

Study on the Influence of Insulation Air Gap Defects on the Current Carrying Capacity of Shore Power Cable

Boda Zhou¹, Junling Liang², Dingfang Ke¹, Heng Liu³, Chengzhi Zhu¹, Zhenwei Ji²

¹State Grid Zhejiang Electric Power Company Ltd., Hangzhou Zhejiang

²State Grid Shandong Electrical Engineering & Equipment Group Company Ltd., Jinan Shandong

³State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: 869690699@qq.com

Received: Sep. 26th, 2019; accepted: Oct. 8th, 2019; published: Oct. 15th, 2019

Abstract

The special use condition of the shore power cable is likely to cause cracking air gap in cable insulation then cause air gap discharge. Continuous air gap discharge will cause local temperature to rise, which will affect the current carrying capacity of shore power cable. In this paper, the multi-physics coupling analysis method is used to establish the air gap defect model of shore power cable. The influence of different air gap discharge power on the temperature distribution of the shore power cable is studied, and the current carrying capacity of the shore power cable under different air gap discharge power is calculated. The results show that the temperature distribution of the cable is quadratic with the load current and linear with the air gap power. With the increase of air gap discharge power, the defect phase ampacity decreases rapidly, while the non-defect phase ampacity decreases slowly and then sharply. As the air gap discharge power increases, the rated current of the defect phase decreases rapidly, the non-defect phase drops slowly and then drops rapidly. The research results of this paper can provide reference for the defect detection of shore power cable and the control of load current.

Keywords

Shore Power Cable, Air Gap Discharge, Equivalent Heat Source, Finite Element Method, Rated Current

岸电电缆绝缘气隙热源等效模型及载流量的影响研究

周波达¹, 梁军令², 柯定芳¹, 刘恒³, 朱承志¹, 吉振伟²

¹国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州

²山东电工电气集团有限公司, 山东 济南

³重庆大学输配电装备系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆

Email: 869690699@qq.com

收稿日期: 2019年9月26日; 录用日期: 2019年10月8日; 发布日期: 2019年10月15日

摘要

岸电电缆的特殊使用工况容易导致电缆绝缘产生裂纹气隙而引起气隙放电, 持续的气隙放电会导致局部温升, 进而影响岸电电缆载流量。本文采用多物理场耦合分析方法, 建立基于椭球体热源等效的岸电电缆气隙缺陷模型, 研究不同气隙放电功率对岸电电缆温度分布的影响, 并计算不同气隙放电功率下岸电电缆的载流量。结果表明: 电缆温度分布与负荷电流呈二次函数关系, 与气隙放电功率呈线性关系; 缺陷相温度较非缺陷相温度高, 但温度变化率相同; 随着气隙放电功率增加, 缺陷相载流量迅速下降, 而非缺陷相载流量下降先缓后急。该论文的研究成果可为岸电电缆缺陷检测以及负荷电流的控制提供参考。

关键词

岸电电缆, 气隙放电, 热源等效, 有限元, 载流量

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

近年来, 岸电输电技术被认为是减少船舶排污的重要技术[1], 而岸电电缆又是岸电输电系统中最薄弱的环节之一[2]。岸电电缆由于其制作工艺和运行工况比较复杂, 绝缘内部存在裂纹气隙的概率相对较大, 裂纹气隙会导致电场畸变, 引起气隙放电, 气隙放电的热效应将影响岸电电缆的载流量。

针对绝缘气隙放电, 许多学者作了大量的研究, 从低能量的局部放电到高能量的电弧放电均有研究。文献[3]研究了不同气体或不同气体的混合物中局部电流脉冲波形和气体击穿的物理机理关系。文献[4]提出了一种测量局部放电损耗电流的方法, 研究了气隙放电在不同电压下在一个周期内损耗电流的变化规律, 表明损耗电流可以达到微安级。文献[5]建立了气隙放电等离子体化学模型, 研究了不同气隙长度下放电的相频和幅频特性, 以此来评价电缆接头气隙放电老化程度。文献[6]研究了不同放电条件下火花放电的伏安特性, 并采用积分法对火花放电能量进行了量化。气隙的放电功率一般可通过研究气隙放电的伏-安特性曲线获取, 而裂纹气隙的放电功率可利用介质阻挡放电的伏-安特性计算得到[7]。文献[8]基于电缆接头, 将了气隙电弧放电热源等效为椭球体, 并研究了其热源等效计算模型。

