

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.028

高压直流导线表面粗糙度与电晕放电时粗糙系数的关系

王东来, 卢铁兵, 林耀煜, 卞星明, 甄永赞

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 高压输电线路表面磨损会对线路电晕放电造成影响。粗糙系数是根据导线表面状态预测起晕场强的重要参数。文中研究了表面粗糙度与高压直流导线起晕场强以及粗糙系数之间的关系, 基于触针法测量了圆截面导线的表面粗糙度, 利用圆柱电晕笼获得了导线正负极直流起晕电压, 得到了粗糙系数与导线表面粗糙度之间的变化规律。导线粗糙度在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 到 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内变化时, 粗糙系数随表面粗糙度增大而减小。与正极相比, 表面粗糙度对负极电晕放电影响更大。表面粗糙度越大, 粗糙度变化对粗糙系数的影响越明显。

关键词: 高压直流输电; 电晕放电; 表面磨损; 粗糙系数; 起晕场强

Relationship Between the HVDC Conductor Surface Roughness and the Roughness Coefficient of Corona Discharge

WANG Donglai, LU Tiebing, LIN Yaoyu, BIAN Xingming, ZHEN Yongzan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The surface wear of high voltage transmission lines will influence the corona discharge characteristics. The roughness coefficient is an important parameter to predict the corona initial electric field according to the surface condition of conductors. In this paper, the relationship between the conductor surface roughness and the DC corona initial electric field or the roughness coefficient is researched. The surface roughness of conductors with circular cross-section is measured with contact stylus method. Positive and negative corona initial voltages of conductors are analyzed by using a cylindrical corona cage. The functional relation between surface roughness and roughness coefficient is presented. It is revealed that the roughness coefficient decreases with the increase of the surface roughness from $0.5\text{ }\mu\text{m}$ to $2.5\text{ }\mu\text{m}$. Compared with positive corona discharge, the surface roughness has a stronger effect on negative corona discharge. The influence of surface roughness on roughness coefficient is more significant with the surface roughness becoming larger.

Key words: HVDC transmission; corona discharge; surface wear; roughness coefficient; corona initial electric field

0 引言

近年来, 中国投运了多个特高压输电工程。输电线路对其周边电磁环境的影响越来越受到社会关注。高压直流线路电晕放电会产生合成电场、无线电干扰、可听噪声等电磁环境问题^[1]。线路电晕放电程度与表面粗糙度密切相关, 粗糙度越大, 线

路放电越剧烈。输电线路在生产、运输和架设过程中, 表面经常出现毛刺、损伤等状况, 从而导致粗糙度增大。当线路运行一段时间后, 一些细小的毛刺逐渐消失, 表面粗糙度会有所下降, 电磁环境问题得到缓解。而随着投运时间进一步增加, 风沙气候环境、线路舞动等因素造成的摩擦磨损又会使表面粗糙度增大^[2-3]。

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307056); 国家电网公司科技项目(GY71-18-008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307056), State Grid Corporation of China Project(GY71-18-008).

导线起晕场强可以用 Peek 公式进行预测^[4-7]。这种预测方法假设导线会在某个临界场强下发生电晕放电。实际上,电晕放电有一个随着导线电压增大而从局部起晕发展到全面起晕的过渡过程。受导线表面状态和气候条件等因素的影响,在起晕过程中,导线上经常会出现局部放电点。Peek 公式虽然不能全面反映电晕放电的整个过程,但由于形式简单,在工程实践中得到了大量应用。

实际高压导线一般为钢芯铝绞线,其外层由多股圆铝线绞合而成。此外,导线表面还存在着远小于导线直径的微观形貌特征。导线表面的这些特征很难直接反映在导线表面场强计算中,因此需要利用粗糙系数来修正导线起晕场强。粗糙系数是一个经验参数,反映了实际导线起晕场强与对应光滑圆导线起晕场强之间的换算关系。粗糙系数的取值与导线表面性态、天气状况等因素密切相关,一般在 0~1。导线越光滑,粗糙系数越高。考虑各种因素的影响,钢芯铝绞线的粗糙系数一般在 0.4~0.6 选取^[2]。

