

# Study on the Influence of Insulation Air Gap Discharge on Electrical and Thermal Performance of High Voltage Cable

Rong Xia<sup>1</sup>, Fan Yang<sup>2</sup>, Heng Liu<sup>2</sup>, Zhancao Si<sup>2</sup>, Zhe Cheng<sup>2</sup>, Zhankai Fang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Electric Power Research Institute, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: 3461632614@qq.com

Received: Mar. 19<sup>th</sup>, 2019; accepted: Apr. 5<sup>th</sup>, 2019; published: Apr. 12<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The high-voltage cable is affected by the stretching, bending and manufacturing processes. The insulating medium is prone to cracking and forms a crack air gap, thereby reducing the insulation properties of the high-voltage cable insulation material. In this paper, the ANSYS finite element simulation software is used to establish the two-dimensional electro-thermal coupling model of the high-voltage cable, and the model verification is carried out. Secondly, the electric field distribution and temperature distribution law in the presence of air gap in the insulation medium are studied. The results are as follows: 1) the electric field strength in the air gap increases, and the electric field strength in the insulation shield and in the insulation medium between the air gap and conductor screen decreases. 2) As the gap length increases, the larger the electric field is. When the air gap length is less than 1 mm, it is not easy to cause air gap discharge. When the air gap length is more than 1 mm, the air gap discharge is more likely to occur. 3) The rise of insulation temperature caused by the continuous discharge of the air gap can reach 87.8°C. The research results of the paper can provide reference for the insulation design and condition monitoring of high-voltage cables.

## Keywords

High-Voltage Cables, Finite Element, Coupling, Electric Field, Temperature

---

# 绝缘气隙放电对高压电缆的电学和热学性能的影响研究

夏荣<sup>1</sup>, 杨帆<sup>2</sup>, 刘恒<sup>2</sup>, 司战超<sup>2</sup>, 程哲<sup>2</sup>, 房占凯<sup>2</sup>

文章引用: 夏荣, 杨帆, 刘恒, 司战超, 程哲, 房占凯. 绝缘气隙放电对高压电缆的电学和热学性能的影响研究[J]. 智能电网, 2019, 9(2): 88-96. DOI: 10.12677/sg.2019.92009

<sup>1</sup>中国电力科学研究院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆

Email: 3461632614@qq.com

收稿日期: 2019年3月19日; 录用日期: 2019年4月5日; 发布日期: 2019年4月12日

## 摘要

高压电缆受制造工艺、拉伸和弯曲的影响, 绝缘介质容易出现开裂现象而形成裂纹气隙, 从而降低高压电缆绝缘材料的绝缘性能。本文首先利用ANSYS有限元仿真软件, 建立高压电缆二维电-热耦合模型, 并进行了模型验证; 其次研究了绝缘介质中存在裂纹气隙时的电场变化规律, 以及裂纹气隙局部放电所引起的温度分布变化。结果表明: 1) 存在气隙的情况下, 气隙中的电场强度增大, 而绝缘屏蔽层与气隙和导体屏蔽之间的绝缘介质的电场强度减小; 2) 随着气隙长度增加, 气隙内部的电场越大, 当气隙长度小于1 mm时, 不易引起气隙局部放电, 当气隙长度大于1 mm时, 更易引起气隙局部放电; 3) 气隙持续放电引起的绝缘温度升可达87.8℃。该论文研究成果可为高压电缆绝缘设计和状态监测提供参考。

## 关键词

高压电缆, 有限元仿真, 局部放电, 电场, 温度

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国家对环境、占地空间和城市美观的要求越来越高, 架空输电线路的数量受到了一定的限制, 高压输电电缆的使用能适应国家的发展战略。高压电缆的制造工艺、敷设方式等都有可能引起绝缘掺杂、金属毛刺和裂纹气隙等缺陷[1], 可引起局部放电现象, 使电缆温度升高, 严重时还会导致绝缘损坏。

