

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.08.024

绝缘料电阻率对直流电缆电场分布影响及其调控

周 焱¹, 刘继平², 赵孝磊¹, 房晟辰², 何金良¹

(1. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 2. 国网天津电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

摘要: 直流电缆在运行过程中, 由于绝缘层中温度梯度的存在和绝缘料电阻率负温度系数特性会造成绝缘层中电场分布反转, 从而增加直流电缆绝缘结构设计的困难。基于100 kV直流电缆结构参数并结合理论推导, 采用仿真模拟分析了绝缘层温差、绝缘料电阻率温度系数和电场强度系数对直流电缆电场分布的影响。提出了基于纳米复合技术的直流电缆绝缘料电阻率温度系数调控方法。结果表明, 降低绝缘料电阻率温度系数能够有效抑制直流电缆绝缘层中的电场分布反转, 并降低直流电缆正常运行时的最大场强; 通过纳米复合技术在纳米颗粒与绝缘基体的界面区引入深陷阱能有效抑制高温下绝缘料电阻率的下降, 从而降低其电阻率温度系数。

关键词: 直流电缆; 电场分布; 电阻率温度系数; 纳米复合技术

Influence and Regulation of Insulation Material Resistivity on DC Cable Electric Field Distribution

ZHOU Yao¹, LIU Jiping², ZHAO Xiaolei¹, FANG Shengchen², HE Jinliang¹

(1. State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Tianjin Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China)

Abstract: During the operation of DC cables, the electric field would be reversed due to the temperature gradient in the insulation layer and the negative temperature coefficient of resistivity of the insulation material, which arises the difficulties in the insulation structure design of DC cables. Based on the structural parameters of 100 kV DC cables and the theoretical analysis, the effect of temperature gradient, the temperature coefficient and electric field coefficient of resistivity on the electric field distribution is analyzed by computational simulation. A method based on nanocomposites technology to control the temperature coefficient of resistivity is proposed. The results show that reducing the temperature coefficient of resistivity of insulation material can effectively suppress the electric field reversal in DC cable insulation layer and reduce the maximum electric field during the operation of DC cables. The introduction of deep traps at the interfaces of nanoparticles and insulation matrix by nanocomposites technology can effectively suppress the decrease of resistivity of the insulation material at high temperature, thereby reducing its temperature coefficient of resistivity.

Key words: DC cables; electric field distribution; temperature coefficient of resistivity; nanocomposites technology

0 引言

高压直流输电系统具有传输容量大、线路损耗小、运行稳定性高、安全风险小的优点, 因此直流输

电技术在未来远距离、大容量输电和分布式能源送出方面将被广泛采用^[1-4]。随着能源互联网的建设, 以特高压输电系统为核心的能源输送通道建设也将广泛采用直流输电技术^[5]。在一些特殊场合, 例

收稿日期: 2020-03-19; 修回日期: 2020-05-27

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGTJDK00PJJ1600017)。

Project Supported by Science and Technology Projects of Sate Grid Corporation (SGTJDK00PJJ1600017).

如长距离的跨海输电和远海风电的送出,直流电缆输电几乎成为唯一选择。以交联聚乙烯为代表的聚合物绝缘电缆以其制造工艺简单、运行维护成本低、运行温度高、无漏油风险等特点已经成为高压电缆的主流发展方向^[6-7]。随着直流输电技术的进一步发展,高压直流电缆也将面临工作温度和运行电压的进一步提高。因此直流电缆的电场分布控制将成为直流电缆结构设计和运行维护的关键问题。

在稳态运行下,交流电缆绝缘层内的电场分布取决于介电常数的分布。由于绝缘材料的介电常数随温度变化并不明显,因此可以认为交流电缆在正常工作温度范围内,绝缘层的电场分布并不会发生变化^[8]。但是对于直流电缆,其稳态运行时的绝缘层中的电场分布取决于电阻率分布。由于聚合物绝缘材料的电阻率随温度和电场强度的变化比较敏感,因此研究直流电缆绝缘层中电场分布时必须考虑绝缘料的电阻率随温度和电场强度变化的影响^[9]。在新型直流电缆绝缘材料的研发过程中也要重视绝缘料电阻率温度系数的调控^[10-12]。