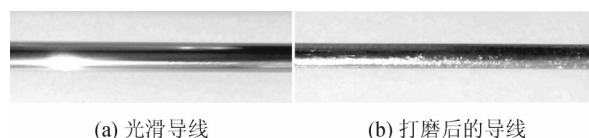
表面状态是导线电晕特性的重要影响因素。不同自然环境下运行的导线,其表面状态存在明显差异。目前,已有学者对长期运行^[8-11]、表面污秽^[12-13]、存在雨滴、覆冰^[14-16]等复杂环境下的导线开展了大量深入研究。就磨损而言,现有的研究主要集中在风沙环境^[17-18]以及导线振动^[19-20]对导线表面的磨损程度,对这些导线起晕场强的研究也主要集中在交流电压下。在摩擦磨损的情况下,导线表面粗糙度变化对直流电晕放电的影响规律,以及磨损程度与粗糙系数的对应关系,目前仍缺少确切的结论。

为了排除钢芯铝绞线中的复杂绞股结构对粗糙系数的影响,文中采用光滑圆导线作为研究对象。首先,对导线进行不同程度的打磨,利用触针法测量了这些导线的表面粗糙度。接下来,基于圆形电晕笼,测量了导线的起晕电压,获得粗糙系数。最后通过曲线拟合,得到了导线表面粗糙度与正负极直流电压下粗糙系数的对应关系。

1 导线表面粗糙度测量

采用长 1 m,直径 6 mm 的不锈钢光滑圆棒作为实验导线,见图 1(a)。这种导线结构简单,可以排除绞线股间缝隙对粗糙度测量以及电晕特性的影响。在导线中段 0.5 m 的范围内,利用锉刀、36-120 目的砂纸等工具对导线表面进行打磨。打磨效果见图 1(b)。在打磨过程中,尽量使导线表面各个位置

磨损程度均匀。



(a) 光滑导线

(b) 打磨后的导线

图 1 导线打磨前后对比

Fig. 1 Comparison of the conductor before and after sanding

利用表面粗糙度测量仪 Mitutoyo SJ-410 对打磨后的导线表面形貌进行测量,见图 2(a)。测量过程中,为了有效地固定导线,设计了一个带有凹陷曲面的导线支架,支架上的导线会自动滑落到凹曲面的底部。支架由有机玻璃制成,质地较软,避免了支架棱角在导线表面产生划痕。测量时,表面粗糙度测量仪的测试探针沿导线长度方向水平划过,探针运动速度为 0.5 mm/s。在每根导线表面选取 21 个粗糙度采样点,采样点随机分布于导线中间部分 30 cm 的范围内。

导线截面为圆形,在测量过程中,探针会不可避免地偏离导线轴向方向,沿弧形表面抬升或滑落。表面粗糙度属于微观几何误差,因此需要对探针的运行轨迹进行补偿,以排除导线几何形状造成的干扰。探针轨迹补偿方法见图 2(b)。x 轴为探针运动方向,y 轴为探针所在高度, $y(x)$ 为探针运动路径。每次测量中,探针有效运动距离 l 为 4 mm。将测量结果分成 10 段,每段长度 $\Delta l=0.4$ mm。使用最小二乘法计算出每个 Δl 上导线几何结构的补偿曲线 $y_0(x)$ 。导线表面粗糙度 R_a 可定义为

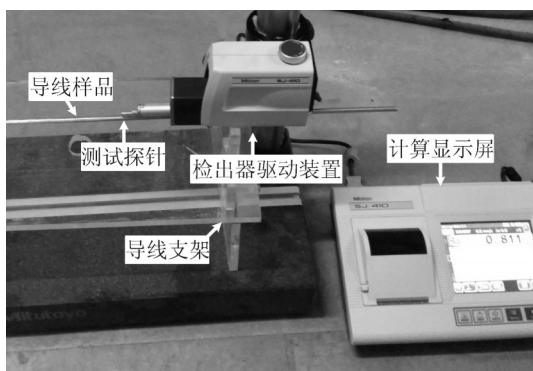
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x) - y_0(x)| dx \quad (1)$$