多物理场耦合仿真分析可以更真实地反映高压电缆的实际工作状态和特性规律。河北科技大学的梁永春采用实际测量和多物理场耦合数值方法对电缆温度场进行了计算, 并能实时计算电缆动态载流量[2]。M. Rachek 等人研究了磁涡流场和热场的耦合模型, 运用该模型可用于分析交流电缆中的磁通密度和时空温度演变相互作用规律[3]。F. Yang 等人针对电缆接头, 研究了绝缘内部缺陷下电缆接头的电磁-热-力耦合模型, 仿真分析了不同缺陷下电缆接头的热力特性, 并对电缆接头不同类型的缺陷进行了表征[4]。华南理工大学的郝艳捧等人对海底电缆进行了电-热-流多物理场耦合仿真, 分析了海水温度和不同载流量下电缆的温度分布, 进而分析温度变化引起的电缆绝缘电场强度的变化[5]。W. Choo 等人采用电声脉冲法对空间电荷进行测量, 研究了不同温度下电缆的电场分布情况[6]。Li Zhonghua, M. R. Chen, S. Boggs 等人表明, 电缆绝缘的电场分布受多种因素的影响, 如绝缘电导率、温度梯度、不同施压方式、湿度和绝缘内部缺陷等[7] [8] [9] [10] [11]。三峡大学的方春华等人对电缆接头的主绝缘划伤、连接管毛刺、半导体层剥离不齐全和主绝缘杂质四种缺陷进行了有限元仿真, 用于指导分析电缆接头故障缺陷类型[12]。多场耦合仿真、缺陷识别及表征、运行状态评估等已是高压电缆研究的重点方向, 其研究成果可为电缆的设计和运行状态监测提供参考。

本文基于 ANSYS 仿真软件, 从多物理耦合场方面研究电缆绝缘存在裂纹气隙缺陷下的电-热耦合特性。首先建立电缆的多物理场计算模型和有限元仿真模型, 并进行了网格和边界条件分析; 其次, 仿真分析了正常运行状态下的电缆电场和温度场的分布, 并对耦合仿真模型进行了验证; 最后研究了不同裂纹气隙长度下电缆沿切向和径向的电场分布规律, 并分析了裂纹气隙所引起的局部放电对电缆的温度分布的影响。

## 2. 控制方程

### 2.1. 电磁场控制方程

正弦电磁场基本方程组的微分形式为:

$$\begin{cases} \nabla \times \dot{E} = -j\omega \dot{B} \\ \nabla \times \dot{H} = \dot{J} + j\omega \dot{D} \\ \nabla \cdot \dot{D} = \dot{\rho} \\ \nabla \cdot \dot{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\dot{E}$  为电场强度,  $\dot{B}$  为磁感应强度,  $\dot{H}$  为磁场强度,  $\dot{D}$  为电位移,  $\dot{J}$  为电流密度,  $\dot{\rho}$  为电荷密度。

由于工频电磁场的波长为  $\lambda = 6000 \text{ km}$ , 远大于高压电缆输电距离, 因此采用准静态场分析理论对高压电缆进行计算, 可忽略电磁感应项  $j\omega \dot{B}$  和位移电流项  $j\omega \dot{D}$ 。由基本微分方程可导出其动态位的控制方程为:

$$\begin{cases} \nabla^2 \dot{A} = -\mu J \\ \nabla^2 \dot{\phi} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\dot{A}$  为磁矢位,  $\dot{\phi}$  为电位, 求出动态位之后, 可通过下式求出电场和磁场分布。

$$\begin{cases} \dot{B} = \nabla \times \dot{A} \\ \dot{E} = -\frac{\partial \dot{A}}{\partial t} - \nabla \dot{\phi} \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2. 温度场控制方程

根据傅里叶(Fourier)传热定律和能量守恒定律, 可以得到二维温度场问题的控制方程, 在直角坐标系中可写成:

$$\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_v \quad (4)$$

其中,  $\rho$  为物质密度,  $c$  比热容,  $T$  为温度,  $\lambda$  为导热系数(设各材料导热系数各向同性),  $Q_v$  为内热源。稳态计算时, 等式左边温度对时间的偏导数等于零, 内热源  $Q_v$  等于电缆导体和金属屏蔽层产生的热量, 为