文中以理论推导为基础,通过仿真模拟分析了直流电缆绝缘层内外温差、绝缘料电阻率温度系数和绝缘料电阻率电场强度系数对直流电缆稳态电场分布的影响。同时基于纳米复合技术对新型聚丙烯直流电缆绝缘料的电阻率温度特性进行了调控,并通过仿真分析验证了该调控方法的有效性。

1 直流电缆稳态电场分布理论分析

目前针对聚合物绝缘材料的相关研究表明,聚合物的体积电阻率随温度和电场强度的变化符合以下关系^[13]

$$\rho(T, E) = \rho_0 \exp[-a(T - T_0) - b(E - E_0)] \quad (1)$$

式(1)中: $\rho(T, E)$ 为温度 T 和电场强度 E 下的体积电阻率; ρ_0 为参考温度 T_0 和参考电场强度 E_0 下的体积电阻率; a 为电阻率温度系数; b 为电阻率电场强度系数。

直流电缆在运行中芯线会不断发热,从而会在绝缘层中形成一定的温度梯度分布^[14]。由于电阻率温度系数和电场强度系数的存在会使得直流电缆绝缘层中的电阻率呈现出空间分布的特征。而直流电缆绝缘层中的电场分布又决定于电阻率的分布。因此,绝缘层中的温度梯度会改变绝缘层中的电场分布。根据热力学理论,轴对称结构的直流电缆在运行中由于芯线发热在绝缘层中形成的温度梯度分布为^[15]

$$T(r) = T(r_0) + \frac{W_c}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (2)$$

式(2)中: $T(r)$ 为绝缘层中半径 r 处的温度; $T(r_0)$ 为绝缘层外径 r_0 处的温度; W_c 为芯线发热功率; λ 为绝缘层热导率。

根据式(1)、(2)和麦克斯韦方程组可得,稳态下轴对称结构的直流电缆绝缘层中的电场分布满足^[15]

$$\ln\left[E(r) \frac{2\pi r}{l\rho_0}\right] = -aT(r_0) - \ln\left(\frac{r_0}{r}\right)^A - bE(r) \quad (3)$$

式(3)中: $E(r)$ 为绝缘层中半径 r 处的电场强度。

$$A = \frac{aW_c}{2\pi\lambda} = \frac{a\Delta T}{\ln(r_0/r_i)} \quad (4)$$

式(4)中: ΔT 为绝缘内外径温差; r_i 为绝缘层内径。

显然,根据式(3)难以理论求解得到电场分布的显式表达式,只能通过相关的数值计算方法得到其数值解。文[15]提出了一种近似处理方法,可得到轴对称结构的直流电缆绝缘层中电场分布的近似表达式为

$$E(r) = \frac{\delta U_0 (r/r_0)^{\delta-1}}{r_0 [1 - (r_i/r_0)^\delta]} \quad (5)$$

式(5)中

$$\delta = \frac{\frac{a\Delta T}{\ln(r_0/r_i)} + b \frac{U_0}{r_0 - r_i}}{1 + b \frac{U_0}{r_0 - r_i}} \quad (6)$$

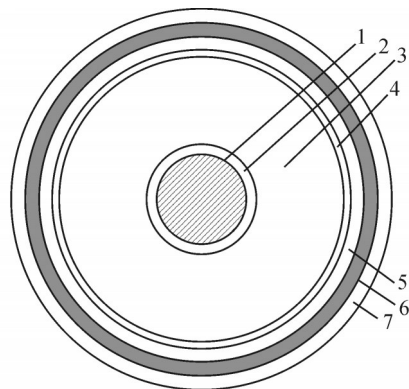
式(6)中, U_0 为直流电缆的额定电压。

直流电缆绝缘层中的电场分布不依赖于绝缘层中各点温度的绝对值,而只取决于绝缘层内外之间的温度差。由于绝缘层内靠近芯线处温度较高,聚合物的负电阻率温度系数特性使得该区域电阻率较低,从而导致导体屏蔽附近绝缘层中的电场强度减小而绝缘屏蔽附近绝缘层中的电场强度增加,最终可能使得绝缘层中最大场强位置由空载下的绝缘层内侧迁移到正常运行下的绝缘层外侧。