将每根导线的全部粗糙度测量结果取平均值,作为该导线的实际表面粗糙度 R_a 。由于导线打磨的均匀程度对电晕放电影响很大,如果导线表面存在较大的突起或毛刺,这些位置容易形成局部放电,使得实验结果缺乏代表性。因此,计算每根导线所有测量点上粗糙度测量值的标准差 σ ,以评价导线表面磨损的均匀程度。表面粗糙度测量结果见表 1。光滑导线的表面粗糙度 R_a 为 0.446 μm ,打磨后导线粗糙度在 0.874 μm 到 2.503 μm 之间。每根导线粗糙度标准差 σ 均小于该导线 R_a 的 25%,在一定程度上说明了导线表面没有明显的毛刺。

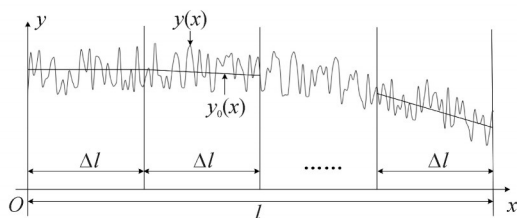
2 表面粗糙度与导线电晕放电的关系

2.1 粗糙系数的计算方法

同轴圆柱结构中,导线表面起晕场强 E_m 为



(a) 导线样品与粗糙度测量仪布置



(b) 测量数据处理

图2 表面粗糙度测量

Fig. 2 Surface roughness measurement

表1 导线表面粗糙度测量结果

Table 1 Measurement results of surface roughness

导线编号	表面粗糙度均值 $R_a/\mu\text{m}$	粗糙度标准差 $\sigma/\mu\text{m}$
0	0.446	0.127
1	0.874	0.205
2	1.192	0.289
3	1.370	0.263
4	1.903	0.308
5	2.125	0.365
6	2.503	0.367

$$E_{on} = \frac{U_{on}}{r \ln(R/r)} \quad (2)$$

式(2)中: U_{on} 为导线起晕电压; r 为导线半径; R 为电晕笼半径。

直流情况下, 正负极导线的粗糙系数 m_+ 、 m_- 分别为:

$$m_+ = \frac{E_{on+}}{33.78 \left(1 + \frac{0.240}{\sqrt{\delta r}} \right)} \quad (3)$$

$$m_- = \frac{E_{on-}}{31.08 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right)} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: $\delta = \left(\frac{273+t_0}{273+t} \right) \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)$; E_{on+} 、 E_{on-} 分别为正负极电压下导线的起晕场强; t 、 P 分别为实验的环境温度和气压; $t_0=25.0\text{ }^\circ\text{C}$; P_0 为一个标准大气压^[6]。

2.2 实验平台设计

将导线置于长 70 cm, 直径 40 cm 的圆柱电晕笼中, 用立式绝缘子支撑, 见图 3。



图3 导线起晕电压测量

Fig. 3 Measurement of conductor corona initial voltage

导线起晕电压与导线直径关系密切。在实验前, 基于 Peek 公式对导线的起晕电压进行预测。取导线粗糙系数 m 分别为 1.0、0.9 和 0.8, 电晕笼直径 40 cm。根据式(2)–(4)计算的导线起晕场强和起晕电压分别见图 4(a)、(b)。导线起晕场强随导线直径增大而减小, 但起晕电压随直径增大而增大。如果导线直径小于 5 mm, 负极电压下导线起晕场强稍高于正极。而当导线直径大于 7 mm 时, 正极电压下导线起晕场强稍高于负极。当导线直径在 6 mm 左右, 粗糙系数相同的正负极导线起晕场强基本相等。此时起晕电压的绝对值 $|U_{on}|$ 在 50 ~ 60 kV。实验中使用的电压源输出最大值为 $\pm 120\text{ kV}$ 。因此, 使用直径 6 mm 的导线可以满足实验要求。

