeno z elektrovodného hliníku (dále jen EAl) nebo elektrovodné mědi (dále jen ECu). Oba materiály mají své výhody a nevýhody. Například jádra hliníkových kabelů musí být kvůli horším mechanickým vlastnostem po délce vyztužena ocelovým lanem [4]. Některé základní elektrické a fyzikální vlastnosti EAl a ECu jsou uvedeny v tabulce číslo 2.

Tabulka č. 2 – Elektrické a fyzikální vlastnosti EAl a ECu

Materiál	EAl	ECu
ρ ($\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$)	0,0266	0,0172
σ ($S \cdot m \cdot mm^{-2}$)	37,6	58,0
ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	2699	8890

Zdroj: vlastní zpracování dle [5]

Z hodnot v tabulce číslo 2 je patrné, že vodivost σ EAl je oproti ECu přibližně 65%. Chceme-li aby hliníkovým vodičem protékal stejný proud jako měděným vodičem, musí být výsledný průřez S jádra úměrně větší. I přes tuto překážku je výsledný hliníkový kabel lehčí a levnější, než při použití mědi a proto se dnes stále používá.

Samotné jádro kabelu není tvořeno vodičem plného průřezu, ale vodičem lanovaným z jednotlivých drátů o průměru 1,70 až 3,55 mm. U většiny kabelů se používá kruhový profil jádra, avšak u třížilových kabelů do 6 kV se můžeme setkat se sektorovým profilem. Použitý materiál, průřez a množství drátů ovlivňuje výslednou tuhost a ohebnost kabelu. Jmenovitý průřez jádra je dán součtem průřezů jednotlivých drátů. Jmenovité průřezy jader jsou uvedeny v následující řadě: 35, 50, 70, 95 120, 150, 185, 240, 300, 400, 500, 680, 1000 mm^2. Pro zmenšení vzduchových mezer v jádru se slaněná jádra dále komprimují a takto vytvořená jádra se dále opatřují izolačními vrstvami a celek poté nazýváme žílou. Výsledný vytvořený kabel může obsahovat jednu nebo více žil. Všechny žíly jsou poté zapouzdřeny v jednom ochranném obalu a tvoří tak celek [4, 10].

1.2.2 Vnitřní polovodivá vrstva

Vnitřní polovodivá vrstva je v přímém kontaktu s jádrem a podle normy ČSN IEC 60050-461 je definována jako „*Izolační stínící mezivrstva vyrobená z výtlačně lisovaného materiálu, kterou lze úplně odstranit.*“ Její primární funkcí je ovládání elektrického pole v izolaci. Může také vyhlazovat povrchy na rozhraních s izolací a pomáhat při vyplňování mezer na těchto rozhraních.

Název polovodivá vrstva může vést k domněnce, že se jedná o klasický polovodič. Ve skutečnosti je polovodivá vrstva tvořena zesítěným polymerem s přísadou uhlíkových sazí, které poskytují vrstvě elektrickou vodivost a relativní permitivitu v řádech tisíců na rozdíl od vodičů u kterých se relativní permitivita blíží nekonečnu [9, 11]. Čím vyšší relativní permitivitu tedy polovodivá vrstva bude mít, tím více se její vliv na rozložení elektrického pole bude podobat vodiči [12].

K vytvoření polovodivé vrstvy se používají extrudéry, ze kterých je za tepla kontinuálně vytlačována směs na vnější povrch jádra, přičemž nesmí docházet k jejímu zatékání do vnitřních částí jádra. Vyplněním nerovností na povrchu jádra polovodivou vrstvou se eliminují vzduchové

mezery a vzniká tak hladká vrstva pro řízení pole, která má na styku s izolací stejný potenciál jako jádro. Zarovnáním vzduchových mezer a ostrých hran se eliminují částečné výboje, ke kterým by mohlo na zmíněných místech docházet a které by způsobovaly degradaci izolace. Zároveň řídí elektrické pole tak, že siločáry vystupující z polovodivé vrstvy vstupují do izolace kolmo a elektrické namáhání izolace je poté rovnoměrnější. Bez zarovnání povrchu jádra polovodivou vrstvou by kvůli jeho slaněnému průřezu docházelo k nerovnoměrnému vstupování siločar do izolace a tedy i k jejímu nerovnoměrnému namáhání.

Hotová polovodivá vrstva musí mít minimální tloušťku 0,3 mm a zároveň musí být od jádra snadno oddělitelná. Vnější povrch polovodivé vrstvy, který přichází do kontaktu s izolací, musí být hladký a bez ostrých výstupků. Výstupky musí být menší než 0,08 mm a prohloubeniny menší než 0,2 mm. Z těchto hodnot je patrné, že nároky na kvalitu povrchu vrstvy jsou poměrně vysoké. Rezistivita ρ vrstvy při teplotě 23 °C musí být menší než 1 Ω·m a při teplotě 90 °C menší než 10 Ω·m. Další vrstvou, se kterou se můžeme u VN kabelů setkat je vodu blokující vrstva nebo páska, která se nachází pod vnitřní polovodivou vrstvou a je opět vyrobena z polovodivého materiálu [10].

1.2.3 Izolace

Izolace slouží k nevodivému oddělení vodivého jádra od stínění, které je uzemněno. Tloušťka izolace záleží na typu použitého materiálu a musí být dostatečně velká, aby odolala danému napěťovému namáhání. Jednotlivé typy izolací jsou popsány v kapitolách 1.1.1, 1.1.2 a 1.1.3.

1.2.4 Vnější polovodivá vrstva

Definice a požadavky na vnější polovodivou vrstvu jsou obdobné jako pro vnitřní polovodivou vrstvu. Vnější polovodivá vrstva opět slouží k řízení elektrického pole a zajišťuje kvalitní styk se stíněním. Nad vnější polovodivou vrstvou mohou být navíc umístěny další obalové vrstvy jako polštář nebo vodu blokující páska. Tyto vrstvy musí být vyrobeny také z polovodivého materiálu a musí zajišťovat elektrické spojení vnější polovodivé vrstvy se stíněním kabelu.

1.2.5 Stínění

Kovové stínění u silových kabelů zamezuje pronikání rušivého elektromagnetického pole do okolí kabelu a slouží k vedení kapacitních proudů I_C. Toto pole je generovaného střídavým proudem v jádru a díky stínění je možné pokládat jednotlivé kabely do společných kabelových žlabů nebo je možné vést více žil v jednom kabelu bez vzájemného ovlivnění rušivým magnetickým polem.

Samotné stínění je tvořeno měděnou páskou ovinutou ve spirále po povrchu polovodivé vrstvy nebo po povrchu jiných obalových vrstev ve vodivém spojení s vnější polovodivou vrstvou. Stínění také může částečně plnit funkci ochrany proti mechanickému poškození a pronikání

vlhkosti. Často se také setkáváme se stíněním, které je vytvořené pouze z měděných drátů a jedné nebo dvou páskových protiběžných spirál [13]. Tato varianta poskytuje hotovému kabelu větší ohebnost, avšak neposkytuje dodatečnou mechanickou ochranu a voděodolnost. Při provozu musí být stínění na obou koncích uzemněno. Jmenovité průřezy měděného stínění jsou uvedeny v tabulce číslo 3.

Tabulka č. 3 – Jmenovité průřezy S_S a odpory stínění

S_J (mm^2)	35 až 120	150 až 300	400 až 500
S_S (mm^2)	16	25	35
R_{20} (Ω/km)	1,15	0,727	0,524

Zdroj: vlastní zpracování dle [3]

1.2.6 Separační vrstvy

Nad stínící vrstvou se může nacházet další separační vrstva z nevodivého materiálu, která může mít vodu blokující schopnost nebo může pouze izolovat stínění od pláště kabelu. Dalším typem separační vrstvy je tzv. airbag, který zvyšuje mechanickou ochranu kabelu při pokládce. Žádná z těchto vrstev nesmí negativně ovlivňovat funkci kabelu a nesmí způsobovat korozi stínění.

1.2.7 Pancíř

Předposlední vrstvou kabelu je pancíř. Slouží k mechanické ochraně žíly kabelu a je vytvořen z podélných ocelových pásků nebo ze stočených drátů z oceli nebo hliníku [13].

1.2.8 Plášť a ochranný obal

Poslední vrstvou kabelu je plášť, který se nanáší opět pomocí extruze. Plášť udržuje konstrukci kabelu pohromadě a zároveň slouží jako ochrana před mechanickým poškozením a před pronikáním vlhkosti. K výrobě plášťů se používají následující materiály. PE, PE retardovaný proti ohni, MDPE – PE se střední hustotou, HDPE – vysokohustotní PE, měkčený PVC nebo olověný plášť s ochrannou vrstvou z PVC. Existují také kombinace těchto materiálů jako PE+PVC, PE+PE retardovaný proti ohni nebo vodotěsný plášť s hliníkovou fólií. Povrch pláště musí být opět hladký a jmenovitá tloušťka musí být minimálně 2,5 mm. U kombinovaných plášťů minimálně 4 mm. U vícežilových kabelů se do prostoru mezi jednotlivými plášti žil a ochranným obalem navíc přidává výplňový materiál, který zajišťuje ovalitu jádra. K jeho výrobě se používá např. EPR. K výrobě samotného ochranného pláště se opět používá PE nebo PVC.

Na vnější povrch pláště se nesmazatelně tiskne nebo vytlačuje označení kabelu. Na prvním místě se uvádí efektivní hodnota sdruženého napětí v kilovoltech. Za pomlčkou následuje písmenné označení provedení kabelu. Dále se uvádí počet žil, průřez jádra v mm^2 a průřez stínění v mm^2. Příklad úplné značky 22-AVXEKVCVEY 1x240/25. Značení kabelů je podle [14] následující.

jádro	- A	hliníkové
	- C	měděné
	- AV	hliníkové vodotěsné
	- CV	měděné vodotěsné
izolace	- XE	zesítěný polyetylen
kabel	- K	kabel
stínění	- C	měděné kovové
	- VC	měděné kovové s ochr. proti podélnému šíření vody pod pláštěm
plášť	- E	plášť z PE
	- Y	plášť z PVC
	- EY	kombinovaný plášť z PE + PVC
	- VE	vodotěsný plášť a Al folie
	- OY	olověný plášť s PVC ochrannou vrstvou
	- ER	plášť PE retardovaný proti ohni
	- EER	plášť PE + PE retardovaný proti ohni
ostatní	- z	závěsný kabel, za posledním písmenem značky
	- (AR)	kabel typu AIRBAG s ochrannou vrstvou pod pláštěm

Zdroj: vlastní zpracování dle [14]

1.3 Kabelové koncovky

Každý VN kabel je jedním koncem připojen ke zdroji elektrické energie, např. k distribuční síti 35 kV a druhým koncem ke spotřebiči, např. k transformátoru. Oba konce kabelu musí být opatřeny koncovkami, které slouží k řízení elektrického pole, zabraňují pronikání vlhkosti a chrání okolní prostředí před vlivy elektrického pole. Bez vhodného nebo nekvalitního zakončení může na koncích izolace docházet k elektrickým průrazům izolace, které povedou ke zničení kabelu.

Vyráběné typy koncovek se liší podle jmenovitého napětí, typu jádra a izolace zakončovaného kabelu, počtu žil, typu pláště kabelu a podle použité technologie. Mezi starší technologii patří dolévací koncovky pro PILC kabely. Mezi moderní patří teplem smrštitelné, za studena smrštitelné a slip-on koncovky.

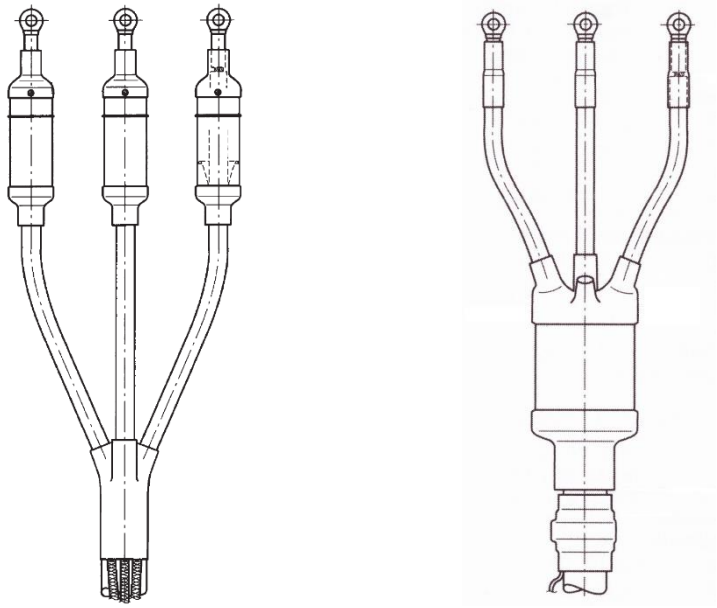
1.3.1 Dolévací koncovky

Dolévací koncovky se používají u kabelů s izolací tvořenou kabelovým papírem napuštěným stékavým nebo nestékavým impregnantem. Jejich použití je limitováno na vnitřní prostory, protože jejich konstrukce je náchylná k poškození a vyžaduje údržbu. Vyrábějí se v jednožilovém i třížilovém provedení pro jednoplášťové kabely.

Konstrukce jednožilové koncovky je tvořena deflektorem pro řízení elektrického pole, který je umístěn na konci kovového stínění a kovového pláště. Mezi kovovým pláštěm a kabelovým okem je umístěna dolévací nádoba, která je na obou koncích utěsněna teplem smrštitelnými trubicemi. Dolévací nádoba se poté musí naplnit vhodným kabelovým olejem.

Třížilová varianta obsahuje jednu dolévací nádobu, která je opět umístěna na konci kovového stínění a kovového pláště. V tomto případě prochází dolévací nádobou všechny tři žíly, které

jsou zakryty oleji a tlaku odolnými trubicemi. Kabelový olej je doléván pouze do společné papírové izolace umístěné mezi žílami a společným kovovým pláštěm [7].



Obrázek č. 5 – Jednožilová a třížilová varianta dolévací koncovky pro PILC kabely [7]

1.3.2 Za tepla smrštitelné koncovky

Jednou z nejmodernějších technologií, která se v současnosti používá k zakončování kabelů, je technologie teplem smrštitelných trubic. Jejich instalace je oproti dolévacím koncovkám mnohem snazší a výsledné zakončení je méně náchylné k poruchám. Hlavními prvky koncovky, které se opět liší podle typu zakončovaného kabelu a výrobce, jsou kabelové oko, silikonová trubice nebo páska pro řízení pole, teplem smrštitelná izolační trubice a eventuálně silikonové stříšky a těsnící páska.