2 直流电缆稳态电场分布仿真分析

2.1 仿真模型

文中采用的100 kV直流电缆绝缘结构示意图见图1,各部分结构参数见表1。按照绝缘料耐温等级,选定芯线最高运行温度为90℃。绝缘层热导率根据实测值取0.28 W/mK。通过热场和电场耦合仿真对不同条件下的电场分布进行了分析。



1—线芯; 2—导体屏蔽; 3—绝缘; 4—绝缘屏蔽;
5—缓冲阻水带; 6—铅护套; 7—外护套。

图1 100 kV 直流电缆结构示意图

Fig. 1 Diagram of 100 kV DC cable structure

表1 100 kV 直流电缆结构参数

Table 1 Structural parameters of 100 kV DC cable

结构	厚度/mm	外径/mm
导体	—	16.1
导体屏蔽	1.2	18.5
绝缘	9.0	36.5
绝缘屏蔽	1.5	39.5
缓冲阻水带	1.0	41.5
铅护套	1.5	44.5
外护套	2.7	49.9

2.2 温度梯度对电场分布的影响

直流电缆运行过程中由于芯线发热,在绝缘层中会存在一定的温度梯度。电缆载流量越大,芯线发热越严重,绝缘层中的温度梯度也就越大。根据图1给出的电缆绝缘结构,在仿真软件中建立了相应的仿真模型对直流电缆绝缘层中的电场分布进行了仿真分析。在不同温度梯度下,直流电缆绝缘层中的径向电场分布的仿真结果见图2。仿真结果表明,空载条件下,直流电缆绝缘层中的电场最大处出现在绝缘层内侧。而随着负载增加,电缆芯线发热增加导致绝缘层内外两侧出现温度差,进而使得电阻率空间分布不均,最终绝缘层中的最大场强位置由绝缘层内侧转移到绝缘层外侧,形成所谓的电场分布反转现象。芯线发热功率越大,绝缘材料的热导率越小,则绝缘层的内外温差越大,电场分布越不均匀。因此,增加绝缘层的热导率,有利于抑制由于芯线发热造成的直流电缆电场空间分布的反转问题。

2.3 电阻率温度系数对电场分布的影响

不同电阻率温度系数对直流电缆绝缘层中电场分布影响的仿真结果见图3。随着电阻率温度系数的增加,直流电缆绝缘层中的电场强度分布越来越不均匀,内侧电场不断减小,而外侧电场不断增加,这也与理论分析结果相一致。随着电阻率温度

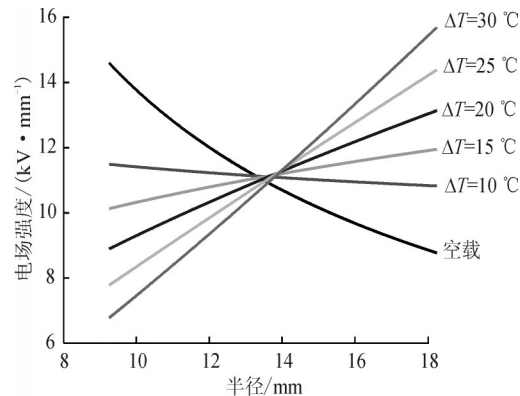


图2 不同绝缘层温度梯度下直流电缆电场分布

Fig. 2 Electric field distribution in the insulation layer of DC cables under different temperature gradient

系数的增加,也就是电阻率随温度变化更加明显,从而在相同的绝缘层温度空间分布下,电阻率的空间分布更加不均匀。绝缘层内侧电阻率进一步减小,外侧电阻率持续增加,而直流电缆电场分布取决于电阻率空间分布,最终使得绝缘层内侧电场强度持续减小,外侧电场持续增加。因此,降低绝缘料的电阻率温度系数有利于抑制由于电阻率随温度变化过大造成的直流电缆绝缘层中的电场分布不均问题。

