

电晕笼内导线三维电场强度分布浅析

徐渝淇

(国网四川省电力公司检修公司,四川 成都 610041)

摘要: 研究影响单相或单极分裂导线电场强度分布的因素,建立简化的电晕笼及分裂导线三维模型,运用 ANSYS 仿真分析,确定了起晕时子导线表面三维电场强度分布。通过调整电压等级和分裂导线的几何尺寸,如分裂间距、子导线半径、分裂次数、电晕笼大小、导线排列形式等,来研究这些因素对测量段上最大场强的影响。仿真结果表明,分裂导线表面最大电场强度随子导线半径的增大而减小,随分裂间距的增大而增大,随分裂数的增大而减小,随电晕笼边长的增大而减小。电场强度分布的研究对解决电晕放电有重要的工程应用价值。

关键词: 电晕笼; 三维; 电晕放电; 电场强度; 分裂导线; 仿真

Abstract: The factors influencing the electric field intensity distribution of single-phase or unipolar split conductor are studied, and a 3D model of simplified corona cage and split conductor is established. The 3D electric field intensity distribution of sub-conductor surface is determined when simulating by ANSYS. The impact of factors, such as split spacing, sub-conductor radius, split times, size of corona cage and wire arrangement, on maximum field strength of measuring section is also studied by adjusting the voltage level and the geometry size of split conductor. Simulation results show that the maximum electric field intensity of split conductor surface decreases as the radius of sub-conductor increases, it increases as the split spacing increases, it decreases as the split times increases, and it decreases as the side length of corona cage increases. The research on electric field intensity distribution has an important value for corona discharge in engineering application.

Key words: corona cage; 3D modeling; corona discharge; electric field intensity; split conductor; simulation

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)05-0033-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.05.008

0 引言

当高压输电线路的导线表面场强超过空气的击穿场强时,高压输电线路就会产生电晕放电^[1]。电晕与线路导线表面电场强度密切相关,导线表面电场强度最大处是电晕放电最活跃位置。

目前,对实际运行的线路,整条直接进行电晕研究,是不现实、不经济的方法。而电晕笼是作为研究电晕特性的专用试验设备,是研究高压输电线路导线电晕的经济有效手段,在各国广泛应用。

1 电晕笼的设计与发展概况

电晕笼是横截面为圆形或方形的网状金属笼,通过低阻抗测量装置与大地相接来模拟大地。其中中心处放置试验导线,用来模拟输电线路。由于试验中导线与笼间的距离较实际中导线与大地间距离

近,故试验中,导线上施加较低电压,可使导线表面场强达到实际中高电压场强水平,表现出高电压下输电线路导线电晕特性^[2]。

目前,各国研究者用电晕笼进行了大量电晕特性试验。南非 Durban Westville 大学利用总长 4 m、直径 1.5 m 的电晕笼,研究导线表面硅涂层对导线电晕的影响;美国华盛顿大学利用总长 3 m、直径 0.75 m 的电晕笼,研究双极性导线负载电流对电晕电流及离子电流密度的影响;中国国家电网公司利用电晕笼试验研究高海拔、降雨、大雾等不同环境对电晕放电的影响。下面通过改变电压等级和分裂导线几何尺寸来研究导线表面最大场强的变化特性。

2 电晕笼中单相导线与实际三相线路的等效

将实际运行中的三相交流分裂导线输电线路简化为单相直流分裂导线输电线路,并将其放在电晕笼中进行研究。实际三相输电线路的边相和中相导

线周围最大场强在平均最大场强的4%范围内变化,其分布不对称性很小;而在电晕笼中,导线处在电晕笼的几何中心,结构更为对称,导线周围电场更加趋于一致,各分导线最大电场强度之间差别更小,故可以用电晕笼中单相线路准确地估算三相线路分裂导线上最大场强。

3 电晕笼实验模型的建立

3.1 导线表面电场强度的计算方法

目前计算导线表面电场强度的方法主要由马克特-门格尔法、模拟电荷法、逐步镜像法、有限元法、经验公式法等。这里使用的是国际上公用的有限元法^[3]。

有限元分析法在计算电场强度时先明确了场域范围,将场域剖分成了有限个单元,然后计算了单元电场能系数矩阵的元素和总电场能系数矩阵的元素,根据系数矩阵方程求解出各节点电位,再根据节点电位可以求出电场的场强大小。