Kabelové oko slouží k zakončení jádra a k uchycení kabelu např. ke svorkám transformátoru nebo odpínače. Je vyrobeno z hliníku a existuje ve šroubovacím nebo lisovacím provedení. Přechod izolace – kabelové oko může být vyrovnán těsnící páskou. Kabelové oko nemá na samotnou funkci koncovky větší vliv.

Pro řízení elektrického pole se používá páska s řízeným rozložením měrného odporu a permitivity. Páska se omotává přes přechod konce vnější polovodivé vrstvy a izolace [7]. Slouží zároveň k vyplnění vzduchových mezer v oblasti se zvýšeným elektrickým namáháním a tak zabraňuje vzniku částečných výbojů. Výhodou pásky je možnost instalace na kabely s libovolným průřezem. Nevýhodou je nehomogenita vytvořené vrstvy, která záleží na preciznosti ruční práce.

Nejmodernější technologií je tzv. hybridní technologie. Jedná se o kombinaci za studena smrštitelného elementu řízení pole označovaného jako SCT (Screen Control Tube), který slouží

ke stejnému účelu jako výplňová páska. SCT je vyrobena ze silikonové trubice s vysokou permitivitou, která se nasune na přechod vnější polovodivé vrstvy a izolace a po odstranění roztahujícího aplikátoru dojde k jejímu smrštění [15]. SCT má oproti vrstvě z výplňové pásky lepší homogenitu a celková instalace je jednodušší.

U kabelů s olověným pláštěm se můžeme setkat s kombinací obou technologií, kdy je část přechodu vytvořena páskou, která je poté částečně překryta SCT [7].

Vnější částí koncovky, která částečně překrývá kabelové oko a stínění, izolaci, SCT a částečně i stínění je teplem smrštitelná trubice. Slouží k obnovení původního odstraněného pláště, k zamezení pronikání vlhkosti a předchází vzniku svodových proudů po vnějším povrchu. Teplem smrštitelná trubice je vyrobena ze zesítěného materiálu, který se při výrobě zahřívá a tím dojde k vymizení krystalických struktur a molekuly zůstanou vázány pouze pružnými vazbami vytvořenými při zesítění. Poté se trubice roztahuje do požadovaného stavu. Zchlazením v roztaženém stavu dojde k opětovnému vytvoření krystalických struktur a zachování dočasného tvaru. Po opětovném ohřátí např. propanbutanovým hořákem dochází k tavení krystalických struktur a k smršťování pružných vazeb mezi molekulami. Trubice se navrací do původního tvaru a zároveň se teplem taví lepidlo nanesené na vnitřní straně trubice, které plní funkci odstraněné vnější polovodivé vrstvy. Vlivem tlaku smršťující se trubice zatéká lepidlo do zbylých otvorů a vyplňuje je. Dokonalým vyplněním všech otvorů se opět zamezí vzniku částečných výbojů. Po ochlazení trubice dojde k opětovnému vytvoření krystalických struktur [7].

Další součástí koncovky mohou být silikonové stříšky, které se umisťují na vnější povrch teplem smrštitelné trubice. Jejich počet závisí na napěťové hladině a konkrétním umístění koncovky (vnitřní, venkovní). Obecně platí, že na venkovní koncovky se umisťuje více stříšek než na vnitřní koncovky. Samotné stříšky slouží k prodloužení povrchové cesty mezi kabelovým okem a uzemněným stíněním. Tím se snižuje pravděpodobnost výskytu klouzavého výboje v případě znečištění povrchu koncovky.

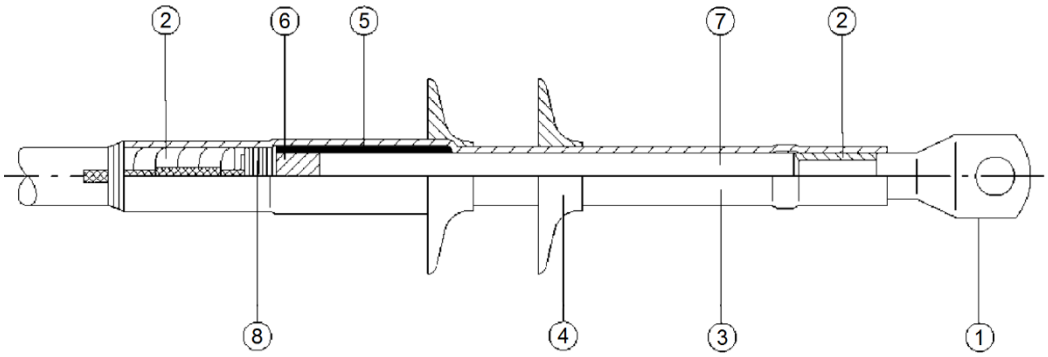
1.3.3 Za studena smrštitelné koncovky

Technologie za studena smrštitelných koncovek je částečně shodná s technologií teplem smrštitelných trubic. Konstrukce opět obsahuje kabelové oko a SCT. Největším rozdílem je použití samosmrštitelné vnější izolační trubice, která se dodává v roztaženém stavu. Po nasunutí roztažené koncovky na připravený konec kabelu a vytažení aplikátoru dojde k jejímu smrštění a hotová koncovka je okamžitě připravena k provozu. U za studena smrštitelných koncovek může být SCT montován samostatně nebo může být nedílnou součástí izolační trubice. Při instalaci je nutné dbát na kvalitní sejmutí pláště a vnější polovodivé vrstvy. Tyto koncovky jsou primárně

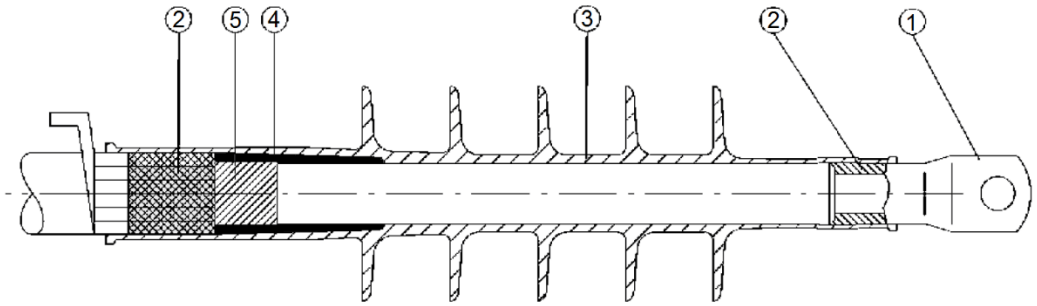
určené pro zakončení plastových kabelů s XLPE izolací s různými druhy polovodivé vrstvy a stínění a jsou vhodné pro vnitřní i vnější montáž [13].

1.3.4 Za studena nasouvací koncovky

Poslední používanou technologií je technologie nasouvání za studena označovaná jako slip-on. Tato technologie je do značné míry shodná s technologií smršťování za studena. Samotná koncovka je tvořena pružnou silikonovou trubicí, která obsahuje integrovanou SCT a stříšky. Trubice se nasouvá na připravený konec kabelu, který je pokryt vhodným lubrikantem ke snížení tření. Koncovky se vyrábí ve vnitřním i venkovním provedení pro všechny napěťové hladiny VN a v porovnání s ostatními technologiemi je jejich montáž nejjednodušší [13, 15]. U těchto koncovek se navíc můžeme setkat s geometrickým řízením pole pomocí deflektoru.



Obrázek č. 6 – Řez venkovní jednožilovou teplem smrštitelnou koncovkou [15]
1 – kabelové oko, 2 – těsnící vrstvy, 3 – smršťovací trubice, 4 – silikonové stříšky,
5 – SCT, 6 – vnější polovodivá vrstva, 7 – izolace, 8 – stínění



Obrázek č. 7 – Řez venkovní jednožilovou nasouvací koncovkou [15]
1 – kabelové oko, 2 – těsnící páska, 3 – silikonová trubice, 4 – integrovaná SCT,
5 – vnější polovodivá vrstva

1.4 Kabelové soubory

Na kabelových trasách dochází velmi často k situaci, kdy je potřeba spojit dva konce kabelů. Pro tento účel se používají tzv. kabelové soubory. Jedná se o spojky, které slouží k obnovení původních vlastností kabelů, tedy obnovení vodivého spojení jader, původních izolačních

vlastností, schopnosti odvádět teplo a chrání spoj proti pronikání vlhkosti a mechanickému poškození. Existuje několik různých technologií kabelových souborů a jejich montáž, pracovní postupy a výsledné vlastnosti jsou částečně shodné s kabelovými koncovkami. V praxi se setkáváme se spojkami pro jednožilové a třížilové kabely, přímými a přechodovými spojkami a s technologiemi za tepla smrštitelných, za studena smrštitelných, hybridních spojek a za studena nasouvaných spojek. Dále se můžeme setkat s opravnými a odbočnými spojkami. Konkrétní typy spojek se dále liší podle jmenovitého napětí, typu použitých polovodivých vrstev, použité technologie řízení pole nebo podle typů použitých stínění.

1.4.1 Přímé spojky

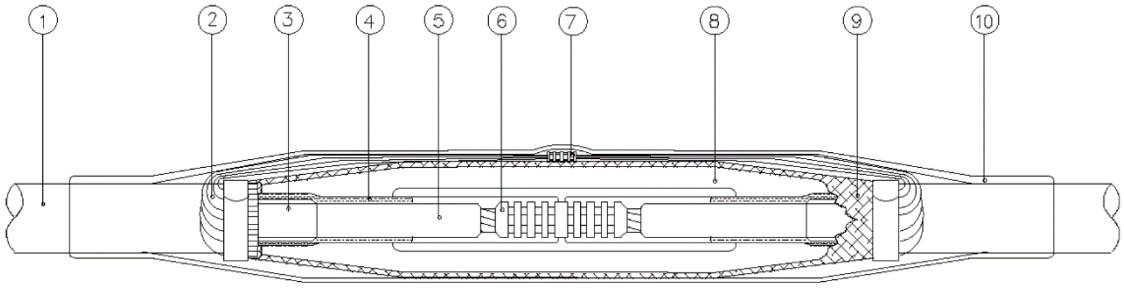
Přímé spojky slouží ke spojování žil dvou kabelů stejného typu a jejich konstrukce je následující. Jádra jsou spojena lisovacími nebo šroubovacími spojovači s odtržitelnými hlavami. Tyto spojky mívají v prostřední části přepážku nebo zarážku, která slouží ke stejnoměrnému zasunutí konců jader do spojky. Samotná jádra tedy nejsou v přímém kontaktu. Dalšími částmi jsou, podobně jako u koncovek, pásky nebo násuvné elementy pro řízení pole na koncích vnějších polovodivých vrstev. Spojení jader vytvoří mezi odstraněnými izolacemi volný prostor, který je nutné vyplnit např. výplňovou páskou se zvýšenou permitivitou nebo teplem smrštitelnou trubicí s tavitelným lepidlem na vnitřní straně. Obě tyto metody řídí a vyhlazují elektrické pole nad spojovačem. Další vrstvou je teplem smrštitelná silnostěnná izolační trubice, přes kterou je přetažena válcová pocínovaná měděná síťka, která nahrazuje odstraněné stínění a je vodivém kontaktu s oběma konci původních stínění. Původní drátové stínění se v případě spojek nemusí odstraňovat, ale může být spojeno lisovacím spojovačem a vedeno po povrchu stínící síťky. Takto spojené stínění má pak stejnou proudovou zatížitelnost jako původní stínění. V současnosti se u všech spojů stínění používají nepájivé metody tedy lisovací spojky, propojovací pásky pro pásková stínění, pera, pružiny apod. Poslední vrstvou v případě jednožilového kabelu je silnostěnná teplem smrštitelná plášťová trubice s lepidlem na vnitřní straně, která utěsňuje spoj proti pronikání vlhkosti a zároveň ho mechanicky chrání. U třížilových kabelů může být volný prostor mezi žílami opět vyplněn výplňovým materiálem a celek pak překryt jednou plášťovou trubicí [7].

1.4.2 Přechodové spojky

Přechodové spojky slouží ke spojování a přechody z třížilových jednoplášťových kabelů na jednožilové kabely a naopak. Slouží také k přechodům mezi kabely, jejichž izolace je napuštěna impregnantem a kabely plastovými. V případě třížilových jednoplášťových kabelů je místo zakončení pláště opatřeno teplem smrštitelnou rozdělovací hlavou, která opět zabraňuje pronikání vody pod společný plášť. Pokud kabel obsahuje pancíř, zabraňuje navíc jeho korozi. Pokud dochází ke spojení kabelu s impregnovanou izolací a plastového kabelu, je spojka opatřena trubicí, která zabraňuje pronikání impregnantu z jednoho typu kabelu do druhého [16].

1.4.3 Opravné spojky

Opravné spojky slouží k nahrazení poškozené části žíly kabelu, která se vyřízne a nahradí kusem nové žíly se dvěma spojovači nebo dlouhou opravnou spojkou z pocínovaného hliníku. Samotné části a provedení spojky je podobné spojce přímé. Oba spoje jsou následně překryty silnostěnnou teplem smrštitelnou trubicí. Délka opravitelného úseku pomocí běžně vyráběných spojek se pohybuje okolo 50 cm.



Obrázek č. 8 – Řez jednožilovou přímou teplem smrštitelnou spojkou [15]

1 – kabel, 2 – stínění, 3 – vnější polovodivá vrstva, 4 – SCT, 5 – izolace,

6 – spojovač, 7 – spojovač stínění, 8 – těleso spojky, 9 – Cu síťka, 10 – vnější plášť

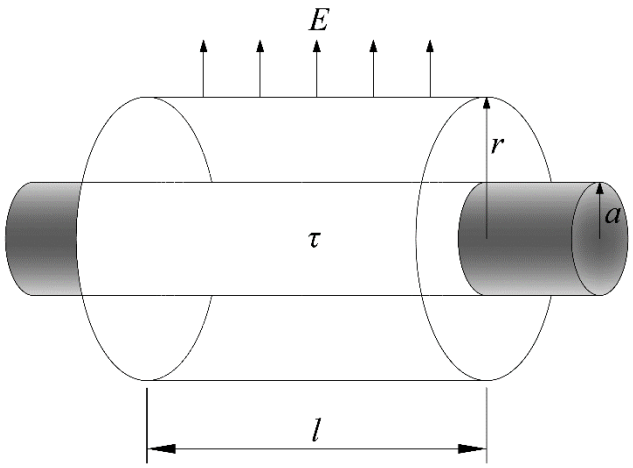
2 Problematika rozložení elektrického pole na koncích vysokonapěťových kabelů

Skutečný VN kabel, včetně koncovek a spojek, je připojen na zdroj elektrického napětí se střídavým charakterem sinusového průběhu o průmyslovém kmitočtu 50 Hz. Perioda průběhu je podle vztahu $T = 1/f$ (s, Hz) rovna 20 ms. Pokud je na konec kabelového vedení připojena zátěž, začne jádrem procházet elektrický proud I (A) opět sinusového průběhu o průmyslovém kmitočtu. Střídavý charakter napětí a proudu způsobí, že izolace kabelového vedení je vystavena proměnlivému elektromagnetickému poli, které je závislé na okamžitých hodnotách napětí a proudu. V našem případě se budeme zabývat především rozložením elektrického pole a to na koncích kabelů ve vysokonapěťových koncovkách a spojkách v ustáleném stavu.