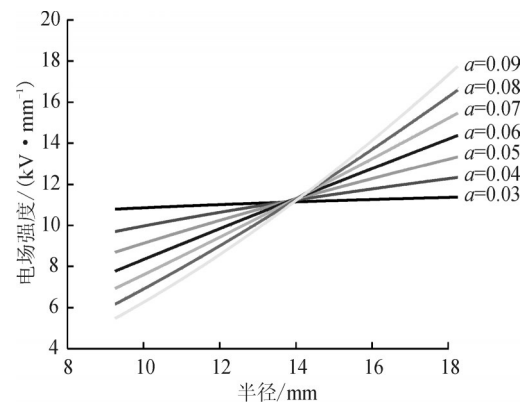


图3 不同电阻率温度系数下直流电缆电场分布

Fig. 3 Electric field distribution in DC cables under different temperature coefficient of resistivity of the insulation layer

2.4 电阻率电场强度系数对电场分布的影响

不同电阻率电场强度系数对直流电缆绝缘层中电场分布影响的仿真结果见图4。随着电阻率电场强度系数的增加,直流电缆绝缘层中的电场强度分布趋于均匀,内侧电场增加,而外侧电场减小,这也与理论分析结果相一致。随着电阻率电场强度系数的增加,也就是电阻率随电场强度变化更加明显,从而部分抵消了由于温度梯度造成的电阻率空间分布不均。电阻率电场强度系数的增加,使得绝缘层内侧低电场处的电阻率降低幅度较小,而绝缘

层外侧高电场处的电阻率降低幅度较大,从而在一定程度上缓解了绝缘层中电阻率的空间分布不均。但需要注意的是,聚合物绝缘的电阻率电场强度系数一般都比较小,因此电阻率电场强度系数的影响远小于温度系数的影响,即电场强度系数增加所带来的抵消作用非常有限。

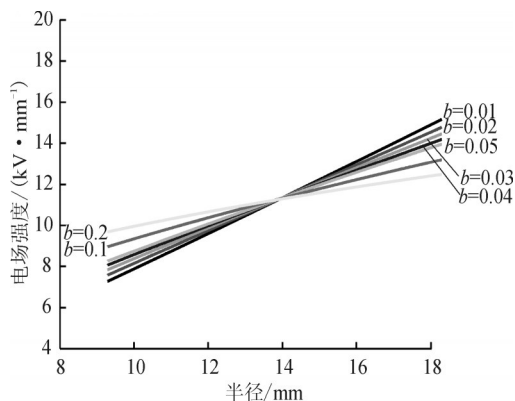


图4 不同电阻率电场强度系数下直流电缆电场分布

Fig. 4 Electric field distribution in DC cables under different electric field coefficient of resistivity of the insulation layer

3 基于纳米复合的绝缘材料电阻率调控方法

纳米电介质的研究已经成为电介质和电气绝缘领域研究的重点和热点,通过在聚合物基体中引入不同类型的纳米颗粒可以有效改善基体材料的电特性、热特性和机械特性,从而开发出具有特定功能的电介质材料(如高热导率、高击穿场强、高介电常数等)^[16-20]。研究表明,纳米颗粒的引入会改变聚合物原有的陷阱特性,从而改变其载流子输运过程,最终引起材料电阻率的变化^[21-22]。根据前期对添加不同种类纳米颗粒的聚丙烯纳米复合电介质电气性能的研究,纳米氧化镁颗粒能够明显提高聚丙烯的直流击穿强度和体积电阻率,并且能够抑制空间电荷积聚^[21, 23-24]。因此文中在新型环保型直流电缆绝缘材料聚丙烯(PP)中通过熔融共混法加入了3 wt%质量分数的经硅烷偶联剂表面处理的纳米氧化镁颗粒制备了纳米氧化镁/聚丙烯(MgO/PP)纳米复合材料,并测试了其在不同温度和电场强度下的体积电阻率以及电荷陷阱特性^[11]。

体积电阻率测量采用温度可控的三电极测试系统进行,测试前先将试样短路然后从5 kV/mm逐级加压至25 kV/mm,测量不同电场强度下的泄漏电流,每个电场强度下测试时间为10 min,以10 min时的泄漏电流计算得到试样的体积电阻率,测试温度分别为30、50、70、90℃,控温精度为±1℃。PP和MgO/PP在30~90℃温度范围和5~25 kV/mm电场