3.2 建立三维电晕笼仿真模型

实际输电线路中,电压等级各不相同,交流和直流共同流经线路,线路弧垂和线路表面电荷分布也各不均匀。在三维模型中需要考虑实际输电线路中多种影响因素。

3.2.1 模型建立的假设条件

仿真实验中,为了便于工程分析计算,也为了更直观反映输电线路场强分布和它影响因素的关系,需要对电晕笼模型进行以下简化处理^[4]。

- 1) 电晕笼考虑双层,但是测量段和保护段取的材料相同,仿真时电晕笼上施加电压为0,表示其接地;
- 2) 均压环虽不与导线直接接触,但其上施加电压与在导线上施加的电压大小相同;
- 3) 电晕笼内的分裂导线不考虑弧垂;
- 4) 电晕笼内是单相分裂导线,其上分别施加不同电压等级电压;
- 5) 分裂导线的子导线的半径相同,彼此间分裂间距相同,且与电晕笼内壁保持为平行状态,导线的表面光滑且等电位。

3.2.2 三维电晕笼模型图

分裂导线的子导线半径均取相同的值,子导线的轴心在1个圆柱面上。电晕笼是1个两端无盖内部镂空的长方体,它的厚度为0.4 m。笼壁的内层正方形边长均为6 m,电晕笼长度为9.6 m。

在电晕笼的外层包裹有3个空气层,所有空气层和电晕笼共中心,且它们的面相互平行,小型空气层的尺寸长为14 m,宽和高均为10 m;中型空气层尺寸是长为42 m,宽和高均为30 m;大型空气层长为84 m,宽和高均为60 m。ANSYS中模型图(含有3个空气层)整体三维视图见图1所示。

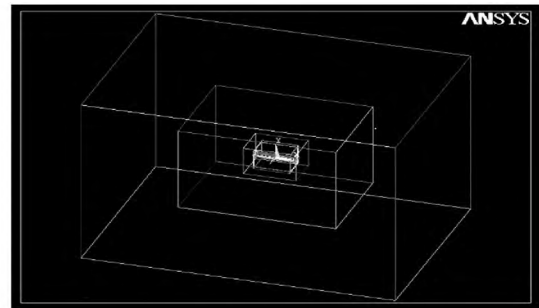


图1 整体三维视图

4 不同情况下导线表面最大场强的特性研究

相同实验条件下,在导线和均压环上施加500 kV电压。通过分别改变子导线的分裂间距、导线半径、分裂次数、电晕笼尺寸和导线排列形式,记录导线表面的最大电场强度。再施加不同电压,观察在不同电压等级下电晕笼内导线表面最大电场强度变化^[5]。

4.1 分裂间距对最大电场强度的影响

分裂间距和子导线轴心到分裂导线几何中心的关系如图2所示。分裂间距 d 和分裂半径 R 参数见表1。

表1 分裂间距和分裂半径

分裂间距 /mm	300	350	400	450 (标)	500	550	600
分裂半径 /mm	392	457	523	588	653	719	784

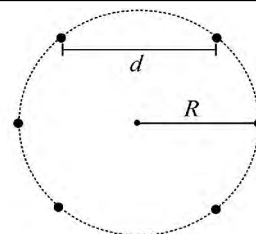


图2 分裂半径与分裂间距的关系

由于导线是8分裂导线,故圆心角取 45° ,则有: $R = d \times (\sin 67.5 / \sin 45) = 1.3066d$

导线上最大电场强度在不同分裂间距下参数见表2和图3。

表 2 分裂间距与最大电场强度

分裂间距 /mm	300	350	400	450(标)	500	550	600
最大电场强度 /mm	18.108 5	18.535 6	18.951 2	19.420 2	19.857 7	20.247 1	20.633 8

表 3 导线型号与子导线半径

8 分裂导线型号	LGJ400	LGJ500	LGJ630	LGJ720(标)	LGJ800	LGJ900	LGJ1000
子导线半径 /mm	13.4	15.0	16.8	18.12	19.2	19.95	21.05

表 4 子导线半径与最大电场强度的关系

子导线半径 /mm	13.4	15.0	16.8	18.12(标)	19.2	19.95	21.05
最大电场强度 /($kV \cdot cm^{-1}$)	23.584 7	21.853 6	20.180 7	19.420 2	18.865 8	18.398 3	17.868 4