2.1 Rozložení elektrického pole uvnitř kabelu

Slaněné jádro VN kabelu můžeme zjednodušit zanedbáním vzduchových mezer mezi jednotlivými dráty a můžeme ho nahradit plným dlouhým vodičem válcového průřezu. Náboj Q (C) se pak rozloží rovnoměrně po celém povrchu válcového vodiče. Podle Gaussovy věty (1) je tok vektoru intenzity elektrického pole $\vec{E}$ (V/m) myšlenou uzavřenou plochou S (m^2) roven celkovému náboji Q_C (C), který je v této ploše obsažen, dělenému permitivitou vakua ε_0 (-).

$$\oiint_S E \cdot dS = \frac{Q_C}{\varepsilon_0} \tag{1}$$



Obrázek č. 9 – Znázornění uzavřené plochy v okolí válcového vodiče

Zdroj: vlastní zpracování dle [17]

Použitím Gaussovy věty a myšlené válcové plochy tedy získáme intenzitu $\vec{E}$ pro všechny následující případy. Celkový náboj Q_C můžeme vyjádřit jako součin lineárního náboje τ (C) a délky jádra l (m) tak jak je tomu v rovnici (2).

$$\oiint_S E \cdot dS = E(r) \cdot S = E(r) \cdot 2\pi r \cdot l = \frac{\tau \cdot l}{\varepsilon_0} \tag{2}$$

Uvnitř jádra ($r < a$) bude intenzita $\vec{E}$ nulová. Volné náboje se vlivem odpudivých sil rozmístí po povrchu tělesa. Výsledné siločáry intenzity elektrického pole pak vystupují kolmo z povrchu jádra.

$$E(r) = 0 \tag{3}$$

Na povrchu jádra ($r = a$) bude intenzita elektrického pole následující

$$E(r = a) = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{a} \tag{4}$$

a ve vzdálenosti ($r > a$) bude intenzita elektrického pole nepřímo úměrně klesat s rostoucím poloměrem r podle vztahu (5). V nekonečnu se $\vec{E}$ bude limitně blížit nule (6).

$$E(r) = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \tag{5}$$

$$\lim_{r\to\infty} E(r) = 0 \tag{6}$$

Pokud budeme pro případ ($r > a$) uvažovat v okolí látkové prostředí, můžeme nahradit permitivitu vakua absolutní permitivitou ε. Jedná se o součin permitivity vakua ε_0 a relativní permitivity ε_r látkového prostředí, které je reprezentováno např. izolací.

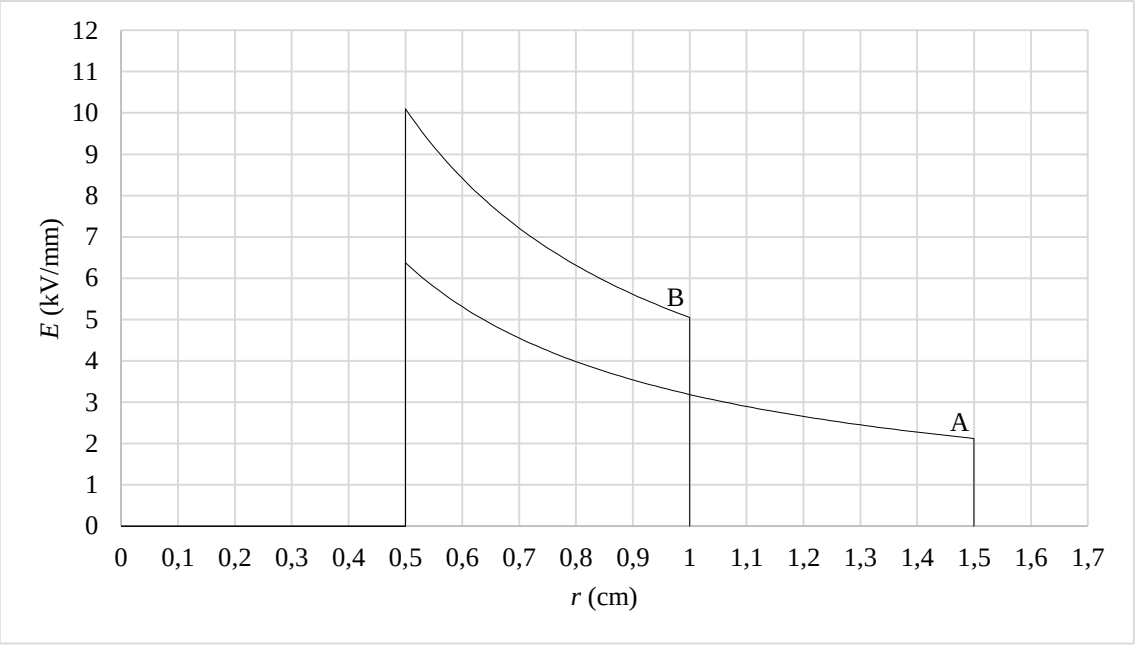
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \tag{7}$$

Pokud ale budeme uvažovat válcový vodič, který je překryt souosým válcovým uzemněným stíněním, zjistíme, že intenzita elektrického pole mezi jádrem a stíněním nezávisí na permitivitě izolace, ale pouze na napětí na jádře a na konkrétním poměru poloměru stínění b a poloměru jádra a. V grafu číslo jedna jsou vykresleny dva průběhy dle rovnice (8). U obou bylo použito napětí U = 20 kV. Průběh A byl vypočten s rozměry a = 0,5 cm, b = 1,5 cm a pro průběh B byly použity rozměry a = 0,5 cm, b = 1 cm. Z výsledných průběhů je vidět, že při snížení tloušťky izolace dojde k nárůstu intenzity $\vec{E}$ a tedy i ke zvýšení namáhání izolace.

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot ln\frac{b}{a}} \tag{8}$$

Z rovnice (8) je patrné, že největší intenzita elektrického pole bude na povrchu jádra a naopak nejmenší intenzita bude na poloměru stínění.

Graf č. 1 – Průběh intenzity $\vec{E}$ v jádře a v izolaci kabelu



Zdroj: vlastní zpracování dle [17]

Parametry, které jsou ovlivněny relativní permitivitou izolace, jsou kapacita kabelu C (μF/km) a nabíjecí proud I_C (A/km) kabelu, protože kombinace nabitého jádra a uzemněného stínění vytváří z kabelu v podstatě válcový kondenzátor. Ze vztahů pro kapacitu (9) a nabíjecí proud (10) je patrné, že tyto parametry nejjednodušeji omezíme použitím izolace s co nejmenší relativní permitivitou. K tomuto účelu se nejlépe hodí PE nebo XLPE, které mají z používaných izolačních materiálů nejen nejmenší relativní permitivity, ale i ztrátový činitel.

$$C = \frac{2\pi l \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\ln \frac{b}{a}} \tag{9}$$

$$I_C = U \cdot C \cdot 2\pi f \tag{10}$$

Pokud tedy nejsou narušeny rozměry a není odstraněno stínění a vnější polovodivá vrstva, rozloží se elektrické pole v izolaci kabelu rovnoměrně v radiálním i axiálním směru a vhodně dimenzovaná izolace poté odolá danému napěťovému namáhání [12, 17].

Další vlastností, kterou popíšeme, bude potenciál φ (V) uvnitř a hlavně v okolí válcového vodiče. Potenciál vždy vztahujeme k nějakému bodu v elektrickém poli a v případě kabelů se nabízí vztahovat potenciál ke stínění, které je uzemněno. Potenciál pro všechny případy určíme z rovnice (11).

$$\varphi(r) = -\int E(r)\, dr = -\int \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r} dr = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \ln r + C = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \ln \frac{1}{r} + K \tag{11}$$

Uvnitř vodiče je intenzita elektrického pole $\vec{E}$ nulová a potenciál zde bude mít tedy konstantní hodnotu *K* podle vztahu (12).

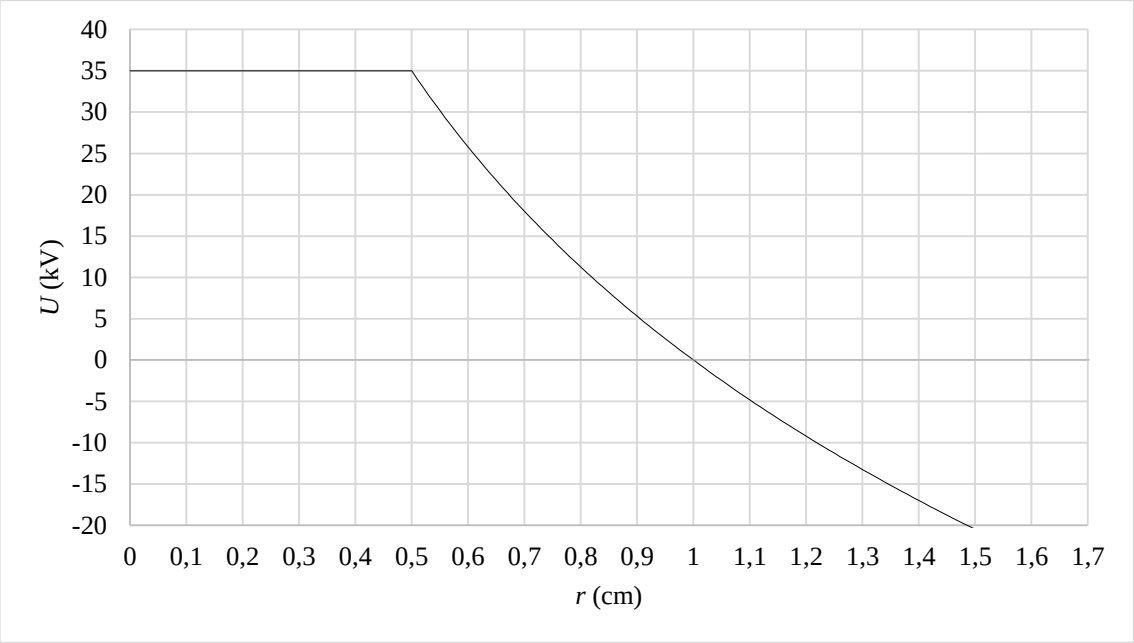
$$\varphi(r < a) = -\int 0\, dr = K \tag{12}$$

Na povrchu vodiče bude potenciál následující

$$\varphi(r = a) = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \ln\frac{1}{a} + K \tag{13}$$

a s rostoucí vzdáleností od povrchu vodiče bude potenciál klesat podle vztahu (11). Konstanta *K* v uvedených vztazích představuje velikost potenciálu na jednotkovém poloměru. V tomto případě je potenciál roven pouze konstantě *K*.

Graf č. 2 – Průběh potenciálu φ v jádře a v izolaci kabelu



Zdroj: vlastní zpracování dle [17]

Pokud se zaměříme na jednu vzdálenost *r* od povrchu vodiče, zjistíme, že v této vzdálenosti je potenciál ve všech směrech konstantní a myšlenou hladinu pak nazýváme ekvipotenciálou. Tyto ekvipotenciály jsou vždy kolmé k siločárám elektrického pole a při zachování válcové symetrie a všech vrstev kabelu dojde k jejich rovnoměrnému rozložení.

Pokud dochází k průchodu siločar intenzity elektrického pole skrze rozhraní dvou materiálů pod úhlem jiným než 90° a pokud mají oba materiály různou relativní permitivitu, pak bude na tomto rozhraní docházet k lomu siločar podle vztahu (14). Tohoto jevu je využito u jedné z metod řízení elektrického pole. Protože ekvipotenciály elektrického napětí jsou vždy kolmé na siločáry elektrické intenzity, dojde také k jejich lomu a tímto způsobem lze vhodně řídit

elektrické namáhání na konci polovodivé vrstvy. Pokud bude relativní permitivita izolace kabelu například ε_1 = 2 a pro řídící vrstvu bude mít permitivita hodnotu ε_2 = 10, pak bude docházet k lomu siločar intenzity elektrického pole směrem od kolmice. Ekvipotenciály se naopak budou lámat směrem ke kolmici [12].

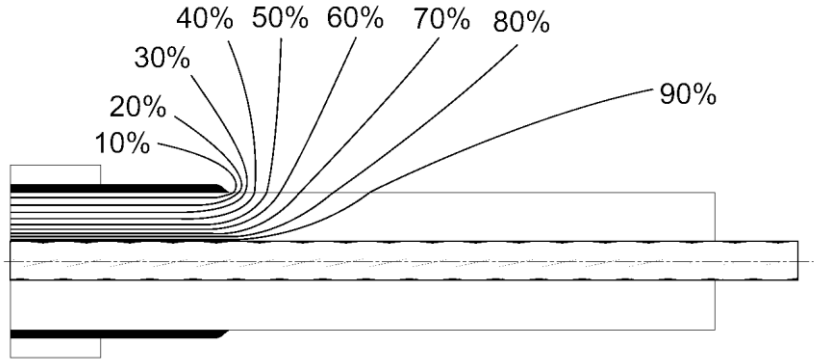
$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \tag{14}$$

2.2 Rozložení elektrického pole na koncích kabelu

Při zakončování nebo spojování kabelů musí být jednotlivé vrstvy žíly kabelu odstraněny. To vede k porušení struktury žíly a následkem je změna rozložení elektrického pole z homogenního na velmi nehomogenní a to především na konci vnější polovodivé vrstvy.

2.2.1 Bez řízení elektrického pole

Bez patřičného ošetření, jak je zobrazeno na obrázku číslo 10, bude v místě konce vnější polovodivé vrstvy docházet k zahuštění ekvipotenciál a ke zvýšení elektrického namáhání izolace natolik, že bude docházet k částečným výbojům nebo průrazům. Tento stav je v praxi nepřípustný a existuje několik metod, jak toto namáháni izolace omezit. S těmito metodami se lze setkat nezávisle u všech technologií zakončování a spojování kabelů.