在电晕笼的中心区域, 每隔 120° 布置一块离子流板, 测量导线在各个方向上的电晕放电程度。离子流板为弧形, 有效面积 100 cm^2 , 紧贴笼壁表面。实验中依次对导线样品施加正极和负极直流电压, 记录导线电压与离子流密度的关系。

本次实验在室内进行, 空气温度 t 为 $20.3\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 48.4%, 忽略气压对实验结果的影响。通过实验得到导线起晕电压 U_{on} 后, 根据式(2)计算起晕场强, 再根据式(3)或式(4), 即可得到粗糙系数 m 。

2.3 起晕电压的确定

受加工工艺等因素的影响, 导线在加压的过程中, 容易出现局部电晕放电, 这些放电点出现的位置较为随机, 会对实验结果造成一定影响。因此在实验过程中, 通过紫外光子计数器观测导线中间部分 30 cm 范围内的放电现象。

局部放电点出现的位置和数量与电压极性有关。施加负极性电压时, 除 1 号和 3 号导线外, 在电压的升高的过程中, 都出现了明显的局部放电现

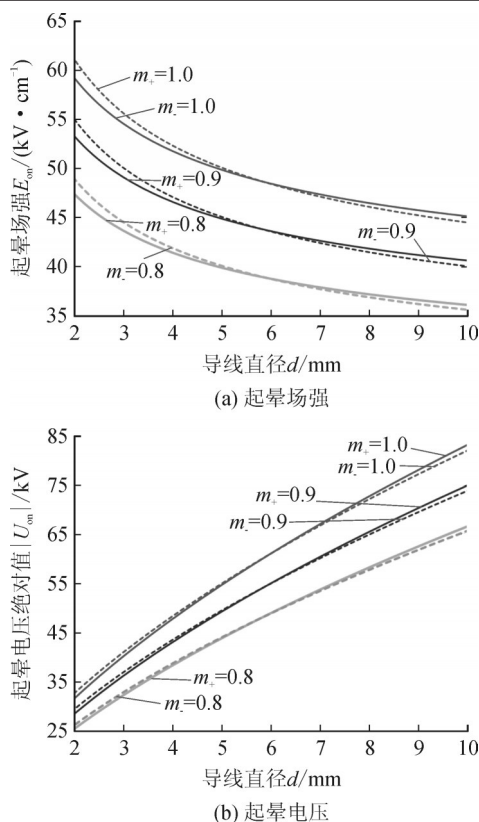
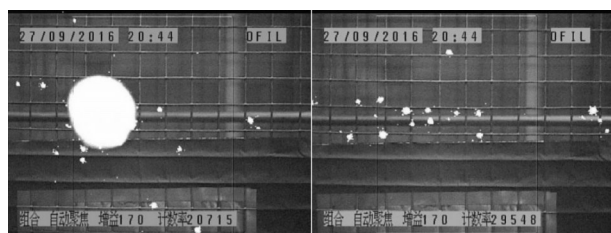


图4 Peek公式中导线起晕场强、电压与导线直径的关系

Fig. 4 Relationships among corona initial electric field, voltage and conductor diameter in Peek's law

象,见图5(a)。随着电压进一步升高,光子计数率增大,导线的局部放电点消失,转为图5(b)中的全线放电。而在施加正极性电压时,只有2、5、6号导线在升压过程中出现了明显的局部放电现象。因此,负极电晕放电对导线表面微米级的磨损更为敏感。



(a) 局部电晕放电, 光子计数率=20 715 (b) 全线电晕放电, 光子计数率=29 548

图5 紫外光子计数器观测结果

Fig. 5 Corona discharge in the UV imaging detector

文中旨在定性探讨粗糙度与电晕放电特性的关系。为使起晕电压的取值更有代表性,实验中选取紫外观测区域内无明显局部放电点,且离子流密度线性关系较好时的测量结果,作为切线法^[6]计算起晕电压的依据。利用最小二乘法,对离子流密度测量值与导线电压的关系进行线性拟合。拟合直线与横轴的交点即为导线起晕电压。通过这种方法得到的起晕电压一般略大于导线的实际起晕电压,但有助于排除导线弱起晕阶段各种随机因素的影响。