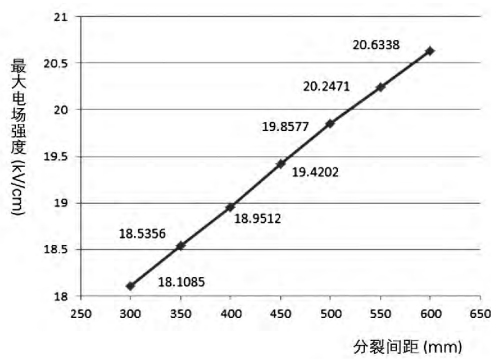


图 3 最大电场强度随分裂间距的变化图

分析上述表格和散点图可知,分裂间距在范围 300 mm 到 600 mm 内变化时,电晕笼内导线表面最大电场强度随着分裂间距的增大而增大。

4.2 子导线半径对最大电场强度的影响

实验选取了 7 种不同型号的子导线半径建立模型,见表 3 所示。

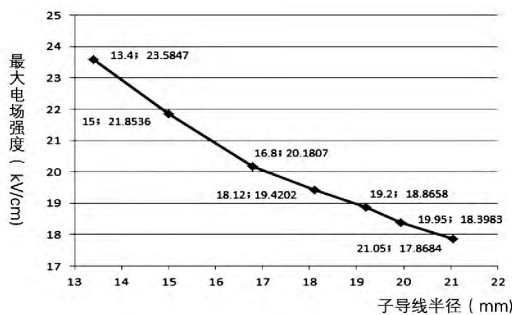


图 4 最大电场强度随子半径的变化图

将不同子导线分别代入 ANSYS 软件,仿真计算,并记录相应的最大电场强度值于表 4 和图 4 中。

由上述表格和散点图可知,子导线半径在 13.4 mm 到 21.05 mm 内变化时,电晕笼内导线表面最大电场强度随着子导线半径的增大而减小。分析其原

因随着子导线半径的增大,导线表面曲率减小,且子导线彼此间距离也会减小,则子导线间相互作用会减小,导线表面的最大电场强度就会减小。

4.3 分裂次数对最大电场强度的影响

试验中建立了两种不同情况下,分别 4、6、10、12 次分裂的电晕笼模型 ANSYS 仿真实验。

1) 分裂间距恒定为 450 mm。此时计算出的对应分裂半径,其参数见表 5 所示。

表 5 分裂次数与分裂半径之间的关系

分裂次数	4	6	8(标)	10	12
分裂半径 /mm	318	450	588	728	869

分裂间距(图中中心距离的长度)恒定,分裂数不同的分裂导线布置如图 5 所示。

2) 分裂半径恒定为 588 mm。当分裂半径(中心距离长度的一半)恒定,分裂数不同的分裂导线布置如图 6。

将两种情况下分裂次数不同的电晕笼模型分别代入 ANSYS 软件,仿真计算,并记录相应的最大电场强度值于表 6 和图 7。

分析上述表格和散点图可知:分裂数在 4 到 12 内变化时,电晕笼内导线表面最大电场强度随着分裂数的增大而减小。且当分裂数小于 8 时,相同分裂数下,分裂间距恒定时电晕笼内导线表面最大电场强度小于分裂半径恒定的情况。当分裂数等于 8 时,分裂间距恒定时电晕笼内导线表面最大电场强度等于分裂半径恒定的情况。当分裂数大于 8 时,分裂间距恒定时电晕笼内导线表面最大电场强度大于分裂半径恒定的情况。