上述文献通常仅从气隙放电的击穿特性、放电频率、放电电流波形、放电伏安特性和放电能等方面着手研究气隙放电特性, 为的是寻找气隙放电检测(或者说绝缘)方法。但几乎没有文献研究气隙放与载流量之间的关系。值得庆幸的是, 已有相关文献在气隙放电伏安特性方面做了大量研究[9] [10] [11], 为计算不同放电阶段的放电功率奠定了基础, 进而可研究不同放电阶段的温度分布, 从而通过温度分布计算

电缆载流量。数值计算方法开始成为电缆载流量计算的主流，主要包含了有限差分法、边界元法和有限元法[12]。文献[13]基于多物理场有限元模型计算了直埋和铺设的直流海底电缆不同载流量下的温度分布。因此采用有限元计算方法可有效计算岸电电缆载流。

由于实验室条件以及电缆绝缘气隙放电难以测量，本文基于多物理场耦合仿真模型及气隙放电热等效模型，首先研究岸电电缆在不同负荷电流和气隙放电能下的温度分布；其次通过函数拟合方法，得到岸电电缆导体温度与负荷电流和放电功率的函数关系；最后通过目标优化算法得到岸电电缆载流量与气隙放电功率的关系。

2. 岸电电缆气隙缺陷模型

2.1. 物理模型

本文的研究对象为 $3 \times 150 \text{ mm}^2$ 的三芯岸电电缆，其结构如图 1 所示。导体和金属屏蔽均为铜，绝缘层为乙丙橡胶(EPR)，金属屏蔽层和绝缘屏蔽层均为添加炭黑的半导体材料，填充层为聚丙烯(PP)，绕包带为聚氯乙烯(PVC)，外护套为聚氨酯(TPU)。其材料参数如表 1 所示，特别地，半导体层的相对介电常数设为 100，其余属性与 PVC 材料相同。

由于岸电电缆弯曲是，最容易产生裂纹之处在绝缘外侧，为了研究岸电电缆气隙放电时的热特性，将气隙缺陷设置在 B 相绝缘的外侧，并用椭球热源等效其放电产生的热能。图 2 为单相电缆及缺陷等效模型， a 、 b 、 c 为等效椭球体的作用参数， d 为气隙长度， $d = 2b$ 。

2.2. 数学模型

1) 温度场计算模型

根据傅里叶传热定律和能量守恒定律，可以得到岸电电缆温度场问题的控制方程，在直角坐标系中可写成：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + q_v \quad (1)$$

式中， ρ 为物质密度， c 为比热容， T 为温度， λ 为导热系数， q_v 为单位体积产生的热源，等于电缆导体、金属屏蔽层和气隙放电产生的热源。稳态计算时，等式左边温度对时间的偏导数等于零。

2) 电缆本体热损耗计算

采用涡流求解方法对电缆电磁场进行求解，磁矢位和电位的控制方程为：

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \dot{\mathbf{A}} = (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) (-j\omega \dot{\mathbf{A}} - \nabla \dot{\phi}) \quad (2)$$

式中， $\dot{\mathbf{A}}$ 为磁矢位， $\dot{\phi}$ 为电位， ω 为角频率， ε_0 为真空的介电常数， ε_r 为相对介电常数， μ_0 为真空的磁导率， μ_r 为相对磁导率。电流密度为：

$$\dot{\mathbf{J}} = (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) (-j\omega \dot{\mathbf{A}} - \nabla \dot{\phi}) \quad (3)$$

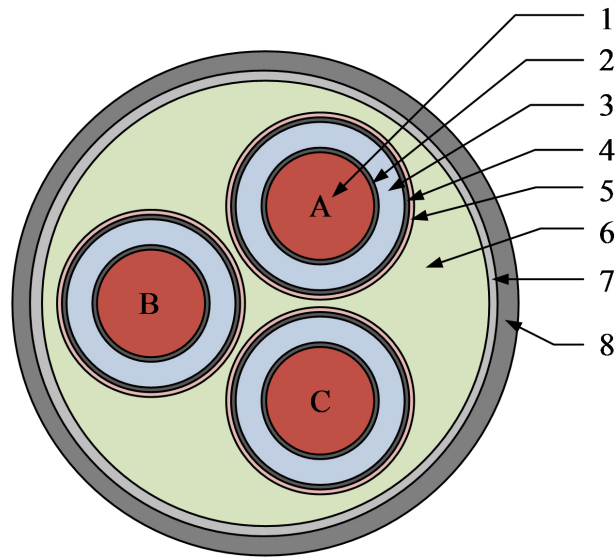
引入洛伦兹规范

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} + j\omega \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \dot{\phi} = 0 \quad (4)$$

