

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.03.003

基于子模型法 750 kV 变电站内导体三维工频电场分析及优化

马爱清¹, 赵天成¹, 陈吉²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 浙江嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 随着输电电压等级的提高, 变电站内导体周围电晕问题越来越严重。为研究变电站内导体周围起晕情况, 文中建立了甘肃某 750 kV 变电站内导体一跨的整体三维模型, 结合有限元仿真软件计算其整体电场分布。然后提取各部位的子模型(如跳线、线夹), 对其电场进行更为精确地计算, 并提出优化电场分布方案。结果表明: 导线表面的电场强度随导线分裂数的增加而下降, 采用四分裂导线取代二分裂导线可以降低跳线处表面最大场强, 最大电场强度由 2 512.54 V/mm 下降到 2 410.36 V/mm, 满足标准限值; 采用改良型六变二金具, 外侧线夹表面的电场强度比 T 型六变二金具外侧线夹表面电场强度下降了 1 174.79 V/mm, 降幅达到 35.36%, 可以有效的降低金具发生电晕现象。

关键词: 工频电场; 变电站; 三维模型; 有限元法; 子模型

Analysis and Optimization on Power-frequency Electric Field of Conductors in 750 kV Substation Based on Sub-model Method

MA Aiqing¹, ZHAO Tiancheng¹, CHEN Ji²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Zhejiang Jiaying Power Supply Company, Zhejiang Jiaying 314000, China)

Abstract: To analyze the corona onset around the conductor in a 750 kV substation in Gansu Province, an entire 3D model of single-pitch conductor is built with the software package Pro/E, and the whole electric field is calculated with finite element method. Then, the typical sub-models of such as jumper and fitting in the substation are built individually, and the electric field is calculated more accurately by refine-meshing. Finally, the reason of onset corona is analyzed and some suggestions of optimization are offered. Calculation result shows that: ① the electric field strength reduces with increasing split number of conductor, which is similar to that of 2D model; ② the maximum field strength around jumper is optimized by replacing two-split conductor with four-split conductor, and the maximum value reduces from 2 512.54 V/mm to 2 410.36 V/mm, satisfying the limiting value; ③ compared with the T-mode six-to-two fitting, the improved six-to-two fitting reduces the surrounding electric-field strength by 1 174.79 V/mm, that is a reduction rate of 35.36%, which can effectively weaken corona phenomenon.

Key words: power-frequency electric field; substation; 3D simulation model; finite element method (FEM); sub-model

0 引言

随着电能需求增加, 超高压输电线路增多, 电晕放电现象愈来愈严重。导线表面电场强度的大小直接影响电晕放电的严重程度, 最大场强所在位置正是电晕放电最为严重的地方。因此, 准确计算导线表面电场强度, 特别是导线表面最大电场强度

和电晕起始电场强度, 显得尤为重要。国内外有很多关于变电站工频电场分布的研究^[1-6], 常用的电场数值计算方法包括有限差分法^[7-8]、有限元法^[9-10]、边界元法^[11]、模拟电荷法^[12-13]和表面电荷法。文献中大多采用的是二维电场的计算方法, 变电站内部设备众多, 导线复杂交错, 二维电场计算已经不能完全表现变电站内部的实际情况。

三维模型可以考虑变电站内部导体的空间分布,可以较好地模拟出变电站内部实际导体分布情况,对实际工程的计算精度可以大大提高。文[14]采用三维模拟电荷法结合有限元软件对变电站户外区域 1.5 m 高度处电场进行了计算,结果表明在电气设备较少的区域和实际测量值较为吻合;文[15]运用有限元仿真软件 CDEGS 对超高压变电站电场进行了仿真计算,并对站内电场的影响因素及分布规律做了相应分析;文[16]采用线性电荷法,分别计算了高压输电线路铁塔附近及一档距内线路周围的三维电场强度分布,所采用的线电荷特点为同一线电荷段内电荷均匀分布。这些文章都是对大场域的整体模型^[17]电场分布的计算,但是对于高压变电站内部特定区域电场分布进行精确计算的报道较少。

文中利用三维绘图软件绘制 750 kV 变电站内线路中的一跨进行整体模型,结合有限元仿真软件对其进行了电场数值计算,得到了变电站内导体的整体电场分布,然后提取各部位的子模型,可以进行较为精确地仿真计算。文中针对容易出现电晕放电的两个点位,分别建立了相应的子模型,并通过子模型的数值仿真计算,分析其各自的起晕原因,并对其提出优化方案,为以后变电站建设提供理论依据和数据支撑。

1 子模型法简介

子模型法又称为切割边界位移法或特定边界位移法,是一种为了得到部分场域中更精细的解,而从整体场域分离出来部分区域的有限元方法。其基于圣维南原理分析方法,等效载荷代替实际的分布载荷后,应力和应变发生改变的位置就是加载载荷处,说明只有在施加载荷位置才有应力集中效应。如果子模型的位置避开应力集中处,则可以得到子模型的精确解。子模型法的计算流程图见图 1。