$$Q_v = \int_s \frac{J^2}{\sigma} dS \quad (5)$$

式中,  $\sigma$  为导体和金属屏蔽层的电导率,  $S$  为电流流过的等效截面积, 因此需要考虑电流集肤效应, 其透入深度为

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad (6)$$

式中,  $w = 2\pi f$  为角频率,  $\mu$  为相对磁导率,  $\gamma$  为电导率。

### 3. 10 kV 三芯高压电缆有限元模型

#### 3.1. 几何模型及材料

本文研究对象为 10 kV  $3 \times 120$  的三芯高压电缆, 其横截面结构如图 1 所示, 其中 1 为导体, 2 为导体屏蔽, 3 为绝缘体, 4 为绝缘屏蔽, 5 为金属屏蔽, 6 为填充体, 7 为包带, 8 为外护套。图 2 为以 B 相的导体圆心为坐标原点建立的直角坐标系, 其中  $R_1$  为 6.5 mm,  $R_2$  为 7 mm,  $R_3$  为 11.5 mm,  $R_4$  为 12 mm,  $R_5$  为 12.5 mm。

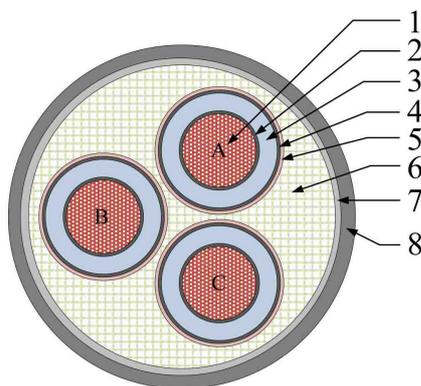


Figure 1. Structure diagram of 10 kV three-core HVAC cable  
图 1. 10 kV 三芯高压电缆结构简图

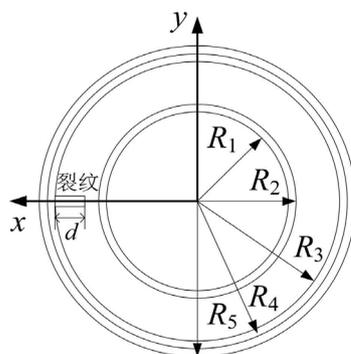


Figure 2. Schematic diagram of Single-phase cable size  
图 2. 单相电缆尺寸示意图

导体和金属屏蔽层为铜, 主绝缘为交联聚乙烯(XLPE), 内外半导体层和包带为聚氯乙烯(PVC), 填充层为聚丙烯(PP), 外护套为聚氨酯(TPU), 电缆使用的主要材料参数见表 1。由于垂直于电缆轴向的截面都相同, 本文仅对电缆截面进行二维仿真分析, 可大大节约计算机资源。

#### 3.2. 网格剖分和边界条件

##### 1) 网格剖分

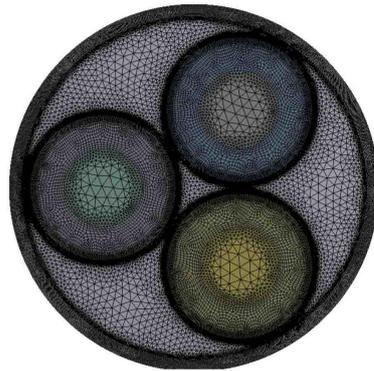
从电缆横截面看, 其各屏蔽层、包带和护套均为圆环, 采用扫略方式进行四边形剖分, 而导体、填充体和电缆外的空气域均采用三角形剖分方式, 并在流体和电缆表面的接触边界以及缺陷处加密剖分。其网格剖分如图 3 所示, 正常情况下有 160,346 个节点, 183,321 个单元, 存在裂纹缺陷时有 163,125 个

节点, 196,780 个单元。

**Table 1.** Material parameters of Cable

**表 1.** 电缆材料参数

参数	铜	XLPE	PVC	TPU	PP
密度 $\text{kg/m}^3$	8900	920	1460	1220	906
比热容 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	385	2320	1015	2100	1873
热导系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	386	0.33	0.14	0.25	0.22
相对介电常数	1	2.3	2.25	3.4	2.22



**Figure 3.** Mesh generation

**图 3.** 网格剖分

## 2) 电场边界条件

$ABC$  三相分别施加 50 Hz 的交流电压和电流激励,  $U_i = 10 \text{ kV}$ ,  $I_i = 325 \text{ A}$ ,  $\theta_a = 0$ ,  $\theta_b = -2\pi/3$ ,  $\theta_c = 2\pi/3$ 。为了防止金属屏蔽层过高的悬浮电压, 每一相需要接地, 外护套与大地接触, 电位也为零, 其余均为自然边界条件。