由式(2)~(4)可求出磁矢位 $\dot{\mathbf{A}}$ 和电磁损耗

$$q_1 = \frac{1}{2} \int_V \frac{\dot{\mathbf{J}} \cdot \dot{\mathbf{J}}^*}{\gamma} dV \quad (5)$$

由于金属的电导率是温度的函数[14]，当前温度下的电导率为：



1 导体(CO); 2 导体屏蔽(CS); 3 绝缘体(IN); 4 绝缘屏蔽(IS); 5 金属屏蔽(MS); 6 填充体(FI); 7 内护套(IS); 8 外护套(OS)

Figure 1. 10 kV three-core shore cable structure diagram

图 1. 10 kV 三芯岸电电缆结构简图

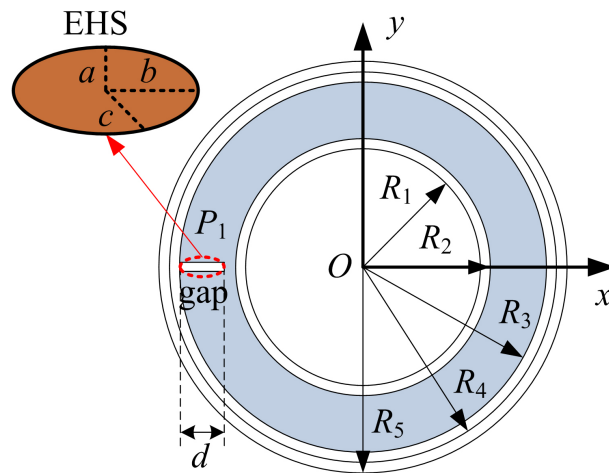


Figure 2. Shoreline cable air gap model

图 2. 岸电电缆气隙模型

Table 1. Shore cable material properties

表 1. 岸电电缆材料属性

材料	铜	EPR	PVC	TPU	PP
相对介电常数	1000	2.4	2.25	3.6	2.22
比热容 J/(kg·K)	381	2300	1005	2100	1883
热导率 W/(m·K)	387.6	0.4	0.14	0.25	0.22
热膨胀系数	1.77e-5	8.8e-4	2.3e-4	1.8e-4	1.72e-4

$$\gamma = \frac{\gamma_{ref}}{1 + \beta(T - T_{ref})} \quad (6)$$

式中, γ_{ref} 是参考温度 T_{ref} 下的电导率, T 当前时刻的温度, β 电导温度系数, 导体和金属屏蔽层取 0.00395。

3) 气隙损耗计算

将气隙设置在 B 相的外侧(P_1)和内侧(P_2), 气隙长度为 d , 为了计算电缆温度分布, 将气隙等效为一椭球体, 如图 2 所示。对于椭球体等效热源(EHS), 其热流密度可以表示成:

$$q_e(x, y, z) = q_{em} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (7)$$

式中, q_e 是气隙热源(x, y, z)处热流密度, q_{em} 是热源中心最大热流密度值, 气隙放电总的热能为:

$$P_2 = 8 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty q_e(x, y, z) dx dy dz = q_{em} \frac{abc\pi\sqrt{\pi}}{3\sqrt{3}} \quad (8)$$

则有:

$$q_{em} = \frac{3\sqrt{3}P_2}{\pi\sqrt{\pi}abc} \quad (9)$$

由于气隙放电产生的热为焦耳热, 由电源功率确定, 气隙放电的热量可表示为:

$$P_2 = U_g I_g \quad (10)$$

式中, U_g 为气隙电压, I_g 为气隙放电电流。

等效热源参数 a 、 b 、 c 可通过磁流体模型等效热源确定, 放电功率可由 U_g 和 I_g 确定, 主要计算见文献[8]。

因此, 存在绝缘裂纹的情况下, 岸电电缆的热源包括电缆本体和气隙放电两部分

$$q_v = q_1 + q_2 \quad (11)$$

2.3. 边界条件

对电缆三相施加正弦交流电流, 有效值为 I_0 , 相位相差 120° 。由于离电缆表面 0.5 m 处磁矢量快速衰减为零, 边界条件为:

$$A|_S = 0 \quad (12)$$

式中, S 为距电缆表面 0.5 m 处的圆柱面。

岸电电缆温度边界条件主要包括对流和辐射边界条件, 即:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_S = h(T_S - T_f) \quad (13)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_S = \xi b(T_S^4 - T_f^4) \quad (14)$$