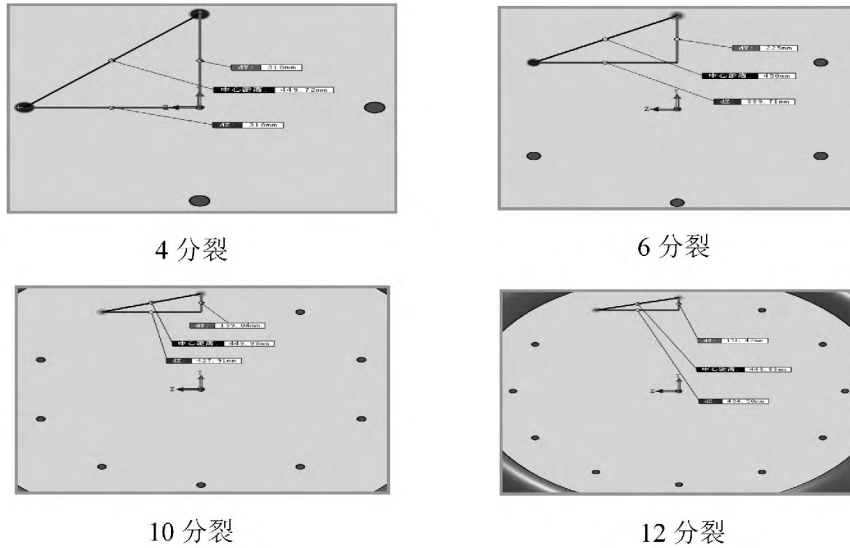


图 5 间距恒定,不同分裂次数下场强

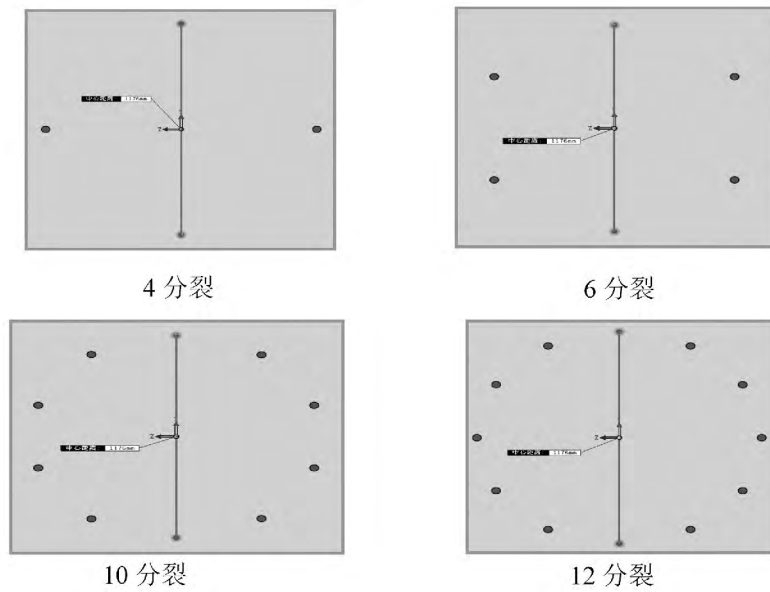


图 6 半径恒定,不同分裂次数下场强

表 6 两种情况下分裂数和最大电场强度之间的关系

分裂数	4	6	8(标)	10	12
最大场强 $I/(kV \cdot cm^{-1})$ 分裂间距恒为 450 mm	24.356 1	20.940 8	19.420 2	17.494 5	15.202 3
最大场强 $I/(kV \cdot cm^{-1})$ 分裂半径恒为 588 mm	25.467 4	22.849 6	19.420 2	15.763 6	14.280 2

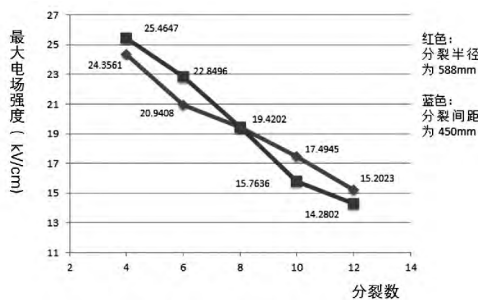


图 7 最大电场强度随分裂数的变化图

分析其原因: 分裂导线横截面积固定时, 当导线分裂数增加后, 导线总的表面积也会随之增加, 则导线上的电荷密度减小, 而导线表面电场强度与导线上电荷密度成正比, 则导线表面的最大电场强度就会减小。在其余条件相同时, 导线表面的最大电场强度就会减小。常规 ± 500 kV 换流站中, 线路为 4 分裂导线, 而在特高压 ± 800 kV 向上直流中, 为减少电晕放电现象, 采用 8 分裂导线。运行中达到了

表 7 最大电场强度与电晕笼边长的关系

电晕笼边长 /m	4	6	8	10	12
最大场强 $/(kV \cdot cm^{-1})$	23.752 2	19.402 4	17.162 2	15.814 4	14.720 2

表 8 最大电场强度与导线偏转角度之间的关系

导线顺时针旋转角度 $/(^{\circ})$	0(标)	9	18	22.5	27	36
最大场强 $/(kV \cdot cm^{-1})$	19.420 2	19.497 7	19.420 3	19.420 2	19.420 2	19.497 7