## 3) 温度边界条件

内热源  $Q_v$  包括导体和金属屏蔽层产生的热量, 可由(5)式求得; 电缆外边界为辐射散热和对流散热, 辐射系数设为 0.9, 换热系数设为  $12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 并设定其周围的环境温度为  $22^\circ\text{C}$ 。

## 4. 电-热耦合仿真

### 4.1. 电 - 热耦合

电缆的电 - 热耦合关系体现在温度的升高会降低导体的电导率, 而电导率的降低会导致导体的欧姆损耗上升, 又将引起温度继续升高, 最终达到稳定。电导率与温度的关系如下:

$$\gamma = \gamma_0 \left( 1 - C_1 \Delta t - C_2 \Delta t^2 - \dots - C_n \Delta t^n \right) \quad (7)$$

其中,  $\gamma_0$  为  $t_0$  温度时的电导率,  $\Delta t = t - t_0$ ,  $t$  为当前温度,  $C_1 \dots C_n$  为 1 至  $n$  阶电导温度系数, 忽略 2 阶以上的高阶项。

### 4.2. 模型验证

对高压电缆 A、B、C 三相施加有效值为 8.7kV 的正弦电压激励, 相位相差  $2\pi/3$ , 相序为正序, 其内部各点的电场、电位和磁场都是随时间交变的。当  $\varphi_A = 0$ 、 $\varphi_B = -2\pi/3$ 、 $\varphi_C = 2\pi/3$  时, 三相电缆电位径向

分布如图 4 所示, 图 5 为电场分布云图。由图 4 可知, A 相的电位从导体到金属屏蔽层, 其电位从 8.7 kV 线性下降为 0, 而 BC 两相导体的电位从 -4.35 kV 增加到 0, 与交流电磁理论相符合。由图 5 可知, 电场强度都集中在绝缘层, 且与半径成反比例关系, 绝缘介质最大电场为 20.05 kV/cm。再根据高斯定理, 可导出第  $i$  层介质中的电场随半径  $r$  的计算公式

$$E_i = \frac{U}{r \varepsilon_i \sum_{k=1}^{k=n} \left( \frac{1}{\varepsilon_k} \ln \frac{r_{k+1}}{r_k} \right)} \quad (8)$$

式中,  $n$  为单相绝缘介质层数,  $U$  为绝缘层的电位差。计算出绝缘介质中的最大电场为 20.02 kV/cm, 与仿真结果相差 30 V/cm, 其误差在允许的范围。