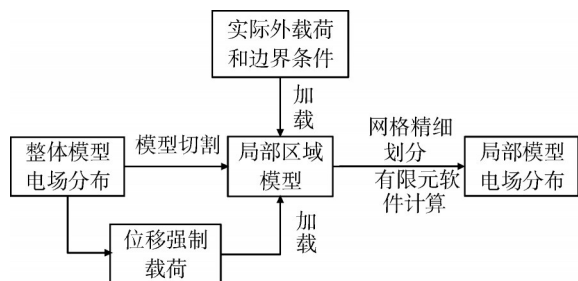


图 1 子模型法计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of sub-model method

使用子模型的优点有:①获得局部模型精确结果;②反复检验总体分析的局部精度是否足够,以便确定局部网格划分是否足够精确;③便于总体模型分析中简化处理某些局部几何特征,降低总体分析问题的规模;④提供了一种全新的设计思路,即对不同几何形式的子模型进行分析评估,然后进行定型。

在实际工程中(如变电站),主要关心的是其内部导体的电场分布,而不是整个变电站的电场分布。如果要获得局部区域精确的解,有两种方法:方法 1 用更为精细的网格对模型重新划分求解;方法 2 只针对关心区域进行网格划分,计算得到更精确的解。很显然,方法 1 计算量大,效率太低;方法 2 网格划分合理,计算速度快。

2 计算模型搭建

2.1 实际模型

以甘肃某 750 kV 变电站内出线一侧线路的一跨为例,说明变电站内存在电晕放电现象的特征区域见图 2。图 2 中上层导线 1 为避雷线;导线 2 为跨线距地高度为 41 m,弧垂 2.5 m;左下门形架下方为母线距地高度,其与跨线材料相同,均为二分裂 JLHN58K-1600 型铝钢扩径绞线,导线半径 35 mm,分裂间距 450 mm;地面上方为 6063 型管形母线,直径 250 mm;耐张绝缘子串由 43 片 U210BP/170 型组成,每片盘径 25 cm;母线、跨线及管形母线通过引下线连接,引下线材料同跨线。

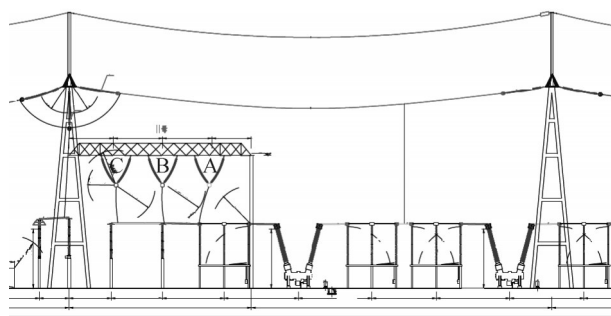


图 2 变电站电路图

Fig. 2 Circuit of substation

2.2 模型处理方法

在实际工程应用中,基于有限元分析(FEM)法的有限元仿真软件是最为准确的方法之一。文中通过三维绘图软件绘制三维电场模型,并通过接口无缝导入有限元仿真软件进行仿真计算。通过三维绘图软件建立的三维模型见图 3。

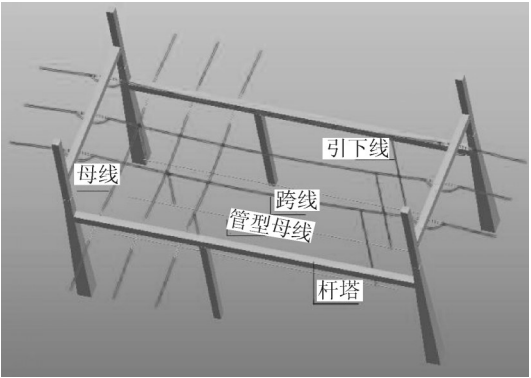


图3 单跨导体三维模型图

Fig. 3 3D model of single-span conductor

由于变电站电场计算属于 3D 复杂模型开域问题,整体模型较为复杂,需对计算模型进一步简化与处理,以观察导体周围工频电场分布^[18-19]。

- 1)分裂导线简化:用等效半径对分裂导线进行处理;
- 2)导线弧垂处理:直线导线代替弧垂导线。
- 3)模型网格剖分:有限元软件提供一种智能网格剖分法 SmartGrid,原则是保证精度的前提下,减少计算量;
- 4)边界条件加载:剖分好的模型求解之前要对其施加载荷,而且要求在跨线、引下线、金具、母线及地面上方的管型母线的中间相施加均为 $U_m = 750 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 612.37 \text{ kV}$ 的正电压,在边相上施加 $-U_m/2$ 的电压。

3 计算结果分析

3.1 整体模型表面场强计算

根据以上提供的方法和实际模型数据,对整体模型周围电场进行计算,结果见图 4。该模型最大电场为 2 634.78 V/mm,最大电场位于中间相跨线通过门形架正下方绝缘子端,这与二维模型计算结果一致。中间相是三相线路中最容易产生电晕放电的一相,因此三维子模型主要建立在中间相导线的表面及附近的区域。