强度范围内的电阻率变化曲线见图5。从图5可以看到,加入纳米氧化镁可以有效提高聚丙烯在高温下的体积电阻率,从而抑制聚丙烯体积电阻率随温度的变化,降低其电阻率温度系数。通过拟合可以得到PP的电阻率温度系数为0.081, MgO/PP的电阻率温度系数为0.049,可见添加纳米颗粒可以有效降低聚丙烯的电阻率温度系数。通过拟合还可以进一步得到PP的电阻率电场强度系数为0.027, MgO/PP的电阻率电场强度系数为0.020。

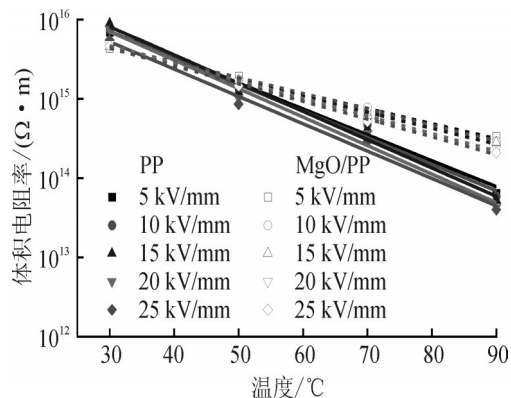


图5 MgO/PP纳米复合材料体积电阻率的温度特性

Fig. 5 Temperature dependent DC volume resistivity of MgO/PP nanocomposites

为了说明纳米调控影响聚丙烯体积电阻率温度特性的机制,对MgO/PP纳米复合材料进行了热刺激电流测试。测试时样品首先在20℃和10 kV/mm直流电场下极化30 min,然后维持极化电压并迅速降温至-100℃,之后再撤去极化电压将样品短路5 min以消除界面电荷和未冻结的陷阱电荷。然后以3℃/min的升温速度从-100℃升温至100℃,测量升温过程中由陷阱电荷脱陷而产生的热刺激电流。图6给出了通过热刺激电流测试得到的PP和MgO/PP纳米复合材料的陷阱能级和密度分布见图6。从图6可以看到,纳米MgO颗粒的添加使得PP中陷阱能级约为0.86 eV的陷阱密度明显增加。深陷阱的引入能够捕获载流子,降低载流子迁移率,抑制高温下的电阻率降低,从而使得MgO/PP的电阻率随温度变化不明显,即降低了材料的电阻率温度系数。

为了进一步说明降低电阻率温度系数对控制直流电缆电场分布的意义,根据上述PP和MgO/PP的电阻率测试参数,分别对采用这两种材料的直流电缆的稳态电场分布进行了仿真分析。仿真模型参数设置如前文所述,分别考虑土壤和空气两种敷设条件,仿真结果见图7。对于PP绝缘层,在空气敷设条件下的最大场强为16.4 kV/mm,在土壤敷设条件下的最大场强为14.1 kV/mm。而对于MgO/PP,

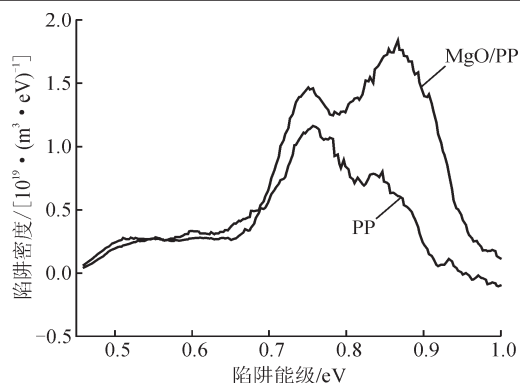


图6 MgO/PP纳米复合材料电荷陷阱能级分布

Fig. 6 Trap level distribution in MgO/PP nanocomposites

在空气敷设条件下的最大场强为 13.3 kV/mm, 在土壤敷设条件下的最大场强为 11.9 kV/mm。可见, 降低绝缘料的电阻率温度系数能够有效降低直流电缆稳态运行时的最大电场强度并使其电场分布更加均匀。