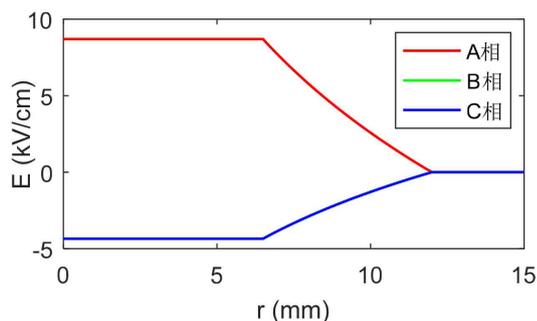


Figure 4. Potential radial distribution of three-phase cable

图 4. 三相电缆电位径向分布

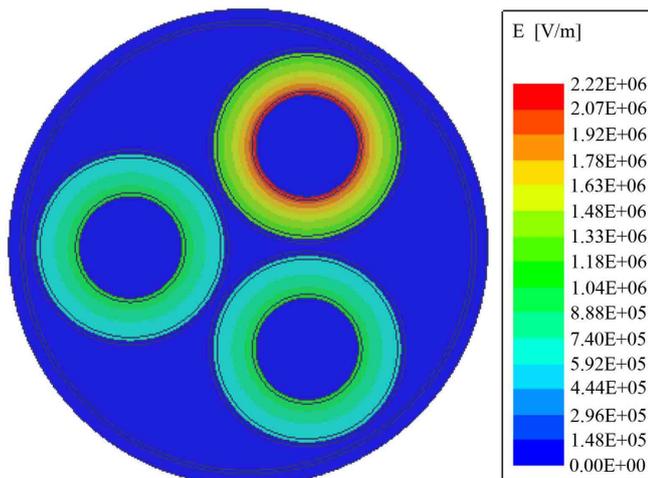


Figure 5. Electric field distribution

图 5. 电场分布

由(6)式计算出集肤深度  $d = 9.346$  mm, 由于集肤深度大于半径, 因此可以忽略集肤效应。把计算出的欧姆损耗作为电缆的热源, 并施加温度边界条件, 设置电-热耦合关系(电导温度系数为 0.00392), 获得电缆的温度分布如图 6 所示。非耦合下计算出每相电缆导体的单位长度的欧姆损耗都为 13.86 W/m, 每相金属屏蔽由涡流导致的欧姆损耗为 0.58 W/m。由于耦合作用下温度和电导率之间的相互关系, (4)式、(5)式和(7)式会进行反复迭代计算, 计算出每相电缆导体的单位长度的欧姆损耗都为 16.75 W/m, 而每相金属屏蔽由涡流导致的欧姆损耗为 0.67 W/m。

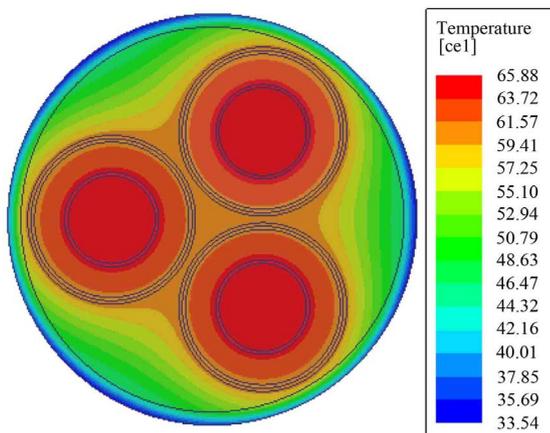


Figure 6. Temperature distribution  
图 6. 温度分布

### 4.3. 裂纹缺陷分析

绝缘裂纹气隙存将导致电场发生畸变, 可引发局部放电现象, 不同的裂纹气隙位置和长度将表现出不同的电热特性。本文对单相高压电缆绝缘开裂进行了仿真, 其裂纹气隙长度  $d$  分别为 1、2、3 和 4 mm, 宽为 0.5 mm。为了从切向和径向两个角度分析电场强度的变化, 研究了半径为  $R_2 + 0.25$  mm 的圆  $l_1$  上的电场分布和直线  $y = 0$  ( $R_1 < x < R_3$ ) 上的电场分布。

图 7 为圆  $l_1$  上的电场分布, 随着  $d$  的增加,  $\theta = \pi$  处的电场强度程指数下降趋势。图 8 为不同  $d$  下径向电场分布曲线, 由图可知, 当裂缝长度很小时, 由裂纹引起的电场强度增加了, 但依然低于绝缘内表面的电场强度 20.05 kV/cm; 随着裂纹长度的增大, 由裂纹引起的电场强度继续增加, 当  $d = 1$  mm 时, 由裂纹引起的电场强度等于绝缘内边缘的电场强度。也就是说, 当裂纹长度小于 1 mm 时, 其增加的电场强度不易引发局部放电; 当裂纹长度大于 1 mm 时, 更易引发局部放电。图 9 为裂纹长度为 4 mm 时的局部电场分布图, 裂纹气隙中的电场强度很大, 在气隙尖端达到 32.8 kV/cm, 而裂纹与导体之间的绝缘介质中的电场强度减小。

裂纹气隙在高电场下会发生局部放电现象, 持续的局部放电所引起的功率损耗有时是不容忽视的。设气隙一个周期内(0.02 s)的放电功率为  $196 \text{ W/m}^3$ , 将该值作为气隙放电的热源, 与 ABC 三相导体通入工频电流时所产生的热量一起仿真。图 10 为裂纹气隙放电时的温度分布云图, 最高温度为  $87.8^\circ\text{C}$ , 比正常运行时高了  $21.92^\circ\text{C}$ 。尽管 EPR 的最大载流温度可达  $95^\circ\text{C}$ , 但在环境温度较高、过负荷或雷电冲击下引起局放功率变大的情况下, 可能导致电缆温度超过最大载流温度, 将会影响电缆的载流量。