其中, h 为对流散热系数, ξ 为发射率, b 为玻尔兹曼常数, T_S 为表面温度, T_f 为环境温度。

3. 结果分析

3.1. 岸电电缆气隙放电下的温度分布

基于上述模型, 对岸电电缆进行电热耦合仿真。设环境温度为 20°C , 电缆表面发射系数和对流散热系数分别为 0.93 和 $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 电流为 345A。仿真结果如图 3 和图 4 所示, 图 3 为正常状态下岸电电缆温度分布云图, 导体最大温度为 59.02°C , 图 4 为缺陷状态下岸电电缆的温度分布云图, 导体最大温度

为 77.22°C 。通常情况下,当电缆处于静止环境中,且周围环境温度为 40°C 时,通入额定电流(345A)时,导体温度达到 95°C 。若将环境温度设为 40°C ,将对流散热系数设为 $2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,可得到电缆导体最大温度为 93.73°C ,与实际值很接近,因此可认为仿真结果正确。

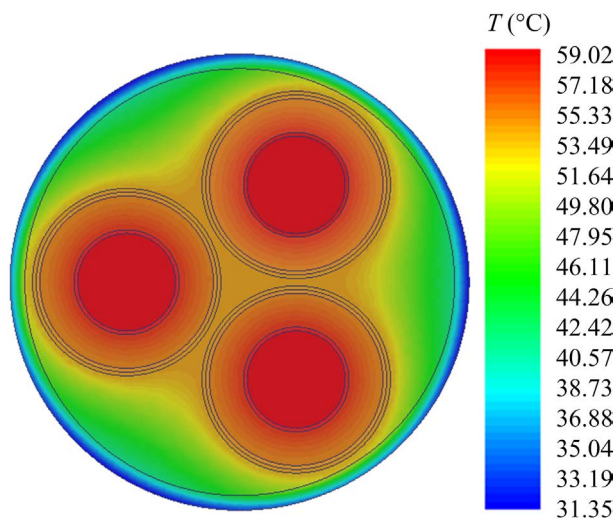


Figure 3. Normal cable temperature distribution cloud map
图 3. 正常电缆温度分布云图

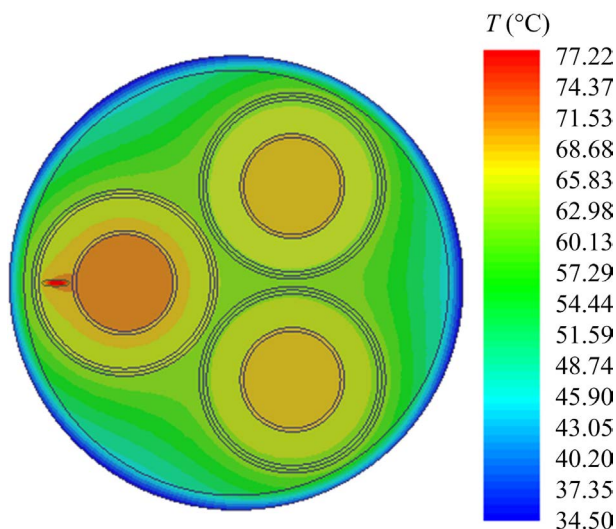


Figure 4. Defect cable temperature distribution cloud map
图 4. 缺陷电缆温度分布云图

为研究气隙放电对电缆载流量的影响,通过参数扫描法,对电缆负荷电流和气隙放电功率进行参数扫描,计算气隙放电情况下岸电电缆各导体的温度分布情况。设气隙缺陷位置于 P_1 处,也就是电缆 B 相的外侧,其仿真结果如图 5 和图 6 所示。图 5 为 B 相导体温度随气隙放电功率的变化规律,图 6 为 A 相导体温度随气隙放电功率的变化规律。从图中可看出,缺陷相的温度比非缺陷相的温度大,但温度变化率相同。