表 9 导线表面最大电场强度与施加的电压

施加电压 /kV	100	200	300	400	500	600
最大场强 $/(kV \cdot cm^{-1})$	4.979 3	8.743 6	12.335 7	16.073 2	19.402 4	23.137 4

理想的效果 这与上述仿真结论相符。

4.4 电晕笼大小对最大电场强度的影响

试验中,共建立了边长尺寸为 4 m、6 m、8 m、10 m、12 m 的 5 个电晕笼。导线是 8 分裂导线;分裂间距取 450 mm,子导线半径取 18.12 mm,导线上加 500 kV 电压。将 5 种情况下边长尺寸不同的电晕笼模型分别代入 ANSYS 软件,仿真计算,并记录相应的最大电场强度值于表 7 和图 8 中。

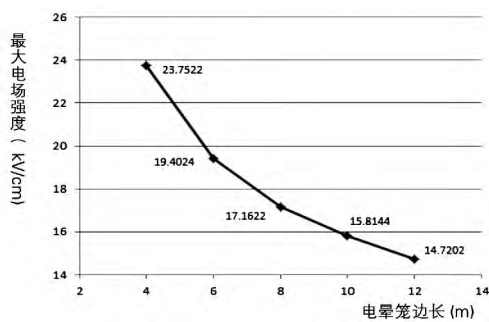


图 8 最大电场强度随电晕笼宽度的变化图

由上述表格和散点图可知,随着电晕笼宽度的增大,电晕笼内导线表面最大电场强度在逐渐减小。分析原因,当电晕笼边长尺寸增加时,导线距离笼壁越来越远,则电晕笼对导线的影响会减弱,且导线上电荷量会减少,则导线表面的电场强度会减弱。故其他条件未变时,电晕笼内导线最大电场强度会随着电晕笼宽度的增大而减小。

4.5 导线排列形式对最大电场强度的影响

试验中,一共建立了 5 个对比模型,分别将其导线顺时针旋转 9° 、 18° 、 22.5° 、 27° 、 36° 。将 5 种电晕笼模型分别代入 ANSYS 软件,仿真计算,并记录相应的最大电场强度值于表 8 中。

分析表格数据可知,导线顺时针偏离 18° 或 22.5° 或 27° 时,导线最表面大电场强度与 0° 时相等,导线顺时针偏离 9° 和偏离 36° 时相等。

4.6 在不同电压等级下电晕笼内导线表面最大电场强度

试验中,分别在导线和均压环上施加 100 kV、200 kV、300 kV、400 kV、500 kV、600 kV 电压,将测得的最大电场强度记录于表 9 中。

将表格绘制成散点图,如图 9 所示。

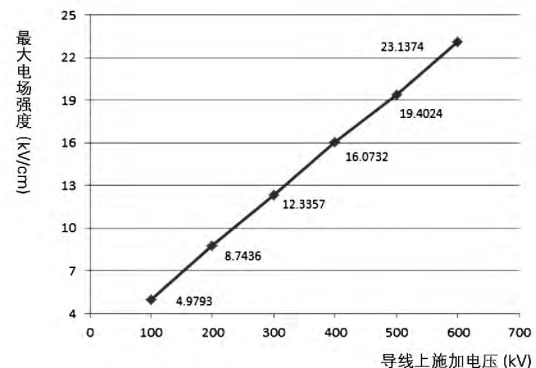


图 9 最大电场强度随导线施加电压的变化图

由上面的散点图分析可知,电晕笼导线上所施加的电压与该导线表面最大电场强度近似呈线性关系,随着施加电压的增大而增大。在德宝直流中,恶劣天气时,极 I 直流线路放电严重,线路电压由全压 500 kV 降至 350 kV 后,电晕放电现象明显好转。从而证明了现场与上述实验结论一致。

5 结 论

研究了电晕笼内导线三维电场强度分布的问题,应用有限元分析法,分析了不同布置形式下导线上最大电场强度值。得出了以下结论:1) 在导线半径、分裂数、电晕笼尺寸等相同的条件下,导线表面最大电场强度随分裂间距的增加而增加;2) 在导线间距、分裂数、电晕笼尺寸等相同的条件下,导线表

(下转第 63 页)

[12] Wu S Q, Lu X P, Xiong Z L, et al. A Touchable Pulsed Air Plasma Plume Driven by DC Power Supply [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(12): 3404 - 3407.