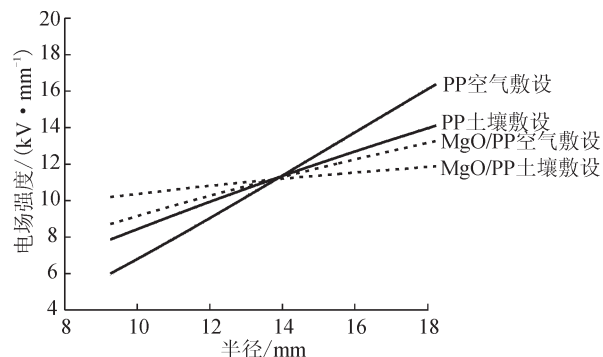


图7 PP和MgO/PP直流电缆绝缘层的电场分布

Fig. 7 Electric field distribution in DC cables with PP and MgO/PP nanocomposites insulation material

4 结语

文中研究了直流电缆在稳态运行下的电场分布, 重点考虑了由电缆芯线发热造成的绝缘层温度梯度和绝缘材料电阻率温度系数和电场强度系数对直流电缆绝缘层中电场分布的影响。结合理论推导, 通过仿真计算分析了绝缘层内外温差、绝缘材料电阻率温度系数、绝缘材料电阻率电场强度系数对直流电缆电场分布的影响。提出了基于纳米复合的聚合物电阻率温度系数调控方法, 并对调控结果进行了仿真验证。由于聚合物绝缘材料的负电阻率温度系数, 直流电缆电场分布与绝缘层内外温差有重要关系。空载条件下, 绝缘层中最大场强处出现在绝缘层内侧, 而随着负载增加, 最大场强处会迁移到绝缘层外侧。降低直流电缆绝缘材料的电阻率温度系数能够抑制稳态运行下的电场分布反转和电场分布不均。增加电阻率的电场强度

系数能够在一定程度上抵消电阻率温度系数造成的电场分布不均。在聚合物中加入纳米颗粒能够引入能级较高的深陷阱, 从而捕获载流子, 降低载流子迁移率, 提高材料在高温下的体积电阻率, 降低材料的电阻率温度系数。

参考文献:

- [1] 何金良, 党 斌, 周 垚, 等. 挤压型高压直流电缆研究进展及关键技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1417-1429.
HE Jinliang, DANG Bin, ZHOU Yao, et al. Reviews on research progress and key technology in extruded cables for HVDC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1417-1429.
- [2] 杜伯学, 李忠磊, 杨卓然, 等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 344-354.
DU Boxue, LI Zhonglei, YANG Zhuoran, et al. Application and research progress of HVDC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 344-354.
- [3] 陈铮铮, 赵 鹏, 赵健康, 等. 国内外直流电缆输电发展与展望[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 487-495.
CHEN Zhengzheng, ZHAO Peng, ZHAO Jiankang, et al. Review and prospect of DC cable transmission in the world [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 487-495.
- [4] ZHOU Yao, PENG Simin, HU Jun, et al. Polymeric insulation materials for HVDC cables: Development, challenges and future perspective[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1308-1318.
- [5] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
LIU Zhenya. Global energy internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [6] 何金良, 彭 琳, 周 垚. 环保型高压直流电缆绝缘材料研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 337-343.
HE Jinliang, PENG Lin, ZHOU Yao. Research progress of environment-friendly HVDC power cable insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 337-343.
- [7] 何金良. 构建地下能源综合通道的设想[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 66-70.
HE Jinliang. Ideas on building underground energy complex passage[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 66-70.
- [8] 王少华, 阎黎冰, 李 特, 等. 交流 500 kV 交联聚乙烯绝缘海缆设计关键问题[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 225-230.
WANG Shaohua, YAN Libing, LI Te, et al. Key problems of design for ac 500 kV cross-linked polyethylene insulation submarine cable[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 225-230.