3.2. 气隙放电对岸电电缆载流量的影响

由于 EPR 可承受的最大温度为 95°C ,当导体温度达到 95°C 时的电流则为岸电电缆的载流量。通过函数拟合方法可获得岸电电缆 B 相和 A 相导体温度函数。

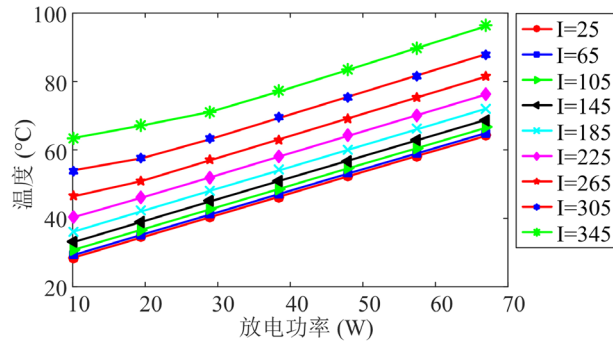


Figure 5. B phase temperature distribution curve of shore power cable

图 5. 岸电电缆 B 相温度分布曲线

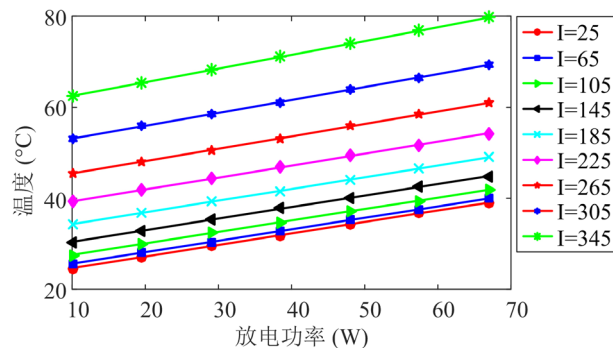


Figure 6. Shoreline cable A phase temperature distribution curve

图 6. 岸电电缆 A 相温度分布曲线

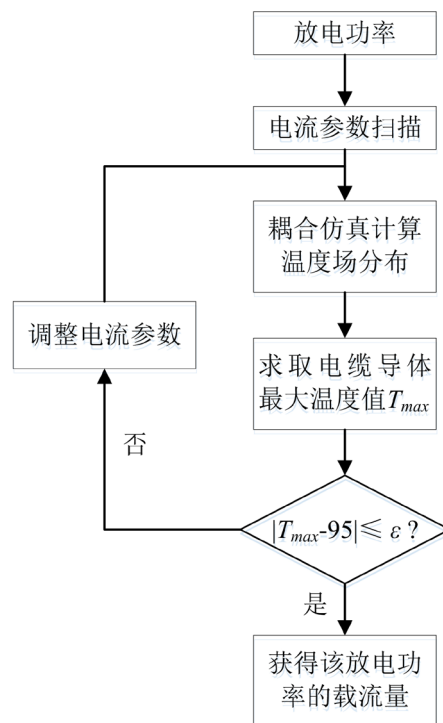


Figure 7. Flow chart calculation flowchart

图 7. 载流量计算流程图

$$T_1(I_d) = c_1 I_d^2 + c_2 I_d + c_3 \quad (15)$$

$$T_b(P_2) = k_1 P_2 + T_1(I_d) \quad (16)$$

$$T_a(P_2) = k_2 P_2 + T_1(I_d) \quad (17)$$

式中, $T_1(I_d)$ 为非缺陷状态下负荷电流的温度函数, $T_b(P_2)$ 为缺陷状态下负荷电流和放电功率的 B 相温度函数, $T_a(P_2)$ 为缺陷状态下负荷电流和放电功率的 A 相温度函数, c_1 、 c_2 、 c_3 、 k_1 和 k_2 为函数的相关系数。式(15)~(16)中, I_d 和 P_2 必须大于等于零。

为了计算不同放电功率下缺陷相和非缺陷相的载流量, 采用目标优化方法计算电缆载流量。设置电缆温度 95°C 为约束条件, 优化目标为载流量 I_d , 可计算出不同放电功率下电缆的载流量。计算流程如图 7 所示, 计算结果如图 8 所示。对与缺陷相来说, 其载流量随放电功率快速下降, 而非缺陷相载流量下降相对缓慢。也就是说, 当电缆其中一相发生气隙放电时, 另外两相仍然可以在低负荷状态下运行。