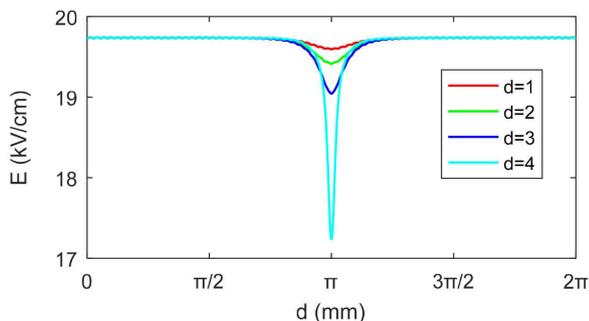
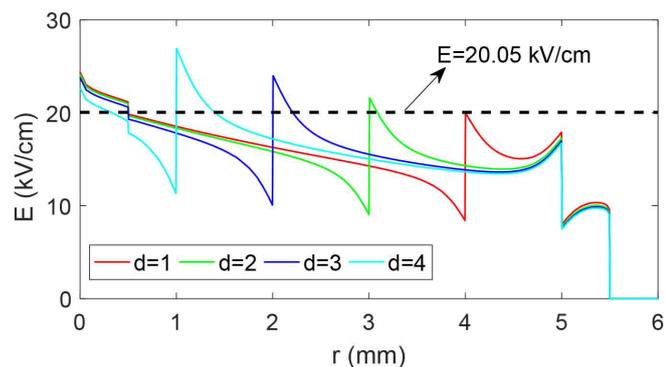
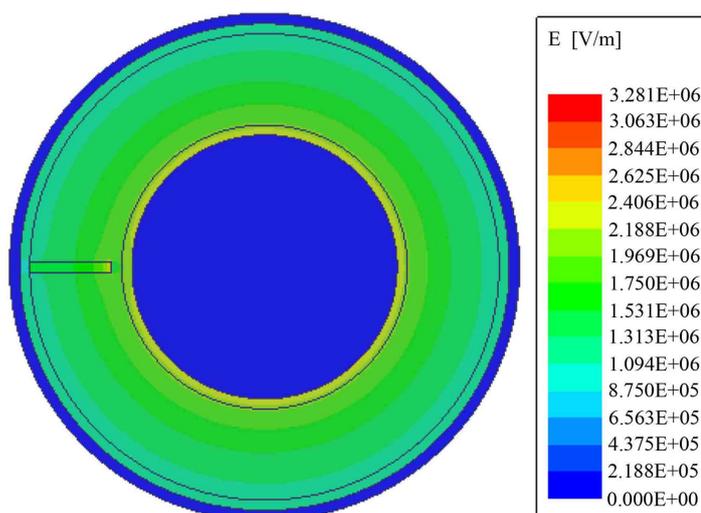


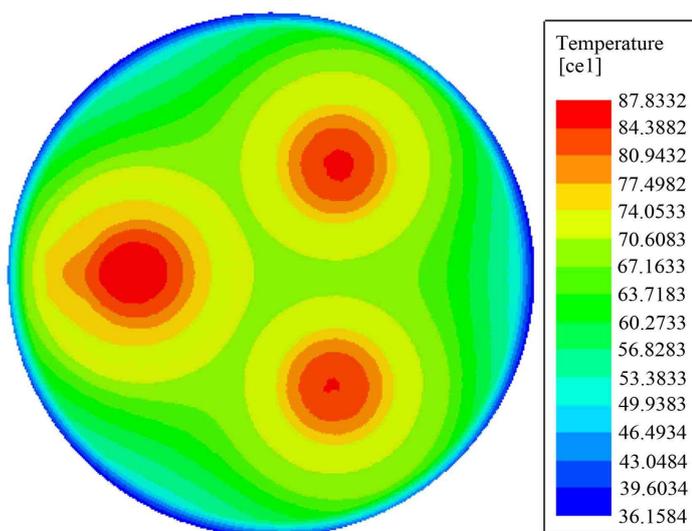
Figure 7. Electric field distribution curve of inner surface of insulation under different crack lengths  
图 7. 不同裂纹长度下绝缘内表面电场分布曲线