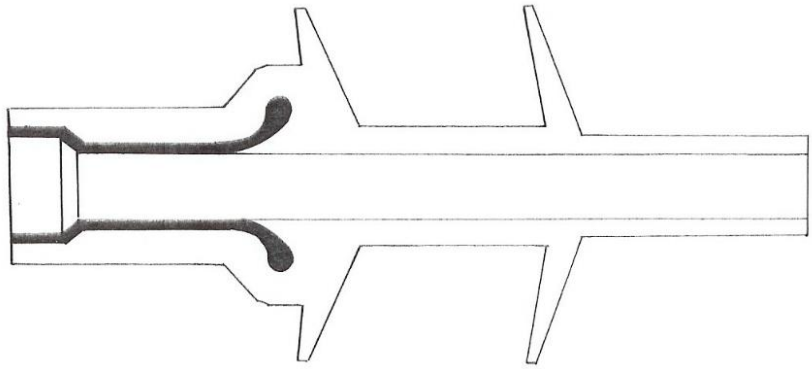
Obrázek č. 10 – Rozložení ekvipotenciál na konci vnější polovodivé vrstvy bez řízení el. pole [7]

2.2.2 Geometrické řízení elektrického pole pomocí deflektoru

Geometrická metoda řízení elektrického pole je starší, ale stále používanou technologií, se kterou se lze setkat např. v dolévacích koncovkách pro papírové kabely, ale i v násuvných koncovkách pro plastové kabely. Největší uplatnění nachází v koncovkách a spojkách u kabelů velmi vysokého napětí. Nevýhodou této metody je rozměrová náročnost kvůli tvaru kužele, a proto se s touto technologií při zakončování vysokonapěťových kabelů příliš nesetkáváme.

Samotný kužel je vyroben z pryžového materiálu s přesně definovaným tvarem, který plynule zvětšuje vzdálenost mezi vodičem a vnější polovodivou vrstvou. Na povrch kužele je poté umístěna uzemněná elektroda, která je zároveň spojena se stíněním kabelu. Změnou vzdálenosti

mezi jádrem a takto prodlouženým stíněním se řídí kapacita a tak je dosaženo rovnoměrného rozložení ekvipotenciál a snížení elektrického namáhání na konci polovodivé vrstvy. Umístění a tvar kužele musí splňovat přísné požadavky a proto se u vysokonapěťových koncovek můžeme setkat s variantou, kdy je kužel pevně integrován do koncovky a tak je zajištěno jeho správné umístění [18].

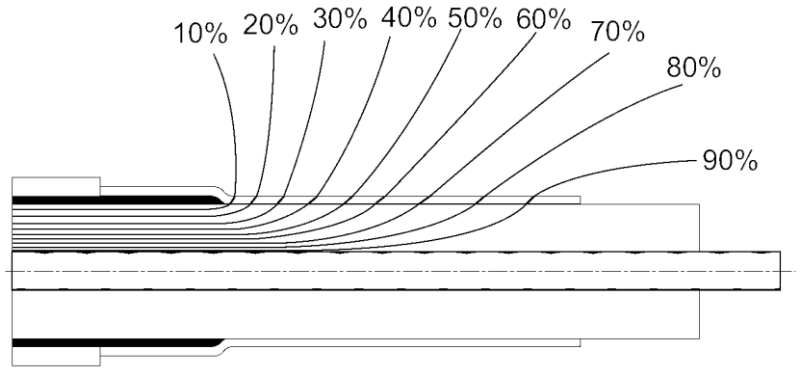


Obrázek č. 11 – Řez kabelovou koncovkou s integrovaným kuželem pro řízení el. pole [18]

2.2.3 Řízení elektrického pole pomocí SCT

S touto metodou řízení elektrického pole se u vysokonapěťových koncovek a spojek setkáme nejčastěji. Jedná se o relativně tenkou trubici, která může být na konec kabelu umístěna jednou z technologií za studena a je vyrobena z materiálu se specifickou rezistivitou. Relativní permitivita této trubice se pohybuje v řádech desítek.

Siločáry elektrického pole v tomto případě prochází skrze SCT a na rozhraních různých permitivit dochází k jejich lomu, tak jak je popsáno v části 2.1. Tím je dosaženo lepšího rozložení elektrického pole směrem ke konci SCT, tak jak je tomu na obrázku číslo 12. Díky tomuto rozložení je elektrické namáhání na konci vnější polovodivé vrstvy sníženo na přijatelnou hodnotu. Tato metoda má však omezení z hlediska velikosti permitivity. Pokud bude mít SCT příliš velkou relativní permitivitu (v řádech stovek až tisíců), bude docházet k přesunu siločar ke konci SCT a tím se nevhodně přesune i elektrické namáhání [12].



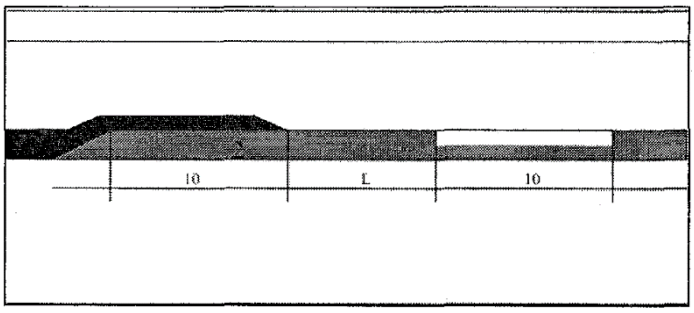
Obrázek č. 12 – Rozložení ekvipotenciál na konci vnější polovodivé vrstvy s řízením pomocí SCT [7]

2.2.4 Řízení elektrického pole pomocí SCT a zabudované elektrody

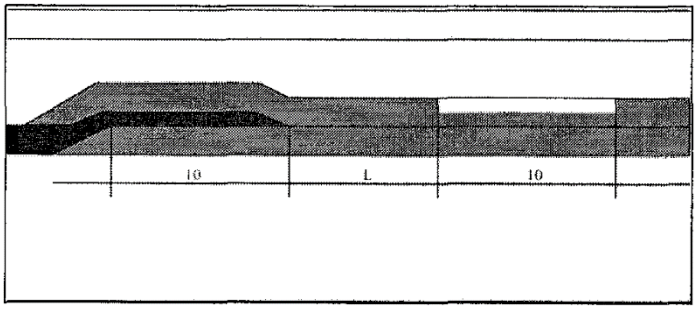
Tato technologie využívá k řízení pole na konci vnější polovodivé vrstvy vrstvu s vysokou permitivitou (High Permittivity Layer, dále jen HPL) v rozsahu 20 až 40 se zabudovanými elektrodami označovanými (Embedded Electrode, dále jen EE). HPL se může instalovat na zakončení vnější polovodivé vrstvy ve třech variantách. Jedná se tedy o kombinaci řízení pole geometrickou a refraktivní metodou.

- HPL překrývá vnější polovodivou vrstvu
- HPL je podsunuta pod vnější polovodivou vrstvu – obrázek číslo 13
- Vnější polovodivá vrstva je zasunuta do HPL – obrázek číslo 14

Zabudovaná elektroda je vytvořena z měděného pásku o šířce 10 mm a tloušťce až 1 mm. Umisťuje se na vnější povrch nebo dovnitř HPL. Protože jde o vodivý materiál, je relativní permitivita vloženého pásku nekonečná a takto vytvořená oblast se zvýšenou permitivitou může mít na rozložení elektrického pole značný vliv. Zabudovaná elektroda může být uzemněna i neuzemněna. Všechny tyto varianty lze kombinovat, ale nejlepších výsledků bylo dosaženo v kombinaci právě na obrázcích číslo 13 a číslo 14 [19].



Obrázek č. 13 – Řez zakončení nadsunuté polovodivé vrstvy s elektrodou na povrchu HPL [19]



Obrázek č. 14 – Řez zakončení vsunuté polovodivé vrstvy s elektrodou na povrchu HPL [19]

3 Simulace rozložení elektrického pole u VN kabelových koncovek a spojek metodou konečných prvků

Pro simulaci rozložení elektrického pole u kabelových koncovek a spojek byla použita metoda konečných prvků označovaná jako FEM (Finite Element Method). Jedná se o matematickou metodu pro řešení parciálních diferenciálních rovnic a polynomů. Podmnožinou FEM je analýza konečných prvků označovaná jako FEA (Finite Element Analysis). V našem případě byla použita FEA v oblasti analýzy elektrostatického pole, které se zaměřuje na napětí a intenzitu elektrického pole.

Prvním krokem bylo vytvoření požadovaného modelu ve vhodném softwaru, v tomto případě v programu COMSOL Multiphysics 4.4. Rozložení elektrického pole v kabelu je díky jeho válcovému tvaru možné řešit v osově symetrické dvojrozměrné rovině a hotový model se tím značně zjednoduší. Jednotlivým částem modelu je poté nutné přidělit požadované materiálové a elektrické vlastnosti. Materiály je možné vybírat z integrované knihovny a následně upravovat jejich jednotlivé vlastnosti dle požadavků.

Dalším krokem je nahrazení spojitého prostředí materiálů modelu konečným množstvím malých dvojrozměrných elementů trojúhelníkového tvaru, které se nejsnáze přizpůsobí komplikovaným tvarům libovolného modelu. Tento proces se nazývá meshing a vytvoření sítě trojúhelníků je automatické. Před vytvořením sítě je možné vybrat místa zájmu, kde dojde k vytvoření hustší sítě použitím menších elementů. Naopak místa, která ve výsledku nejsou důležitá, budou vyplněna většími elementy. Takto lze optimalizovat a zrychlit výpočet. Každý trojúhelník je poté charakterizován svým tvarem, počtem a polohou uzlů, které jsou umístěny v rozích trojúhelníku a spojují ho se sousedními trojúhelníky.

Každý element vytvořené sítě poté ovlivňuje elektrické pole skrze něj procházející. Protože je počet trojúhelníků v síti konečný jedná se pouze o aproximaci skutečného vlivu na elektrické pole. V dnešní době je však výpočetní výkon počítačů dostatečný a je tedy možné najít řešení, které se velmi blíží skutečnému chování materiálů. Další výhodou FEM je možnost zkoumání téměř libovolných útvarů, pro které by jinak nešlo najít přesné analytické řešení. Nevýhodou je naopak nutnost nového výpočtu při jakékoliv změně modelu nebo jeho vlastností [20].

3.1 Vytvoření modelu kabelu

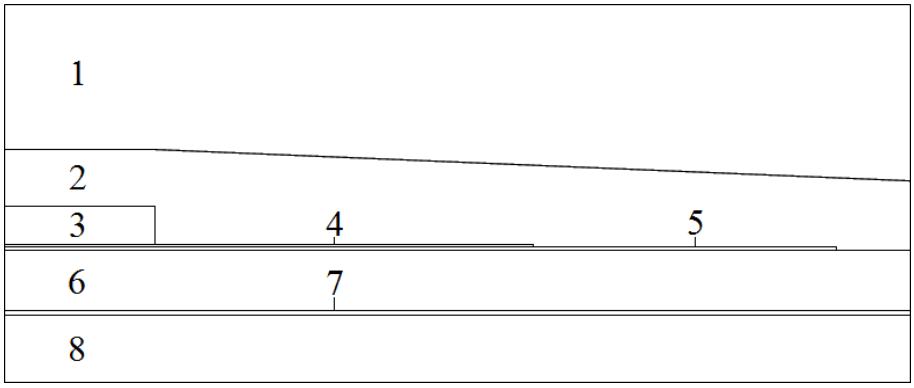
V následujících simulacích bude pro všechny modely koncovek a spojek použit jeden typ kabelu, konkrétně hliníkový kabel s izolací z XLPE označený 35-AXEKVCY 1x240/25. Jedná se o běžně používaný jednožilový kabel s proudovou zatížitelností do cca 580 A, a pro efektivní

hodnotu sdruženého napětí 35 kV. Při použití stejného typu kabelu pro všechny modely bude možné získané výsledky snáze porovnat a tak určit, která metoda řízení elektrického pole je nejvýhodnější.

Jako první bylo vymodelováno obdélníkové prostředí, které bude tvořeno vzduchem o teplotě $T = 20$ °C a tlaku $p = 1$ atm. V tomto prostředí byl dále vytvořen podélný řez kabelem dle rozměrů určených z katalogu [21] a jednotlivé vrstvy kabelu byly zkráceny dle doporučeného postupu k montáži koncovky [22]. Hliníkové jádro je umístěno ve spodní části modelu. Nad jádrem se nachází vnitřní polovodivá vrstva, nad kterou je dále izolace z XLPE. Nad ní se nachází již výrazně zkrácená vnější polovodivá vrstva. Předposlední vrstvou je měděné páskové stínění a jako poslední je vytvořen PVC plášť. Jednotlivé rozměry všech vrstev jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č. 4 – Velikosti délky l, tloušťky d a relativní permitivity ε_r jednotlivých vrstev

Vrstva	l (mm)	d (mm)	ε_r (-)
Prostředí	1000	500	1
EAl jádro	900	9	∞
Vnitřní polovodivá vrstva	840	0,5	1000
XLPE izolace	840	8	2,3
Vnější polovodivá vrstva	340	0,5	1000
Páskové stínění	320	0,3	∞
PVC plášť	300	5	2,9
Plášť koncovky	645	7,5	2



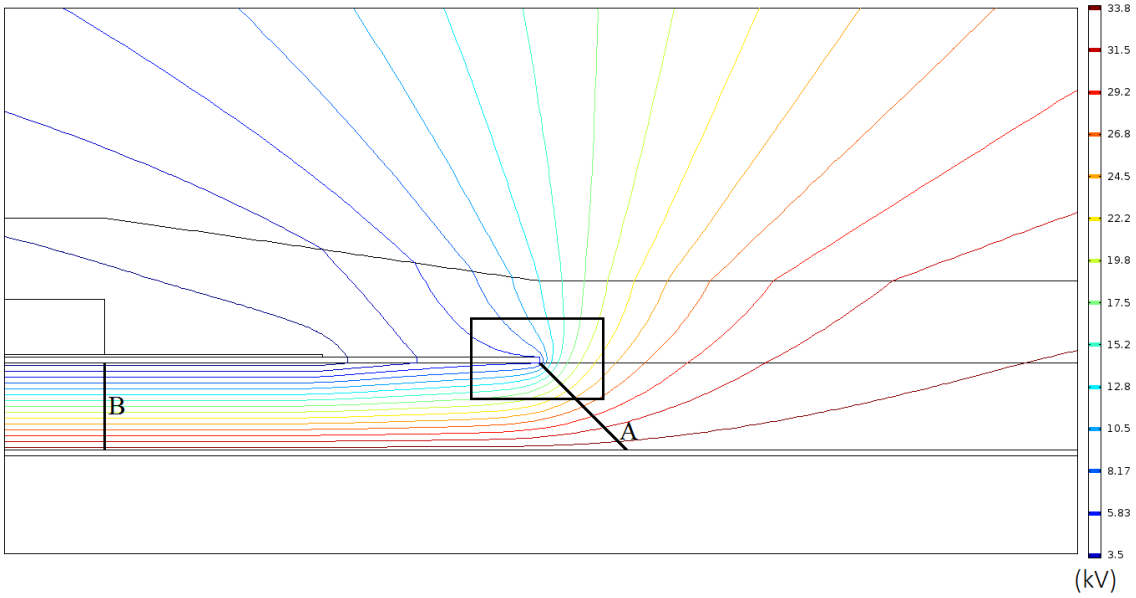
Obrázek č. 15 – Detail modelu konce kabelu v místě zakončení vnější polovodivé vrstvy
1 – prostředí, 2 – plášť koncovky, 3 – plášť, 4 – páskové stínění,
5 – vnější polovodivá vrstva, 6 – izolace, 7 – vnitřní polovodivá vrstva, 8 – hliníkové jádro

V modelu je dále nastaven elektrický potenciál hranic jádra na hodnotu $U = 35$ kV a u hranic stínění na hodnotu $U = 0$ V. Počáteční podmínka nulového potenciálu je nastavena celém modelu na hodnotu 0 V. Dalším krokem je zmíněný meshing, pro který bylo použito trojúhelníků s maximální délkou strany 300 mm a s minimální délkou strany 1 μm. Dále bylo nastaveno zvýšené zahuštění pro zúžené oblasti, které umožní přesnější výpočet právě u

polovodivých vrstev, stínění nebo SCT. Poté byl spuštěn samotný výpočet, po jehož dokončení získáme grafické znázornění rozložení ekvipotenciál v okolí celého konce kabelu.