以3号导线为例,离子流密度的测量结果见图6。 U_{on+} , U_{on-} 为通过切线法得到的正负极起晕电压。从图6可以看出,正极与负极导线的起晕过程存在一定差异。正极下测得的离子流密度与电压之间始终存在较好的线性关系,而负极导线在电压较低时就出现了微弱的放电,当导线电压升高到一定程度后,离子流密度才和导线电压呈现明显的线性关系。

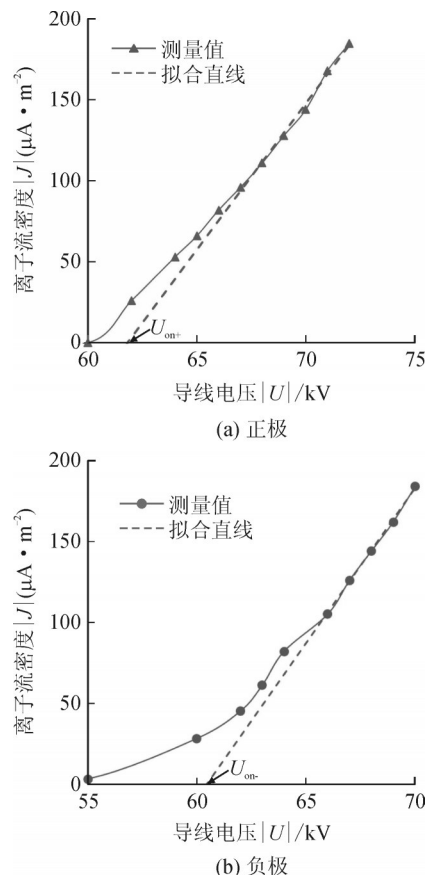


图6 导线起晕电压的确定

Fig. 6 Determination of corona initial voltage

2.4 表面粗糙度与粗糙系数的关系

表面粗糙度与导线起晕场强的关系见图7。负极导线的起晕场强一般大于正极。在相同粗糙度下,负极放电更为剧烈。随着粗糙度的增大,导线起晕场强逐渐降低,但二者的数量关系并非线性变化。当粗糙度从 $0.5 \mu\text{m}$ 增加到 $1.5 \mu\text{m}$,起晕场强只减小了约 2.8 kV/m ,而粗糙度从 $1.5 \mu\text{m}$ 增大到 $2.5 \mu\text{m}$ 时,起晕场强减小了约 6.2 kV/m 。

根据式(3)、(4),计算导线正负极粗糙系数 m_+ , m_- 。计算结果见图8。导线粗糙系数随着表面粗糙度增大而减小,二者的数量关系可以用二次多项式拟合

$$\begin{cases} m_+ = -0.016R_a^2 + 1 \\ m_- = -0.020R_a^2 + 1 \end{cases} \quad (5)$$

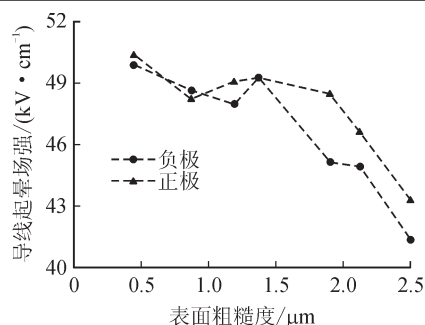
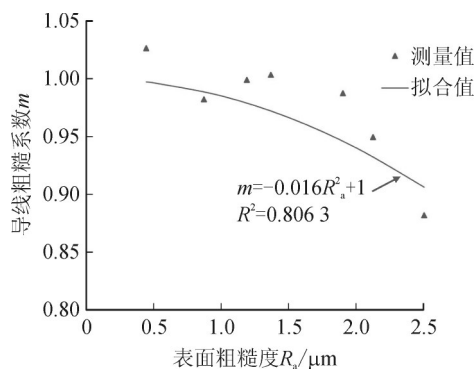
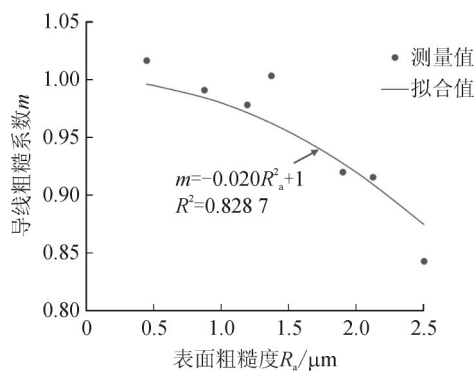