**Figure 8.** Radial electric field distribution curve under different crack lengths  
**图 8.** 不同裂纹长度下径向电场分布曲线



**Figure 9.** Electric field distribution cloud map under air gap defect  
**图 9.** 气隙缺陷下电场分布云图



**Figure 10.** Temperature distribution under air gap defect  
**图 10.** 气隙缺陷下的温度分布

## 5. 结论

本文利用有限元仿真软件对高压电缆进行了电-热仿真,分析了不同绝缘裂纹长度下的电场分布,主要研究结果如下:

1)  $d$  越长,曲线  $I_1$  上  $2\pi$  处的电场强度减小越快,裂纹气隙中的电场强度迅速上升,  $d = 4 \text{ mm}$  时,气隙电场达到  $32.8 \text{ kV/cm}$ 。

2) 当裂缝长度  $d = 1 \text{ mm}$  时,裂纹气隙引起的最大电场等于绝缘内边缘的电场。可以这样认为,当裂纹长度小于  $1 \text{ mm}$  时,电场的增大不易引起局部放电,当裂纹长度大于  $1 \text{ mm}$  时,电场的增大更容易引起局部放电。因此在电缆绝缘制造的时候,考虑到操作电压和雷击过电压等,需要将绝缘内部微小气隙控制到足够小的尺寸。

3) 裂缝气隙引起的持续局部放电会导致电缆绝缘的欧姆损耗增加,导致绝缘温度比正常运行时升高了  $21.92^\circ\text{C}$ ,将会导致电缆额定载流量下降。

## 致 谢

本论文工作得到了国家电网公司总部科技项目(内置局放传感器高压电缆系统的研究, GYW17201600045)的支持。

## 参考文献

- [1] 陈茂荣, 杨忠, 牛海清. 中压电缆缺陷原因及其状态检测技术现状[J]. 电线电缆, 2013(5): 39-42.
- [2] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1142-1150.
- [3] Rachek, M.H. and Larbi, S.N. (2008) Magnetic Eddy-Current and Thermal Coupled Models for the Finite-Element Behavior Analysis of Underground Power Cables. *IEEE Transactions on Magnetics*, **44**, 4739-4746. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2004212>
- [4] Yang, F., Cheng, P., Luo, H., Yang, Y., Liu, H. and Kang, K. (2016) 3-D Thermal Analysis and Contact Resistance Evaluation of Power Cable Joint. *Applied Thermal Engineering*, **93**, 1183-1192. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.076>
- [5] 郝艳捧, 陈云, 阳林, 等. 高压直流海底电缆电-热-流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术, 2017(11): 68-76.
- [6] Choo, W., Chen, G. and Swingler, S.G. (2011) Electric Field in Polymeric Cable due to Space Charge Accumulation under DC and Temperature Gradient. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **18**, 596-606. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5739466>
- [7] 李忠华, 刘乐乐, 郑欢, 梁斯婷. HVDC 电缆电场分布影响因素的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2016(9): 2563-2571.
- [8] Hjerrild, J., Boggs, S., Holboll, J.T. and Henriksen, M. (2001) DC-Field in Solid Dielectric Cables under Transient Thermal Conditions. *ICSD'01: Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics*, Eindhoven, 25-29 June 2001, 58-61.
- [9] Lachini, S., Gholami, A. and Mirzaie, M. (2010) The Simulation of Electric Field Distribution on Cable under the Presence of Moisture and Air Voids. *Power Engineering & Optimization Conference*, Shah Alam, 23-24 June 2010.
- [10] Zhu, Z., Chao, H., Ying, Y., Ming, Z. and Qin, Y. (2014) Research on Partial Discharge Mechanism and Characteristics for 10 kV Cable Joint with Air Gap Defect. *China International Conference on Electricity Distribution*, Shenzhen, 23-26 September 2014. <https://doi.org/10.1109/CICED.2014.6991906>
- [11] 陈茂荣, 杨忠, 牛海清. 中压电缆缺陷原因及其状态检测技术现状[J]. 电线电缆, 2013(5): 39-42.
- [12] 方春华, 汤世祥, 潘明龙. 10 kV 电缆中间接头典型缺陷仿真分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 55-59.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)