3.2 Simulace bez řízení elektrického pole

Jako první byla provedena simulace bez řízení elektrického pole. Zakončení stínění a vnější polovodivé vrstvy bylo překryto pouze vnějším ochranným PE pláštěm smrštitelné koncovky s $\varepsilon_r = 2$. Takovéto zakončení je vhodné pouze pro kabely s napětím do cca 3 kV.

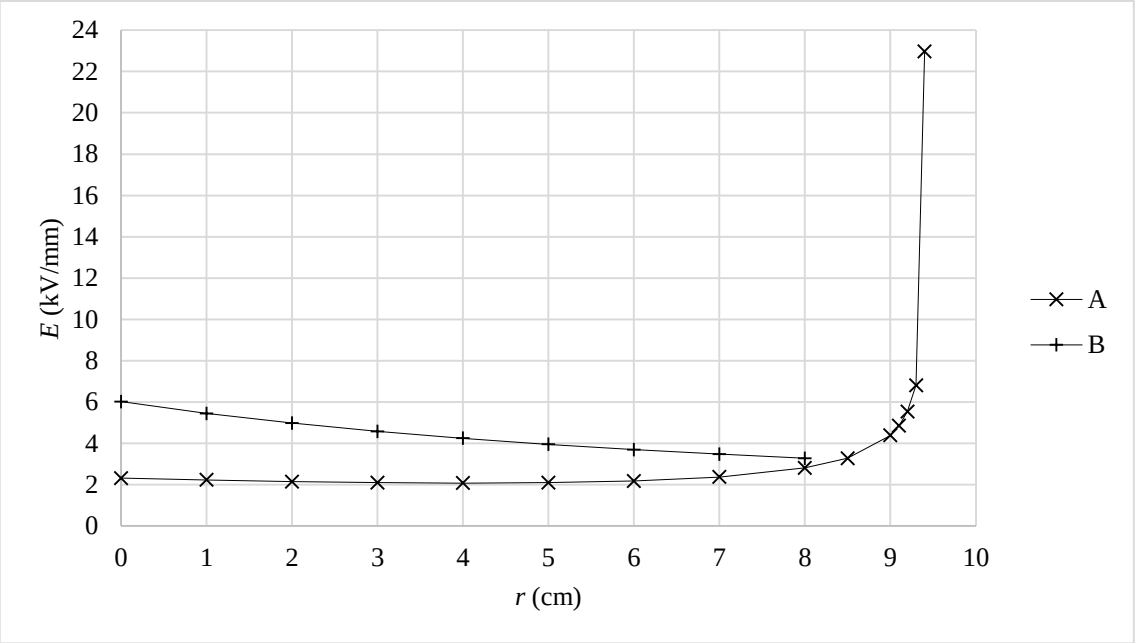


Obrázek č. 16 – Rozložení ekvipotenciál bez řízení elektrického pole

Po výpočtu získáme rozložení ekvipotenciál, z jejichž zahuštění zjistíme, že nejvíce namáhané místo se nachází u zakončení vnější polovodivé vrstvy (označeno obdélníkem). V místě zahuštění siločar vyhodnotíme intenzitu elektrického pole podél řezu A. Pro porovnání se stavem kdy není rozložení elektrického pole narušeno provedeme kontrolní řez před zakončením stínění označený písmenem B. Naměřené hodnoty intenzity elektrického pole jsou vyneseny v grafu číslo 3. Na průběhu B je patrný očekávaný pokles intenzity elektrického pole podle vztahu (11). Maximální intenzita zde dosahuje $\vec{E}$ = 6 kV/mm, tedy hodnoty, které XLPE izolace bez problémů odolá. Naopak průběh A zobrazuje rostoucí tendenci a u samého zakončení vnější polovodivé vrstvy roste intenzita elektrického pole nad maximální elektrickou pevnost XLPE 22 kV/mm. Hodnota intenzity, která zde byla získána je 22,97 kV/mm. Protože elementy vytvořené sítě nelze donekonečna zmenšovat, lze předpokládat, že ve skutečnosti bude intenzita v tomto místě nepatrně větší, než hodnota 22,97 kV/mm. V tomto místě po připojení napájení dojde s největší pravděpodobností k elektrickému průrazu.

Průběh A má kvůli zkosenému proložení větší délku než průběh B. Tato skutečnost nemá na maximální zjištěnou hodnotu intenzity elektrického pole žádný vliv.

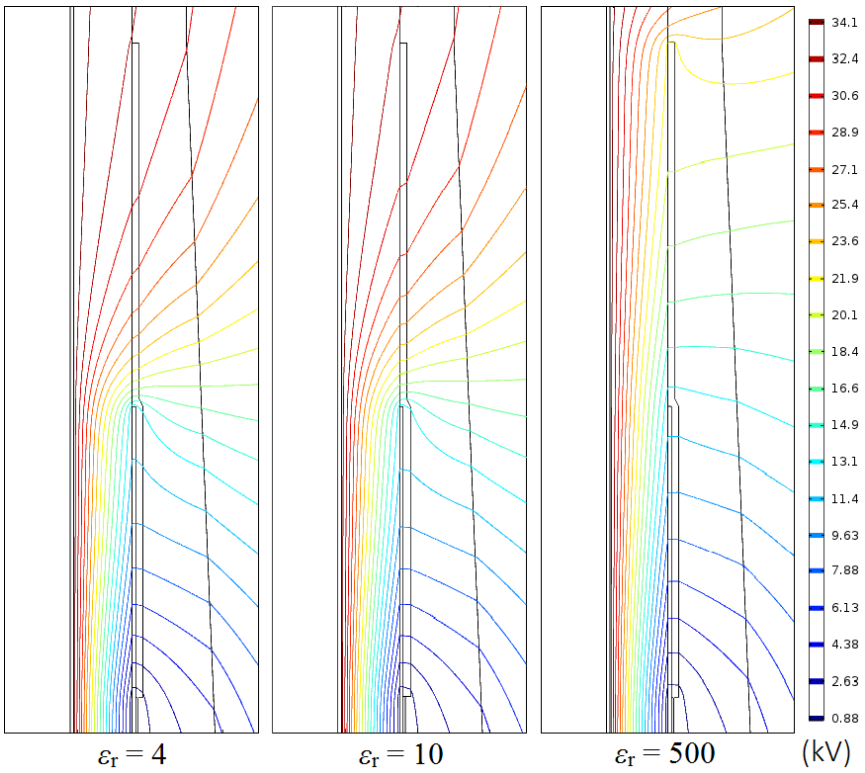
Graf č. 3 – Průběh intenzit v modelu bez řízení elektrického pole



3.3 Simulace s řízením elektrického pole pomocí SCT

3.3.1 Se změnou relativní permitivity SCT

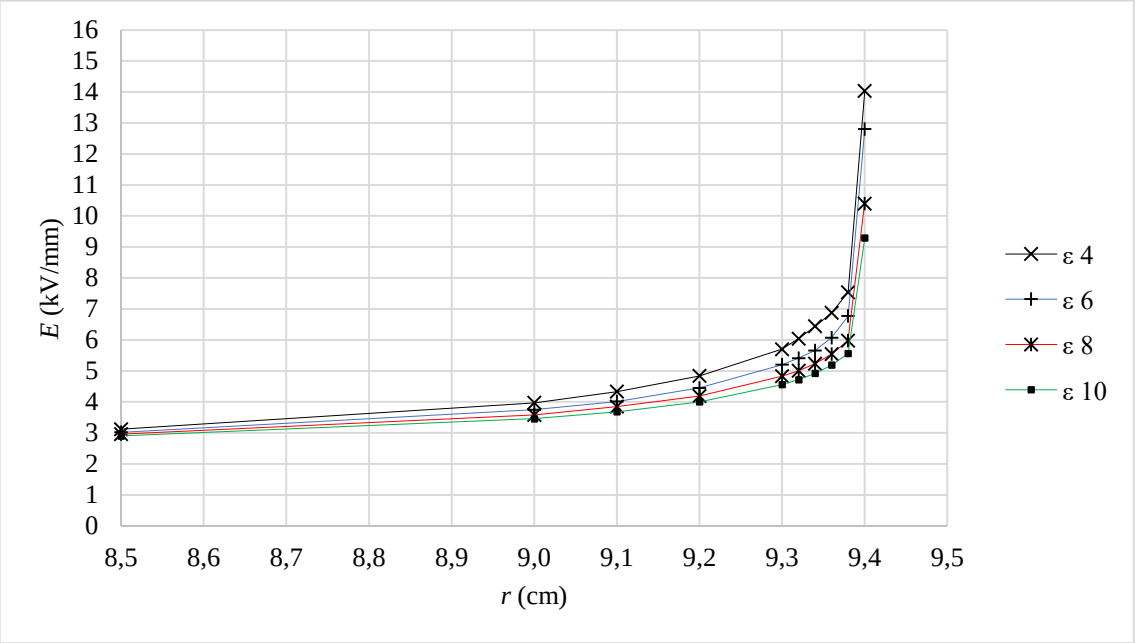
Jednou z metod snížení elektrického namáhání je použití SCT, která se umisťuje přes zakončení vnější polovodivé vrstvy, tak jak je popsáno v kapitole 2.2.3. Pro první sadu simulací použijeme materiál SCT s tloušťkou 1 mm a relativními permitivitami 4, 6, 8 a 10.



Obrázek č. 17 – Rozložení ekvipotenciál při řízení pomocí SCT s různými permitivitami

Z průběhů v grafu číslo 4 a hodnot uvedených v tabulce číslo 5 je zřejmá snižující se tendence maximální intenzity elektrického pole spolu s rostoucí relativní permitivitou SCT. Ideálním řešením by tedy bylo použití SCT s co nejvyšší relativní permitivitou. Při pohledu na obrázek číslo 17 zjistíme, že se rozložení ekvipotenciál pro permitivity 4 a 10 vizuálně téměř nezměnilo. Skutečná hodnota intenzity $\vec{E}$ však klesla z 14,03 kV/mm na 9,29 kV/mm. Pokud provedeme simulaci a nastavíme relativní permitivitu například na hodnotu 500, zjistíme, že dojde k značnému snížení namáhání na konci vnější polovodivé vrstvy, ale zároveň dojde k přesunu elektrického namáhání na konec SCT. Problém se tím tedy neřeší a relativní permitivitu SCT není vhodné neomezeně zvyšovat.

Graf č. 4 – Průběh intenzit v modelu s řízením pomocí SCT



Tabulka č. 5 – Maximální hodnoty intenzity $\vec{E}$ na konci vnější polovodivé vrstvy při změně ε_r

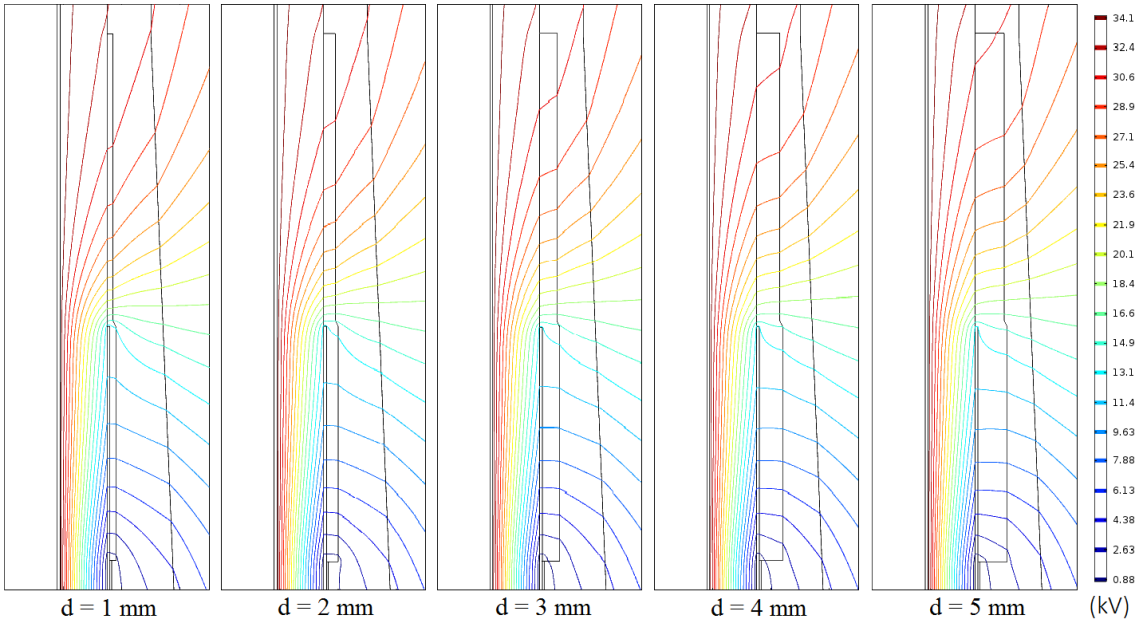
ε_r (-)	4	6	8	10
$\vec{E}_{max}$ (kV/mm)	14,03	12,08	10,40	9,29

3.3.2 Se změnou tloušťky SCT

Další sadu simulací provedeme pro SCT s $\varepsilon_r = 10$ se kterou bylo v předchozí části dosaženo nejlepšího výsledku, avšak budeme měnit tloušťku SCT od 1 mm do 5 mm s krokem 1 mm. Ze získaných hodnot uvedených v tabulce číslo 6 je s rostoucí tloušťkou SCT patrný mírný pokles intenzity elektrického pole, ale například hodnota intenzity elektrického pole pro tloušťku 3 mm je větší než pro tloušťku 2 mm. Rostoucí tloušťka má tedy na snižování elektrického namáhání částečně pozitivní vliv.