- [9] 闫志雨,赵洪,韩宝忠,等. CB/LDPE 复合介质抑制空间电荷机制及电导特性对电场分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4254-4264.
YAN Zhiyu, ZHAO Hong, HAN Baozhong, et al. Suppression mechanism of space charge in cb/lDpe composite and the influence of conduction characteristic on electrical field distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4254-4264.
- [10] ZHOU Yao, HE Jinliang, HU Jun, et al. Evaluation of polypropylene/polyolefin elastomer blends for potential recyclable HVDC cable insulation applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 673-681.
- [11] 周 珪,党 斌,胡 军,等. 纳米氧化镁颗粒对聚丙烯的性能调控[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6619-6626.
ZHOU Yao, DANG Bin, HU Jun, et al. Effect of magnesium oxide nanoparticles on tailoring the properties of polypropylene[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6619-6626.
- [12] 赵健康,赵 鹏,陈铮铮,等. 高压直流电缆绝缘材料研究进展评述[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3490-3503.
ZHAO Jiankang, ZHAO Peng, CHEN Zhengzheng, et al. Review on progress of HVDC cables insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3490-3503.
- [13] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. HVDC cable design and space charge accumulation. Part 3: Effect of temperature gradient[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(2): 5-14.
- [14] 傅晨钊,司文荣,祝令瑜,等. 土壤直埋单芯电缆暂态温升计算模型的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 158-163.
FU Chenzhao, SI Wenrong, ZHU Lingyu, et al. Research on the calculation model for transient temperature rise of straight buried single core cable[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 158-163.
- [15] MAZZANTI G, MARZINOTTO M. Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [16] 郝晓光,宋鹏先,王浩鸣,等. 无机纳米掺杂 XLPE 电缆绝缘的力学性能与电气强度研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(8): 21-25.
XI Xiaoguang, SONG Pengxian, WANG Haoming, et al. Mechanical properties and electric strength of xlpe cable insulation doped with inorganic nanoparticles[J]. Insulating Materials, 2018, 51(8): 21-25.
- [17] 陈 曦,吴 锴. 新型 XLPE 高压直流电缆绝缘料的空间电荷特性研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(5): 35-39.
CHEN Xi, WU Kai. Study on space charge characteristic of new XLPE insulation material for HVDC cable[J]. Insulating Materials, 2015, 48(5): 35-39.
- [18] ZHOU Yao, DANG Bin, WANG Haoming, et al. Polypropylene-based ternary nanocomposites for recyclable high-voltage direct-current cable insulation[J]. Composites Science and Technology, 2018(165): 168-174.
- [19] 宋红艳,黄兴溢,张 军,等. XLPE 及 XLPE/MgO 纳米复合材料的击穿强度与力学性能的比较研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 17-21.
SONG Hongyan, HUANG Xingyi, ZHANG Jun, et al. Comparative study of breakdown strength and mechanical properties of XLPE and XLPE/MgO nanocomposites[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 17-21.
- [20] 李媛媛,田慕琴,雷志鹏. 环氧树脂纳米复合电介质制备方法及其绝缘性能的研究进展[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 90-95.
LI Yuanyuan, TIAN Muqin, LEI Zhipeng. Research progress on preparation methods and insulation properties of epoxy nanocomposites[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 90-95.
- [21] ZHOU Yao, HU Jun, DANG Bin, et al. Effect of different nanoparticles on tuning electrical properties of polypropylene nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1380-1389.
- [22] 秦司晨,屠幼萍,金 花,等. 不同温度下环氧树脂空间电荷特性仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 144-149.
QIN Sichen, TU Youping, JIN Hua, et al. Simulation of space charge characteristics of epoxy resin at different temperatures[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 144-149.
- [23] 操卫康,李 喆,龚 瑾,等. 纳米颗粒填充浓度和表面处理对纳米 MgO/PP 空间电荷行为的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1495-1504.
CAO Weikang, LI Zhe, GONG Jin, et al. Influence of nanoparticle concentration and surface treatment on space charge behavior in nano-MgO/PP[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1495-1504.
- [24] MURAKAMI Y, NEMOTO M, OKUZUMI S, et al. DC conduction and electrical breakdown of MgO/LDPE nanocomposite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 33-39.
- 周 珪(1992—),男,博士研究生,主要从事纳米电介质材料与绝缘技术的研究工作(E-mail: zhouyao6811@163.com)。
- 何金良(1966—),男,博士,教授,主要从事输变电技术、电磁环境技术、纳米电介质材料、传感器及大数据应用方面的研究工作(E-mail: hejl@tsinghua.edu.cn)。