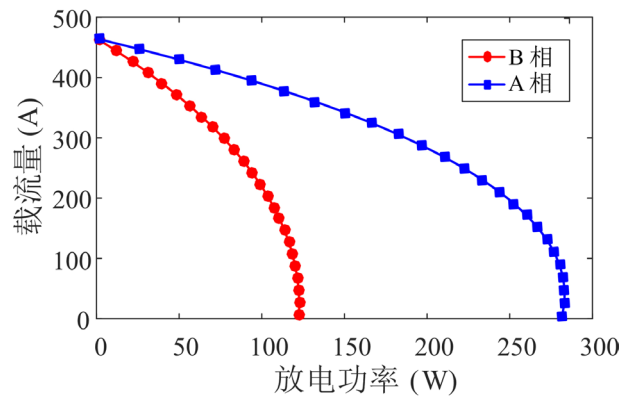


Figure 8. Current carrying capacity of different air gap discharge power

图 8. 不同气隙放电功率的载流量

4. 结论

本文建立了岸电电缆气隙缺陷热等效模型, 研究岸电电缆温度分布规律, 并通过函数拟合方法, 计算得到气隙放电功率对岸电电缆载流量的影响。得到如下结论:

- 1) 缺陷相温度比非缺陷相温度高, 但是其温度变化率相同。
- 2) 分别对非缺陷电缆和缺陷电缆进行耦合仿真, 发现电缆温度分布与负荷电流呈二次函数关系, 与气隙功率呈线性关系。
- 3) 随着气隙放电功率增加, 缺陷相载流量迅速下降, 而非缺陷相载流量下降先缓后急。这对其中一相发生故障后, 另两相继续工作的负荷控制具有重要意义。

基金项目

本文研究内容来源于国网浙江电力有限公司技术项目(船舶岸电电缆关键技术研究与应用, 52110118000U), 在此向该公司及工作人员表示感谢。

参考文献

- [1] Burgel, A.P. (2007) Air Pollution from Ships: Recent Developments. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 6, 217-224. <https://doi.org/10.1007/BF03195116>
- [2] Cuculic, A., Vucetic, D. and Tomas, V. (2011) High Voltage Shore Connection. *53rd International Symposium ELMAR*,

Zadar, 14-16 September 2011, 257-259.

- [3] Okubo, H., Hayakawa, N. and Matsushita, A. (2002) The Relationship between Partial Discharge Current Pulse Waveforms and Physical Mechanisms. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **18**, 38-45.
<https://doi.org/10.1109/MEI.2002.1014966>
- [4] Xu, X., Bengtsson, T., Hammarstrom, T., Blennow, J. and Gubanski, S.M. (2015) Loss Current Studies of Partial Discharge Activity. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **22**, 472-481.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.004581>
- [5] 杨帆, 杨旗, 程鹏, 等. 电缆接头内部气隙放电缺陷下的绝缘劣化程度表征方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 24-32.
- [6] 刘庆明, 汪建平, 李磊, 张云明, 宇灿. 电火花放电能量及其损耗的计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1255-1260.
- [7] Alisoy, H.Z., Yeroglu, C., Koseoglu, M. and Hansu, F. (2005) Investigation of the Characteristics of Dielectric Barrier Discharge in the Transition Region. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **38**, 4272-4277.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/24/002>
- [8] Liu, K., Yang, F., Wang, S., Gao, B. and Xu, C. (2018) The Research on the Heat Source Characteristics and the Equivalent Heat Source of the Arc in Gaps. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **124**, 177-189.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.048>
- [9] 郝艳捧, 涂恩来, 阳林, 戴栋. 基于气隙伏安特性研究大气压氦气辉光放电的模式和机理[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 24-30.
- [10] 付洋洋, 罗海云, 邹晓兵, 王强, 王新新. 棒-板电极下缩比气隙辉光放电相似性的仿真研究[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 095206.
- [11] 潘俊, 方志. 多脉冲均匀介质阻挡放电特性的仿真及实验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1132-1140.
- [12] 刘晓妍. 电力电缆载流量计算方法的研究[J]. 电子测试, 2017(8): 35-36.
- [13] 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.
- [14] Del Pino Lopez, J.C. and Cruz Romero, P. (2011) Influence of Different Types of Magnetic Shields on the Thermal Behavior and Ampacity of Underground Power Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **26**, 2659-2667.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2158593>