Tabulka č. 6 – Maximální hodnoty intenzity $\vec{E}$ na konci vnější polovodivé vrstvy při změně d

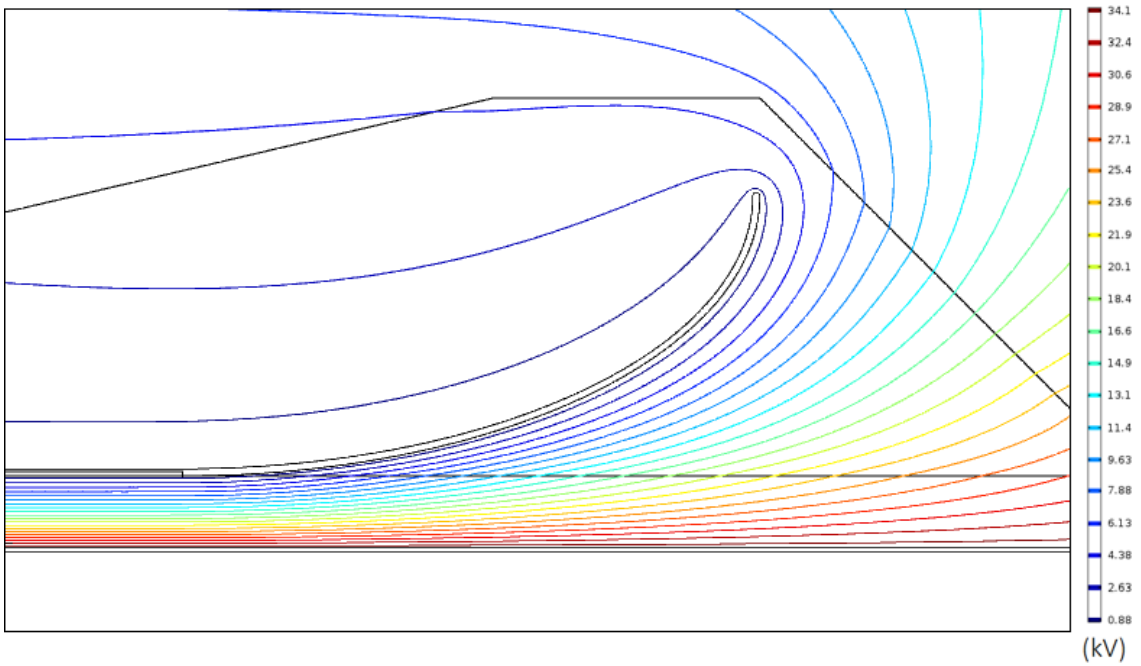
d (mm)	1	2	3	4	5
$\vec{E}_{max}$ (kV/mm)	9,29	8,81	9,17	8,41	8,07



Obrázek č. 18 – Rozložení ekvipotenciál při řízení pomocí SCT s různými tloušťkami

3.4 Simulace s řízením elektrického pole geometrickou metodou

Dalším způsobem jak řídit elektrické pole je geometrická metoda, která je blíže popsána v kapitole 2.2.2. Pro simulaci byl použit stejný model kabelu jako pro předešlou simulaci, tentokrát však byla SCT nahrazena tenkým měděným kuželem, který je spojen se stíněním.



Obrázek č. 19 – Rozložení ekvipotenciál při geometrickém řízení pomocí deflektoru

Z výstupu simulace na obrázku číslo 19 je patrné, že na konci vnější polovodivé vrstvy nedochází k žádnému zahuštění siločar a maximální intenzita zde dosahuje hodnot okolo 6 kV/mm. Ke zvýšenému elektrickému namáhání naopak dochází na samotném konci kužele, kde ale hodnota intenzity elektrického pole nepřesahuje hodnotu cca 4 kV/mm. Této hodnotě intenzity elektrického pole materiál koncovky bez problémů odolá. Jinak tato metoda řízení elektrického pole poskytuje velmi dobré výsledky, ale za cenu zvětšení rozměrů koncovky kvůli umístění deflektoru. Navíc je tato metoda řízení použitelná pouze u za studena nasouvacích koncovek.

3.5 Simulace s řízením elektrického pole pomocí HPL s EE

3.5.1 Varianta s HPL podsunutou pod vnější polovodivou vrstvu

V této simulaci opět použijeme stejný základní model kabelu a elektrické pole budeme řídit způsoby, které jsou popsány v kapitole 2.2.4. Podle [19] bylo dosaženo nejlepších výsledků pro konstrukce na obrázcích číslo 13 a 14, proto se zaměříme právě na ně.

První simulace byla provedena pro model na obrázku číslo 13, ve kterém byla použita HPL s relativní permitivitou $\varepsilon_r = 40$ a EE se nacházela na povrchu HPL. HPL o tloušťce 1 mm byla podsunuta pod vnější polovodivou vrstvu v délce 10 mm. Rozměry EE byly následující, tloušťka 0,2 mm a délka 10 mm. V jednotlivých simulacích bude EE posouvána dále od zakončení vnější polovodivé vrstvy a zároveň bude zkoumán vliv EE při uzemněném stavu (označeno G) a neuzemněném stavu (označeno NG).

Ze získaných hodnot intenzity elektrického pole, které jsou uvedeny v tabulce číslo 7 a zobrazeny na grafu číslo 5 je s rostoucí vzdáleností EE od vnější polovodivé vrstvy nejprve vidět pokles intenzity elektrického pole, ale po překročení vzdálenosti 20 mm je při uzemněné variantě EE opět patrný její nárůst. Při neuzemněné variantě byly maximální hodnoty intenzity naměřeny především na hranách EE blíže k vnější polovodivé vrstvě. U uzemněné varianty naopak na hranách dále od vnější polovodivé vrstvy. Vhodným řešením omezení těchto zvýšených intenzit by bylo použití zaoblených hran EE.

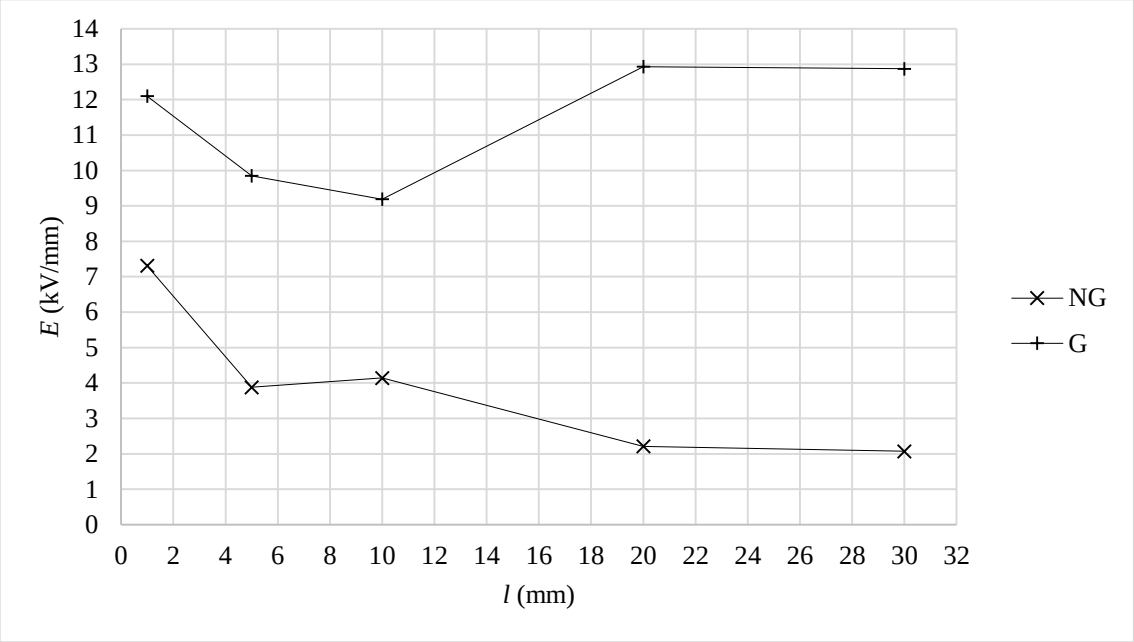
Tabulka č. 7 – Maximální hodnoty intenzity $\vec{E}$ pro různé vzdálenosti EE od vnější polovodivé vrstvy

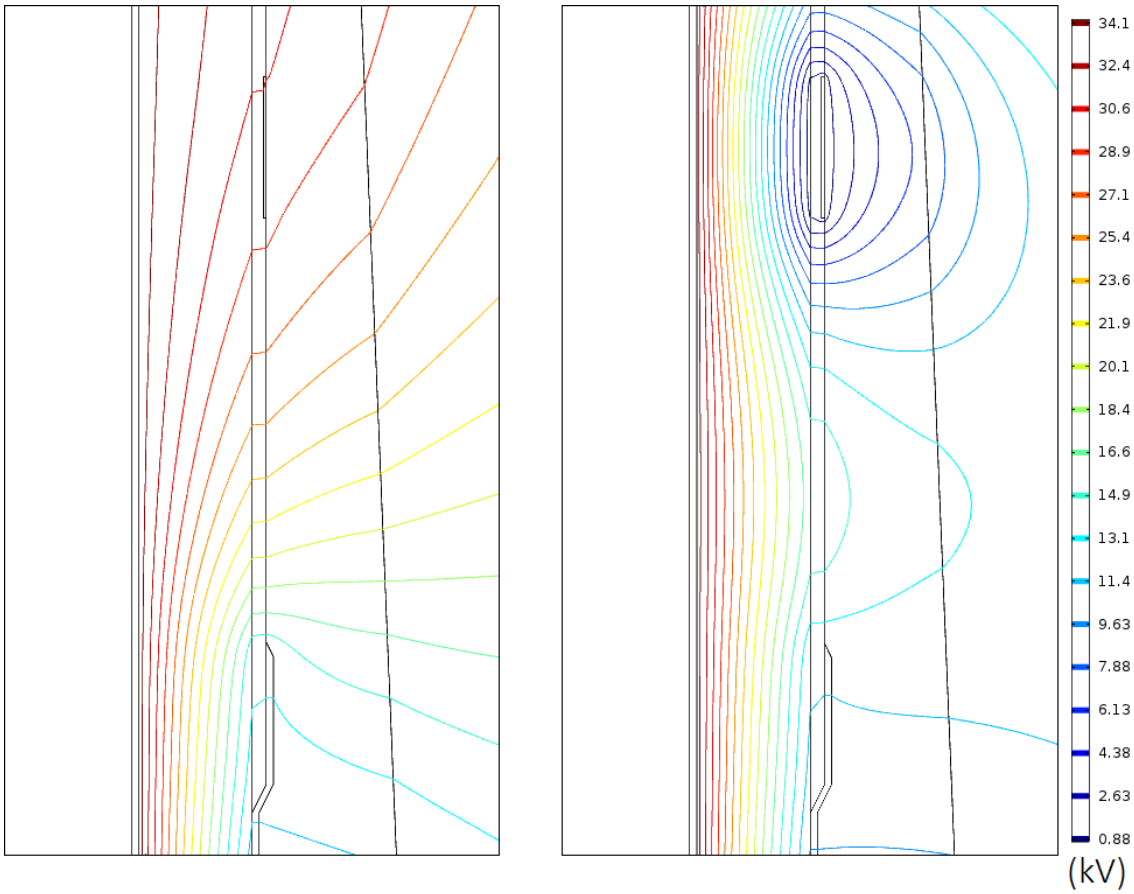
l **(mm)**	1	5	10	20	30
$\vec{E}_{\max NG}$ **(kV/mm)**	7,32	3,88	4,14	2,21	2,07
$\vec{E}_{\max G}$ **(kV/mm)**	12,10	9,85	9,19	12,93	12,87

Z obou variant tedy vychází lépe varianta s neuzemněnou EE umístěná 30 mm od zakončení vnější polovodivé vrstvy, která snižuje maximální intenzitu elektrického pole až na hodnotu 2,07 kV/mm. Tato hodnota je cca 4x nižší než nejnižší hodnota při řízení pomocí samotné SCT a to především kvůli vložené elektrodě a zvýšené hodnotě relativní permitivity HPL.

Nevýhodou může být větší složitost konstrukce řídící vrstvy a tedy vyšší nároky na kvalitu vytvořené vrstvy. Počet ostrých míst kvůli přítomnosti EE může také zvyšovat počet míst, kde může dojít k průrazu.