图7 导线表面粗糙度与起晕场强的关系

Fig. 7 Relationship between conductor surface roughness and corona initial electric field



(a) 正极



(b) 负极

图8 导线表面粗糙度与粗糙系数的关系

Fig. 8 Relationship between conductor surface roughness and roughness coefficient

实验得到的光滑导线的粗糙系数接近1,且正负极基本相等。随着粗糙度的增加,负极粗糙系数减小速度更快。随着表面粗糙度从0.5 μm增大到2.5 μm,正负极导线粗糙系数分别下降了约0.13和0.18。与此同时,表面粗糙度越大,粗糙度变化对粗糙系数的影响越明显。

造成这种现象差异的原因可能是正负电晕放电的机理不同。电子在电场作用下的运动速度高于正离子。正极电晕放电时,导线表面积聚了大量的正离子,这相当于在一定程度上降低了导线表面粗糙度。而负极电晕放电时,负离子迅速远离导线表面,对导线表面粗糙度的改善程度较弱。因此,

粗糙度变化对负极电晕放电的影响更大。

3 结论

文中通过设计实验,研究了导线表面粗糙度与直流电晕放电粗糙系数之间的关系。首先用触针法测量了导线的表面粗糙度,接下来基于电晕笼测量导线的起晕场强,并计算出粗糙系数。最后建立起粗糙度和粗糙系数的函数关系,并得到如下结论:

1)导线表面粗糙度与粗糙系数的关系可以用二次函数近似表示。随着表面粗糙度增大,导线粗糙系数降低。随着表面粗糙度从0.5 μm增大到2.5 μm,正负极电压下导线粗糙系数分别下降了约0.13和0.18。表面粗糙度越大,粗糙度变化对粗糙系数的影响越明显。

2)负极电晕放电对导线表面微米级的磨损更为敏感。在粗糙度相同时,负极导线电晕放电一般更为剧烈。

在直流线路设计和建设过程中,应当将粗糙度变化对电晕放电产生的影响考虑在内。实际情况下,要选取更适用于当地环境的粗糙系数,还需综合考虑气候环境、导线结构以及放电点位置的随机性等多种因素的共同影响。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高电压直流输电工程技术[M]. 第二版.北京: 中国电力出版社, 2011:261-266.
ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 261-266.
- [2] 赵新泽. 架空输电导线的磨损特性及其影响行为研究 [M]. 北京:中国电力出版社, 2014:135-156.
ZHAO Xinze. Study on wear characteristics and influencing behaviour of overhead transmission conductors[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014:135-156.
- [3] 刘云鹏,李玥翰,刘海峰,等. 风沙条件下导线电晕特性的模拟试验系统设计[J]. 高电压技术,2012, 38(9): 2417-2423.
LIU Yunpeng, LI Yuehan, LIU Haifeng, et al. Design of simulation test system for corona characteristics of conductor under sandstorm condition[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9):2417-2423.
- [4] WHITEHEAD J B. The electric strength of air[J]. Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1910, 29(7):1059-1087.
- [5] CHEN Lan, MACALPINE J M K, BIAN Xingming, et al. Comparison of methods for determining corona inception