[13] Lu X P, Xiong Z, Zhao F, et al. A Simple Atmospheric Pressure Room - temperature air Plasma Needle Device for Biomedical Applications [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(18): 181501.

[14] Xiong Q, Lu X, Ostrikov K, et al. Length Control of He Atmospheric Plasma jet Plumes: Effects of Discharge Parameters and Ambient air [J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(4): 043505.

[15] Lu X P, Jiang Z H, Xiong Q, et al. An 11 cm long Atmospheric Pressure Cold Plasma Plume for Applications of Plasma Medicine [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(8): 081502.

[16] Nie Q Y, Ren C S, Wang D Z, et al. A Simple Cold Ar Plasma jet Generated With a Floating Electrode at Atmospheric Pressure [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(1): 011503.

[17] Nie Q Y, Ren C S, Wang D Z, et al. Self - organized Pattern Formation of an Atmospheric Pressure Plasma Jet in a Dielectric Barrier Discharge Configuration [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(22): 221504.

[18] Zhu W C, Li Q, Zhu X M, et al. Characteristics of Atmospheric Pressure Plasma Jets Emerging Into Ambient Air and Helium [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(20): 202002.

[19] 邵先军, 张冠军, 詹江杨, 等. 气体流速对大气压氩气等离子体射流影响的实验与仿真 [J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1499 - 1504.

[20] Jiang N, Ji A L, Cao Z X. Atmospheric Pressure Plasma Jets Beyond Ground Electrode as Charge Overflow in a Dielectric Barrier Discharge Setup [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(3): 033302.

[21] 冉俊霞, 罗海云, 王新新. 大气压氩气介质阻挡放电研究 [J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1486 - 1492.

[22] 王艳辉, 王德真. 大气压下多脉冲均匀介质阻挡放电的研究 [J]. 物理学报, 2005, 54(3): 1295 - 1300.

[23] 郝艳捧, 王晓蕾, 阳林. 大气压氩气介质阻挡多脉冲辉光放电的形成条件 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 28 - 32.

[24] Radu I, Bartnikas R, Czeremuszkin G, et al. Diagnostics of Dielectric Barrier Discharges in Noble Gases: Atmospheric Pressure Glow and Pseudoglow Discharges and Spatio - temporal Patterns [J]. Plasma Science, IEEE Transactions on, 2003, 31(3): 411 - 421.

作者简介:

林德锋 (1982) 工程师, 研究方向为高压放电及电力系统继电保护;

罗书豪 (1988) 硕士, 助工, 研究方向为高压放电及电力系统继电保护;

廖广凡 (1985) 研究方向为高压放电及电力系统继电保护;

侯世英 (1962) 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压放电等离子体及应用, 电力系统电能质量;

邓庆 (1985) 研究方向为电力生产管理。

(收稿日期: 2015 - 06 - 16)

(上接第 37 页)

面最大电场强度随分裂半径的增加而减小, 且变化趋势逐渐变缓; 3) 分裂导线子导线半径、电晕笼尺寸相同的条件下, 导线表面最大电场强度随分裂数的增加而减少; 4) 在导线半径、分裂数、分裂间距等相同的条件下, 导线表面最大电场强度随电晕笼宽度的增加而减小; 5) 导线表面最大电场强度与导线上施加电压成近似正比的关系。所做分析对直流输电线路电晕放电现象的研究有一定的参考价值。

参考文献

[1] 刘琴, 谢雄杰, 石岩. 电晕笼内多分裂导线电晕损耗 [J]. 中国电力, 2011, 44(12): 32 - 35, 45.

[2] 关志成, 麻敏华, 惠建峰, 等. 电晕笼设计与应用相关问题的探讨 [J]. 高电压技术, 2006(11): 74 - 77.

[3] 甘运良, 卢铁兵. ±800 kV 直流输电线路分裂导线表面电场强度计算 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(6): 44 - 46.

[4] 刘云鹏, 曾文芳, 尤少华, 等. 在小电晕笼中分裂导线交流电晕的起始电压分析 [J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2302 - 2307.

[5] 冯天佑, 卞志文, 崔忠宁, 等. 基于特高压电晕笼的多分裂导线交流电晕特性研究 [J]. 高压电器, 2011, 47(9): 50 - 56.

作者简介:

徐渝淇 (1982) 工程师, 从事换流站运行与维护工作。

(收稿日期: 2015 - 07 - 27)