Graf č. 5 – Průběh maximálních hodnot intenzity $\vec{E}$ pro různé vzdálenosti EE od vnější polovodivé vrstvy





Obrázek č. 20 – Rozložení ekvipotenciál při řízení pomocí HPL a neuzemněné a uzemněné EE

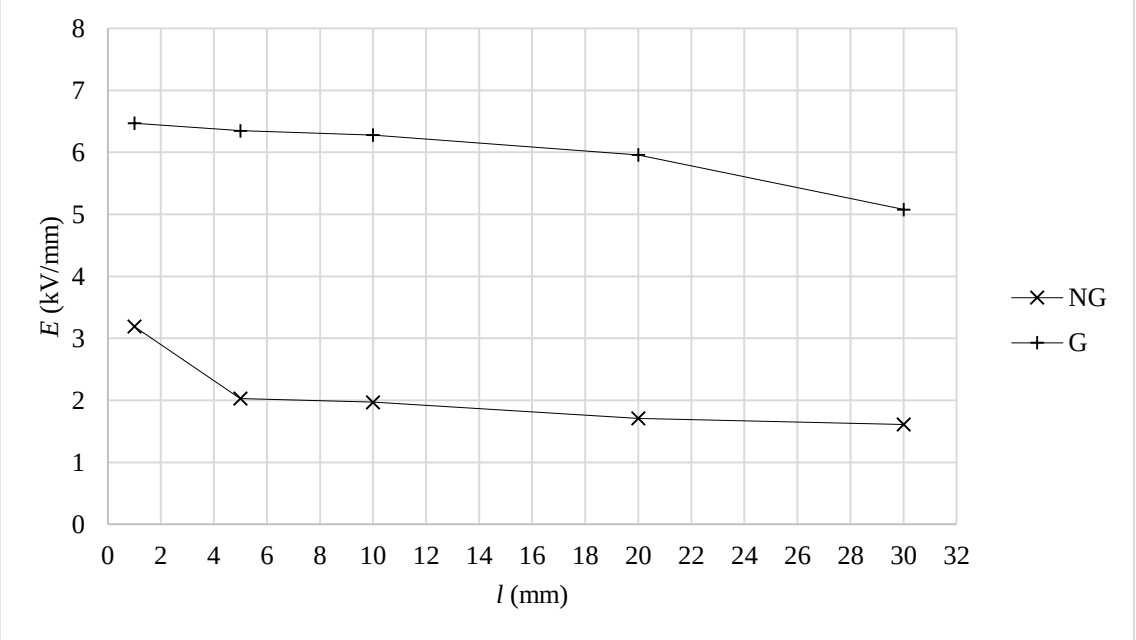
3.5.2 Varianta s vnější polovodivou vrstvou zasunutou do HPL

V této části navážeme na předchozí simulaci a do modelu přidáme další HPL vrstvu, tak že vnější polovodivá vrstva bude zasunuta mezi tyto dvě vrstvy. EE tentokrát přemístíme z povrchu vnitřní HPL na povrch vnější HPL a zaoblíme hrany EE tak aby nedocházelo ke zvyšování elektrické intenzity, jako v předchozí simulaci. Opět provedeme simulace pro vzdálenosti 1, 5, 10, 20 a 30 mm od vnější polovodivé vrstvy a neuzemněnou a uzemněnou variantu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce a grafu.

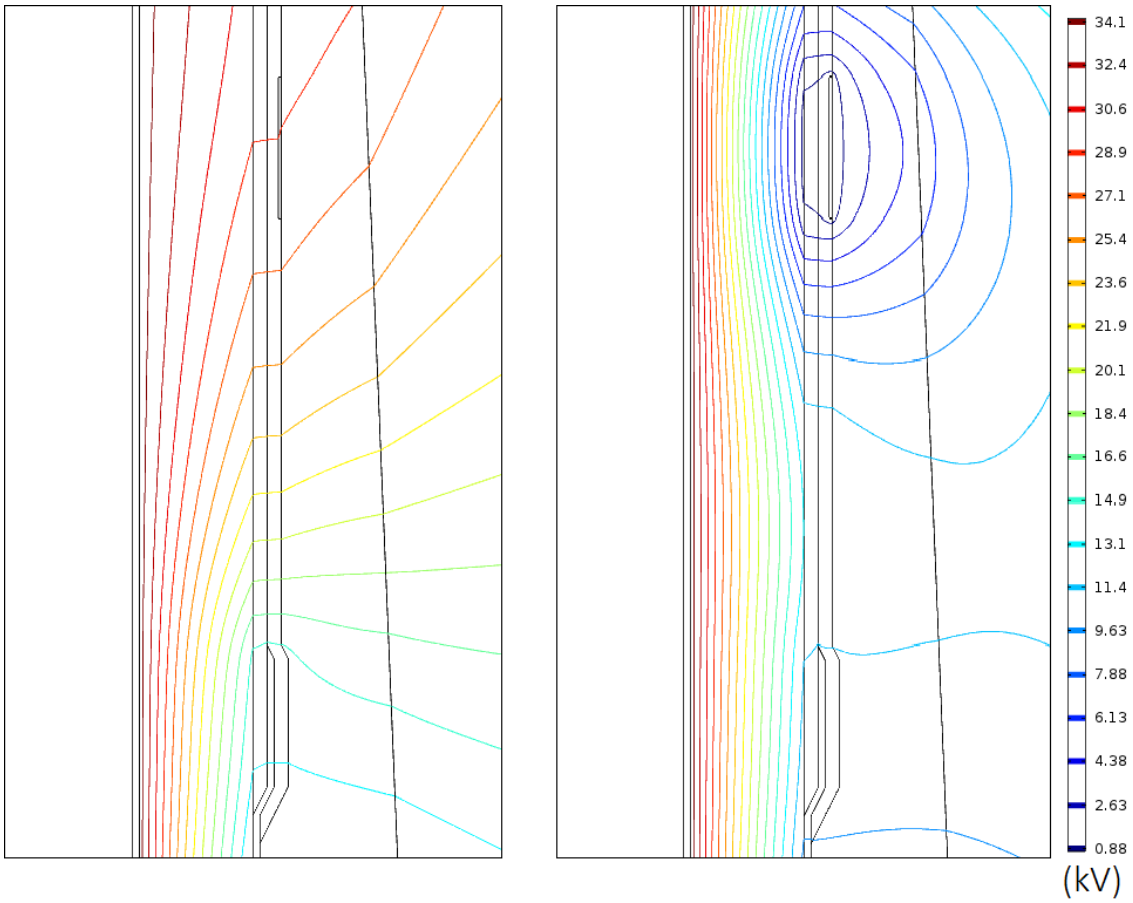
Tabulka č. 8 – Maximální hodnoty intenzity $\vec{E}$ pro různé vzdálenosti EE od vnější polovodivé vrstvy

l **(mm)**	1	5	10	20	30
$\vec{E}_{\max NG}$ **(kV/mm)**	3,19	2,03	1,97	1,71	1,61
$\vec{E}_{\max G}$ **(kV/mm)**	6,47	6,35	6,28	5,96	5,08

Graf č. 6 – Průběh maximálních hodnot intenzity $\vec{E}$ pro různé vzdálenosti EE od vnější polovodivé vrstvy



Opět jako v předchozí kapitole vychází hodnoty intenzity elektrického pole nižší pro variantu s neuzemněnou EE, kde bylo dosaženo minimální hodnoty 1,61 kV/mm. Zvětšení tloušťky HPL a zaoblení hran EE vedlo k pozitivnímu snížení maximální intenzity na hraně EE blíže k vnější polovodivé vrstvě. U varianty s uzemněnou EE docházelo s rostoucí vzdáleností od vnější polovodivé vrstvy k zahušťování ekvipotenciál na samotném konci HPL a tedy nárůstu elektrické intenzity až na hodnotu cca 13 kV. Tato kombinace tedy není nejvhodnější. V porovnání se simulací v kapitole 3.5.1 je konstrukce řídící vrstvy složitější a tedy více náchylná na nepřesnosti a poruchy. Rozložení ekvipotenciál pro toto uspořádání je na obrázku číslo 21.



Obrázek č. 21 – Rozložení ekvipotenciál při řízení pomocí HPL a neuzemněné a uzemněné EE

3.6 Simulace přímé kabelové spojky s řízením pole pomocí SCT

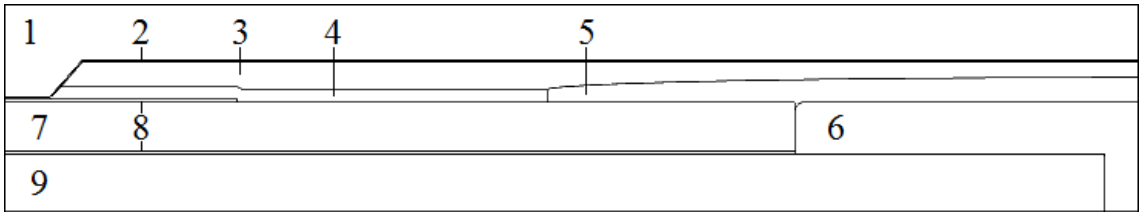
Poslední simulací, která byla provedena je přímá kabelová spojka s řízením pole pomocí nejjednodušší metody se SCT. Jedná se o dvě identicky zakončené žíly kabelu, které jsou umístěny proti sobě. Podrobnější popis spojek je uveden v kapitole 1.4.1. U spojek, na rozdíl od koncovek, nedochází k pronikání elektrického pole ven z tělesa spojky díky přetažené stínící síťce nebo pancíři. Elektrické pole je přesto nutné řídit na koncích vnějších polovodivých vrstev. V následující simulaci byl opět použit stejný kabel, tentokrát byl ke zkrácení jednotlivých vrstev použit postup podle [23].

Tabulka č. 9 – Rozměry a vlastnosti zakončených kabelů

Vrstva	l (mm)	d (mm)	ε_r (-)
Prostředí	490	50	1
EAl jádra	240	9	∞
Vnitřní polovodivé vrstvy	190	0,5	1000
XLPE izolace	190	8	2,3
Vnější polovodivé vrstvy	100	0,5	1000
Páskové stínění	70	0,3	∞
PVC plášť	300	5	2,9

Tabulka č. 10 – Rozměry a vlastnosti částí kabelové spojky

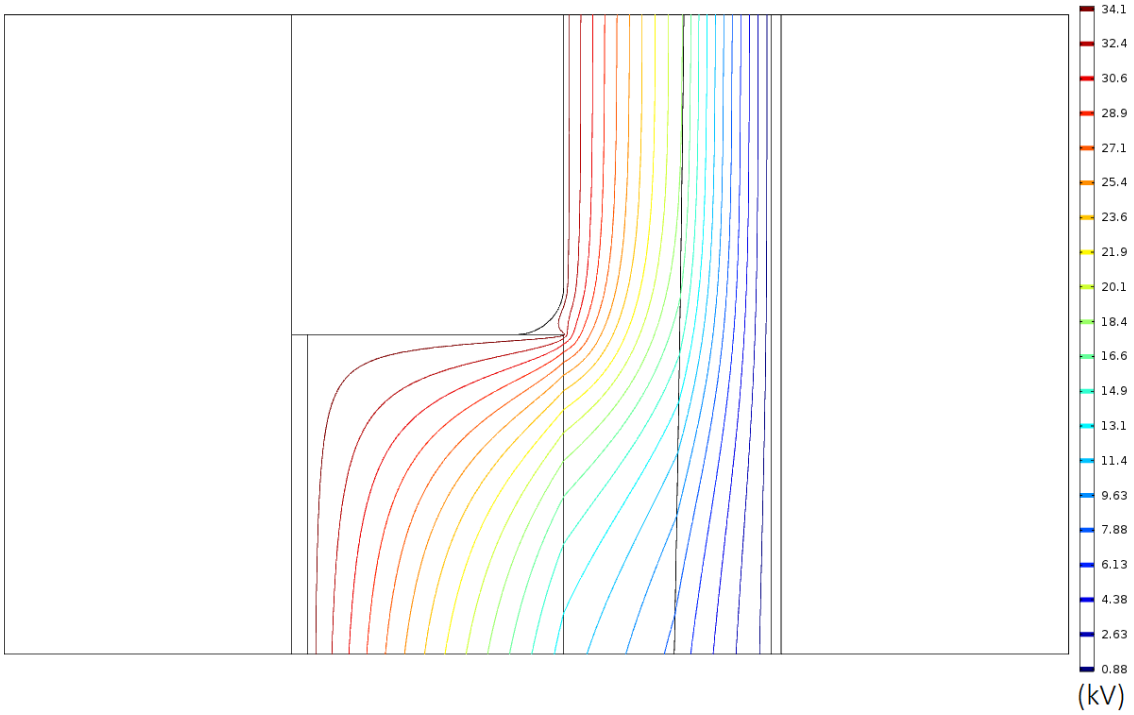
Vrstva	*l* (mm)	*d* (mm)	ε_r (-)
Hliníkový spojovač	110	17,5	∞
Výplňová páska	190	2	4
Izolační trubice	348	4	2,3
Stínící síťka	360	0,3	∞
Vnější plášť spojky	440	100	2,9



Obrázek č. 22 – Detail poloviny modelu spojky kabelu

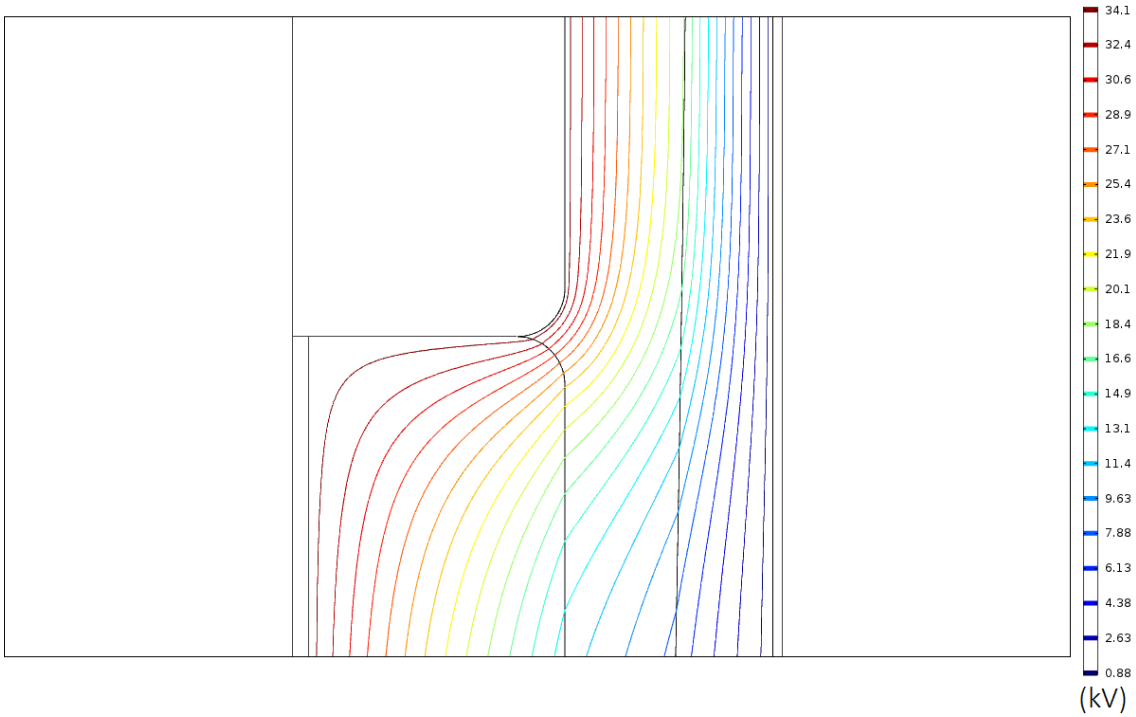
1 – vnější plášť spojky, 2 – síťkové stínění, 3 – izolační trubice spojky, 4 – SCT, 5 – výplňová páska, 6 – hliníkový spojovač, 7 – XLPE izolace, 8 – polovodivé vrstvy, 9 - jádro

Po simulaci bylo opět získáno rozložení ekvipotenciál v celé spojce. U zakončení vnějších polovodivých vrstev byla zjištěna hodnota intenzity 6,74 kV/mm. Tato hodnota je o 2,07 kV/mm nižší než hodnota intenzity u kabelové koncovky při použití stejné konfigurace. To je způsobeno rozložením ekvipotenciál, které jsou uzavírány uvnitř stínící síťky. V izolační trubici spojky byla zjištěna intenzita o přijatelné hodnotě 6,66 kV/mm. Na koncích původních XLPE izolací se však objevilo značné zahuštění siločar tak jak tomu na obrázku číslo 23 a intenzita zde dosahovala hodnot 33,28 kV/mm a 34,39 kV/mm. Toto místo musí být ošetřeno.