- voltages of transmission line conductors[J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(3): 269-275.
- [6] 赵宇明, 麻敏华, 楚金伟, 等. 电晕笼中直流导线起晕电压的测量方法[J]. *高电压技术*, 2008, 34(8): 1567-1572.
ZHAO Yuming, MA Minhua, CHU Jinwei, et al. Measurement methods for DC conductor corona onset voltage in the corona cage[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(8): 1567-1572.
- [7] EI-BAHY M M, ABOUELSAAD M. Onset voltage of negative corona on stranded conductors[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(10): 3094-3101.
- [8] BIAN X, YU D Y, CHEN L C, et al. Influence of aged conductor surface conditions on AC corona discharge with a corona cage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2011, 18(3): 809-818.
- [9] BIAN X, WANG Y, WANG L, et al. The effect of surface roughness on corona - generated electromagnetic interference for long-term operating conductors[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2015, 22(2): 879-887.
- [10] BIAN X, CHEN L, YU D, et al. Impact of surface roughness on corona discharge for 30-year operating conductors in 500 kV AC power transmission line[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(3): 1693-1695.
- [11] BIAN X M, CHEN L, YU D M, et al. Surface roughness effects on the corona discharge intensity of long-term operating conductors[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(17): 174103.
- [12] 赵宇明, 麻敏华, 关志成, 等. 导线污秽对高压直流输电线路电晕特性的影响[J]. *高电压技术*, 2007, 33(12): 49-54.
ZHAO Yuming, MA Minhua, GUAN Zhicheng, et al. Influence of contaminations of the conductor on HVDC transmission line corona characteristics[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(12): 49-54.
- [13] MA Minhua, ZHAO Yuming, GUAN Zhicheng, et al. The influence of contaminations on HVDC conductor corona characteristics[C]//*Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP)*. Vancouver, BC: [s.n.], 2007: 537-541.
- [14] 王清亮, 张璐, 李舟, 等. 直流负极性下雨滴对导线电晕特性的影响[J]. *高压电器*, 2011, 47(8): 9-13.
WANG Qingliang, ZHANG Lu, LI Zhou, et al. Influence of corona characteristics of water drops on smooth conductor under negative DC voltage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2011, 47(8): 9-13.
- [15] 李松林, 张满, 杜佳璐. 导线带电雾凇覆冰过程的电晕放电特性研究[J]. *高压电器*, 2016, 52(9): 127-131.
LI Songlin, ZHANG Man, DU Jialu. Study on the corona discharge characteristics of the conductor during energized rime icing[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(9): 127-131.
- [16] 朱军, 刘云鹏, 朱雷, 等. 表面水滴对交流导线电晕特性的影响[J]. *高压电器*, 2015, 51(1): 13-17.
ZHU Jun, LIU Yunpeng, ZHU Lei, et al. Influence of surface water drop on corona characteristics of AC transmission lines[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(1): 13-17.
- [17] 李书兴, 陈斯华. 西北风沙地区输电导线侵蚀及起晕电压实验模拟研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(3): 151-154.
LI Shuxing, CHEN Sihua. Experimental simulation research on transmission line erosion and corona inception voltage in the northwest sandy area[J]. *Journal of Changchun University of Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2014, 37(3): 151-154.
- [18] 岳腾. 风沙环境下导线表面粗糙度变化及其对电晕特性的影响研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
YUE Teng. The research on the wire surface roughness changes under the sand environment and its effects of corona characteristics[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [19] ZHAO Xinze, PENG Wei, ZHANG Shaoqing, et al. Contact stress analysis of multilayered strands[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2011: 1230-1233.
- [20] 赵新泽, 高伟, 赵美云, 等. 干燥和酸性条件下钢芯铝绞线磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(6): 616-621.
ZHAO Xinze, GAO Wei, ZHAO Meiyun, et al. Wear characteristics of aluminum cable steel reinforced(ACSR) under dry and acidic conditions[J]. *Tribology*, 2011, 31(6): 616-621.

王东来(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统电磁兼容。

卢铁兵(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进输电技术、电力系统电磁兼容等。