Obrázek č. 23 – Rozložení ekvipotenciál na zakončení XLPE izolace v kabelové spojce

Vhodným řešením může být zaoblení rohů konce XLPE izolace. Po provedení této úpravy dojde k lepšímu rozložení elektrického pole. Maximální zde vypočtení intenzita zde dosahovala hodnoty 8,96 kV/mm.



Obrázek č. 24 – Rozložení ekvipotenciál na zakončení XLPE izolace v kabelové spojce po úpravě

Závěr

Při pokládání nových kabelových vedení vysokého napětí se v současnosti používají především kabely s izolací ze zesítěného polyetylenu. Na nižších napěťových hladinách vysokého napětí se lze také setkat s kabely s izolací, která je založena na polymerech. Konkrétně na etylen propylenové pryži nebo polyvinylchloridu. Izolace založené na polymerech mají oproti kabelům s izolací z impregnovaného papíru řadu výhod, které se projevují nejen v oblasti elektrických vlastností, ale především v oblasti údržby a práce s nimi. Kvůli složitosti konstrukce impregnovaných kabelů musí být práce na nich prováděna pracovníkem s dostatečnými zkušenostmi. Například proces zakončování a spojování impregnovaných kabelů je v porovnání s prací na plastových kabelech technologicky, časově i finančně náročnější. Skutečnost, že některé typy impregnovaných kabelů je nutné trvale udržovat ve vhodném pracovním stavu doléváním oleje je také nevýhodou, která se dlouhodobě finančně projeví. Zároveň jsou impregnované kabely a příslušenství k nim více náchylné k poruše. Naopak práce s plastovými kabely může být prováděna i méně zkušeným pracovníkem a to především díky jednodušší konstrukci kabelu a tím pádem i jednodušší konstrukci koncovek a spojek. Bezúdržbovost plastových kabelů je také pozitivem. Dalšími výhodami plastových kabelů jsou jejich elektrické vlastnosti, především relativní permitivita a ztrátový činitel. Nižší relativní permitivita zesítěného polyetylenu snižuje celkovou kapacitu kabelového vedení a tím pádem i nabíjecí proud. To vede ke snížení ztrát ve vedení. Dále lze zmínit lepší teplotní a časovou stálost izolace, která nepodléhá degradaci tak jako kabelový olej.

Všechny tyto vlastnosti vedou k zjednodušení koncovek a spojek pro plastové kabely. Použití dolévacích koncovek u impregnovaných labelů je oproti moderním technologiím montovaným za tepla a za studena opět konstrukčně, časově i finančně náročnější. Představiteli moderních technologií jsou za tepla smrštitelné, za studena smrštitelné a za studena nasouvací koncovky a spojky. Výhodou těchto technologií je jejich jednoduchost, která eliminuje počet míst náchylných k poruše. Další výhodou je možnost výběru technologie montáže v kombinaci s technologií řízení elektrického pole díky velkému množství kombinací výrobků, které jsou na trhu dostupné. Lze tak optimalizovat pracovní a finanční náročnost a například pro venkovní zakončení použít za tepla smrštitelné koncovky, které mají lepší odolnost proti pronikání vlhkosti a pro vnitřní zakončení použít za studena nasouvací koncovky. Stejné zásady platí i pro kabelové soubory.

Při zakončování a spojování kabelů je nejnáchylnějším místem k poruše zakončení vnější polovodivé vrstvy. V tomto místě dochází vlivem nerovnoměrného rozložení elektrického pole ke zvýšení elektrické intenzity, a pokud dojde k překročení maximální elektrické pevnosti izolace, dojde zde k průrazu. I pokud není elektrická pevnost překročena, tak může v místě se

zvýšenou intenzitou docházet k částečným výbojům a tím k degradaci izolace. Proto se tato místa ošetřují jednou z technologií řízení pole. Z provedených simulací nejlépe řídí elektrické pole geometrická metoda, která plynule snižuje intenzitu elektrického pole vystupujícího z konce kabelu. Přesto se s touto metodou setkáváme nejvíce v aplikacích velmi vysokého napětí a výše. Konstrukce této metody je totiž složitější, a proto se u vysokonapěťových koncovek a spojek setkáváme především s metodou řízení elektrického pole pomocí vrstvy se zvýšenou permitivitou. Tato metoda sice neřídí elektrické pole tak efektivně, za to poskytuje konstrukčně velmi jednoduché řešení, které může být nainstalováno na konec kabelu samostatně nebo může být pevně integrováno do tělesa koncovky a tím se složitost instalace koncovky ještě více sníží. Jde tedy o optimální řešení náročnosti práce a výsledku. Další metodou, se kterou se ale v praxi nesetkáváme, je řízení pole pomocí vrstvy se zvýšenou permitivitou a vloženou elektrodou. V simulacích této metody řízení bylo dosaženo snížení intenzity elektrického pole pouze v řádech jednotek kilovoltů na milimetr za cenu značného zvýšení složitosti řídící vrstvy. Tento fakt je zřejmě důvodem, proč se tato metoda v praxi nepoužívá.

Jev, který se v simulacích opakovaně objevoval, bylo zvyšování intenzity elektrického pole na rozích zakončených vrstev a to na takovou úroveň, že by v reálném provedení došlo k průrazu v daném místě. Řešením tohoto problému může být eliminace těchto rohů a ostrých zakončení a to tak, že se dané místo zaoblí a okolní prostředí vyplní vhodným materiálem se zvýšenou permitivitou.

Zdroje

[1] ČSN EN 60038. *Jmenovitá napětí CENELEC.* Praha: ÚNMZ, srpen 2012.

[2] KABLO ELEKTRO. *Kabely s XPE izolací 10, 22, 35, 50 kV*. Produktový katalog.

[3] ČSN IEC 60050-461. *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 461: Elektrické kabely.* Praha: ÚNMZ, srpen 2009.

[4] SCHENK, Ferdinand. *Jak se dělá kabel. Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Červenec 2011, s. 49-52 [cit. 5. března 2016]. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44238.pdf

[5] DRÁPALA, Jaromír. KURSA, Miroslav. *Elektrotechnické materiály: učební text* [online]. [cit. 7. března 2016]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0. Dostupné z: www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf

[6] KOBLÍŽEK, Vilém. *Technologické procesy: laboratorní cvičení. Část 1.* Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1997, 98 s. ISBN 80-010-1602-1.

[7] TYCO ELECTRONICS. *Silové kabelové soubory.* Produkrový katalog. 2002.

[8] UNIVERSAL CABLE BERHAD. *XLPE Insulated Power Cables* [online]. [cit. 10. března 2016]. Produktový katalog. Dostupné z: www.ucable.com.my/images/products/UC%20XLPE%20Catalogue.pdf

[9] DYSON, R. W. *Engineering polymers* [online]. [cit. 15. března 2016]. Glasgow: Blackie, 1990. ISBN 9780216926783. Dostupné z: www.books.google.cz/books/about/Engineering_Polymers

[10] ČSN EN 60228. *Jádra izolovaných kabelů*. Praha: ÚNMZ, červenec 2005.

[11] GUSTAVSEN, Bjørn. *Panel Session on Data for Modeling System Transients Insulated Cables* [online]. [cit. 20. března 2016]. SINTEF Energy Research. N-7465 Trondheim, Norway. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/7b49/a741944b408bc427123e5dcad3ef19b73d96.pdf

[12] KUFFEL, E. ZAENGL, W.S. a KUFFEL, J. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Vyd. 2. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 0-7506-3634-3.

[13] NEXANS. *6 – 36 kV Medium Voltage Underground Power Cables* [online]. [cit. 28. března 2016]. Produkrový katalog. 2008. Dostupné z: www.nexans.co.uk/UK/files/Underground%20Power%20Cables%20Catalogue%2003-2010.pdf

[14] ČSN 33 0165 ed. 2. *Značení vodičů barvami, a nebo číslicemi - Prováděcí ustanovení.* Praha: ÚNMZ, duben 2014.

[15] CELLPACK. *Medium voltage – kabelové soubory pro střední napětí*. Produkrový katalog. 2015.

[16] PIRELLI. *VN kalové soubory*. Produktový katalog.

[17] PANKRÁC, Vítězslav. *Úvod do elektrostatického pole* [online]. [cit. 4. dubna 2016]. Učební text. Dostupné z: www.old.elmag.org/cs/A1B17EMP-elektromagneticke-pole

[18] BAS, Gökçen. *Electric field analysis in stress controlled high voltage cables* [online]. [cit. 8. dubna 2016]. Scholl of natural and applied sciences of middle east technical university, 2005. Dostupné z: www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Stresscontrolledhighvoltage.pdf

[19] NIKOLAJEVIC, S.V. PEKARIC-NAD, N.M. a Dyimitrijevic, R.M. *A new concept in construction of cable terminations for medium voltages cables* [online]. [cit. 10. dubna 2016]. IEEE Transactions on, vol.13, no.3, pp.712-717, Jul 1998.

[20] UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA. *Finite elements for electrical engieering* [online]. [cit. 20. dubna 2016]. Učební text. Dostupné z: http://www.aedie.org/eeej/webrevista/articulos/librosONLINE/EFRBP2006FULL.pdf

[21] NKT CABLES. *35-AXEKVCEY, Silové kabely s izolací ze zesítěného polyetylenu* [online]. [cit. 25. dubna 2016]. Učební text. Dostupné z: http://www.nktcables.com

[22] CELLPACK. *Jednožilová koncovka vnitřní pro kabely s plastovou izolací a polovodivou vrstvou.* Návod k montáži.

[23] CELLPACK. *Přímá spojka pro 3 jednozilové plastové kabely*. Návod k montáži.

Seznam grafů, obrázků a tabulek

Grafy

Graf č. 1 – Průběh intenzity *E* v jádře a v izolaci kabelu 32
Graf č. 2 – Průběh potenciálu φ v jádře a v izolaci kabelu..... 33
Graf č. 3 – Průběh intenzit v modelu bez řízení elektrického pole 40
Graf č. 4 – Průběh intenzit v modelu s řízením pomocí SCT 41
Graf č. 5 – Průběh max. hodnot intenzity *E* pro různé vzdál. EE od vnější polovod. vrstvy..... 44
Graf č. 6 – Průběh max. hodnot intenzity *E* pro různé vzdál. EE od vnější polovod. vrstvy..... 45

Obrázky

Obrázek č. 1 – Příčný řez třížilovým PILC kabelem 18
Obrázek č. 2 – Příčný řez čtyřžilovým plastovým kabelem..... 18
Obrázek č. 3 – Molekuly a řetězce LPE a XLPE 19
Obrázek č. 4 – Příčný řez jednožilovým XLPE kabelem..... 19
Obrázek č. 5 – Jednožilová a třížilová varianta dolévací koncovky pro PILC kabely..... 25
Obrázek č. 6 – Řez venkovní jednožilovou teplem smrštitelnou koncovkou 27
Obrázek č. 7 – Řez venkovní jednožilovou nasouvací koncovkou..... 27
Obrázek č. 8 – Řez jednožilovou přímou teplem smrštitelnou spojkou..... 29
Obrázek č. 9 – Znázornění uzavřené plochy v okolí válcového vodiče..... 30
Obrázek č. 10 – Rozložení ekvipotenciál na konci vnější polovod. vrstvy bez řízení el. pole ... 34
Obrázek č. 11 – Řez kabelovou koncovkou s integrovaným kuželem pro řízení el. pole..... 35
Obrázek č. 12 – Rozložení ekvipot. na konci vnější polovod. vrstvy s řízením pomocí SCT 35
Obrázek č. 13 – Řez zakončení nadsunuté polovodivé vrstvy s elektrodou na povrchu HPL 36
Obrázek č. 14 – Řez zakončení vsunuté polovodivé vrstvy s elektrodou na povrchu HPL..... 36
Obrázek č. 15 – Detail modelu konce kabelu v místě zakončení vnější polovodivé vrstvy 38
Obrázek č. 16 – Rozložení ekvipotenciál bez řízení elektrického pole..... 39
Obrázek č. 17 – Rozložení ekvipotenciál při řízení pomocí SCT s různými permitivitami 40
Obrázek č. 18 – Rozložení ekvipotenciál při řízení pomocí SCT s různými tloušťkami..... 42
Obrázek č. 19 – Rozložení ekvipotenciál při geometrickém řízení pomocí deflektoru 42
Obrázek č. 20 – Rozložení ekvipotenciál při řízení pomocí HPL a neuzem. a uzem. EE 44
Obrázek č. 21 – Rozložení ekvipotenciál při řízení pomocí HPL a neuzem. a uzem. EE 46
Obrázek č. 22 – Detail poloviny modelu spojky kabelu 47
Obrázek č. 23 – Rozložení ekvipotenciál na zakončení XLPE izolace v kabelové spojce..... 47
Obrázek č. 24 – Rozložení ekvipot. na zakončení XLPE izolace v kabel. spojce po úpravě 48

Tabulky

Tabulka č. 1 – Hodnoty parametrů jednotlivých izolačních materiálů 20
Tabulka č. 2 – Elektrické a fyzikální vlastnosti EAl a ECu 21
Tabulka č. 3 – Jmenovité průřezy S_S a odpory stínění 23
Tabulka č. 4 – Velikosti délky l, tloušťky d a relativní permitivity ε_r jednotlivých vrstev 38
Tabulka č. 5 – Max. hodnoty intenzity E na konci vnější polovodivé vrstvy při změně ε_r 41
Tabulka č. 6 – Max. hodnoty intenzity E na konci vnější polovodivé vrstvy při změně d 42
Tabulka č. 7 – Max. hodnoty intenzity E pro různé vzdálenosti EE od vnější polovod. vrstvy . 43
Tabulka č. 8 – Max. hodnoty intenzity E pro různé vzdálenosti EE od vnější polovod. vrstvy . 45
Tabulka č. 9 – Rozměry a vlastnosti zakončených kabelů 46
Tabulka č. 10 – Rozměry a vlastnosti částí kabelové spojky 47