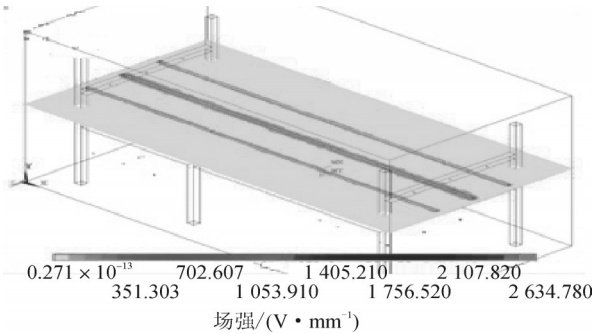


图4 导线表面场强计算结果

Fig. 4 Calculation result of electric field of conductor

3.2 分裂导线子模型表面电场计算

对于 750 kV 变电站内单跨线路这样的大场域来说,网格划分太大,无法反映不同结构分裂导线的电场分布;网格划分太小,计算量太大,影响效率。所以为了探索特定区域内导线表面的场强,子模型法可以很好地配合三维电场分布进行分析。

为保证模型的精确度,文中选取从 750 kV 变电站整体模型分离出的跨线中间相附近 $5 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 区域的电位情况建立分裂导线表面及周围子模型的边界条件。通过改变表 1 中导线的参数及布置形式,建立导线二分裂情况下的三维电场计算子模型,见图 5,三、四分裂导线子模型以此类推。通过加载边界条件,计算得到不同分裂形式下的电场强度最大值,并与文[20]中二维模型计算结果对比,见表 2。

表1 分裂导线参数及布置方式

Table 1 Parameter and layout of bundle conductor

分裂数	分裂间距/mm	子导线半径/mm	布置方式
二	450	35	平行
三	250	25	三角形
四	250	25	正方形

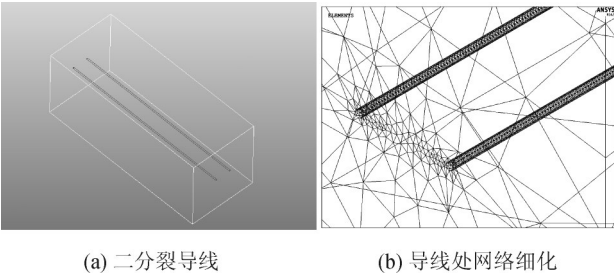


图5 二分裂导线三维子模型

Fig. 5 3D sub-model of two-bundle conductor

表2 不同分裂数导线的表面场强

Table 2 Electric field of conductor with different bundle number

维数	$E_{max}/(V \cdot mm^{-1})$		
	二分裂	三分裂	四分裂
二维	2 241.23	2 250.42	1 994.88
三维	2 236.15	2 116.41	1 729.87

从表 2 中可以看出,二分裂导线的二、三维计算结果相差 5.08 V/mm,相差 0.23%;三分裂导线的二、三维计算结果相差 134.01 V/mm,相差 5.95%;四分裂导线的二、三维计算结果相差 265.01 V/mm,相差 13.28%,这是由于三、四分裂导线在空间上的复杂度比较高,相比二分裂导线更容易受到周围电位的影响,容易产生较高的误差。二维和三维模型计算结果见图 6。

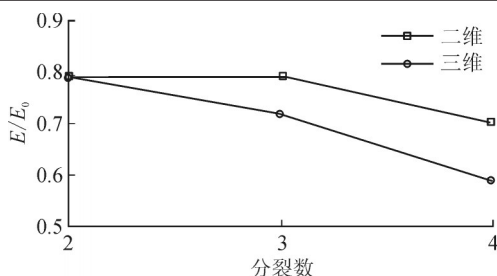


图6 二维和三维模型计算结果

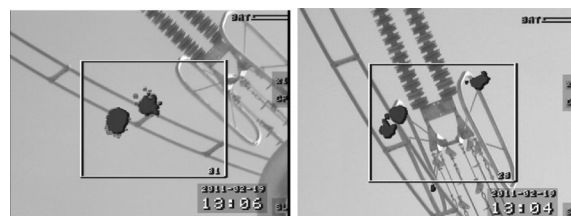
Fig. 6 Calculation results of 2D and 3D models

由图6可知,表面场强最大值与起晕场强的比值 E/E_0 随着分裂数增大而下降,该三维模型结果可以较准确得体现导线分裂数及布置形式对导体表面最大电场的影响,充分验证了采用三、四具有较二分裂导线具有更优良的电晕性能的结论。

综上所述,变电站内导线子模型表面场强最大值都小于变电站总体模型的场强最大值 2 634.78 V/mm,且误差值接近 15%,所以很有必要通过子模型法得到更精确的局部区域表面场强最大值。

4 变电站电晕区域电场分析及优化

变电站电晕放电通常依赖紫外线成像仪来进行观测,电晕放电观测是变电站的日常运检的一个重要环节,根据甘肃某已建成的 750 kV 变电站提供的紫外线图像观测结果来看,变电站内容易发生电晕现象的区域是经过门型架处的跳线和六变二金具,见图7。根据子模型法建立了 750 kV 跳线和六变二金具的三维模型并计算其周围电场分布。



(a) 跳线处电晕放电

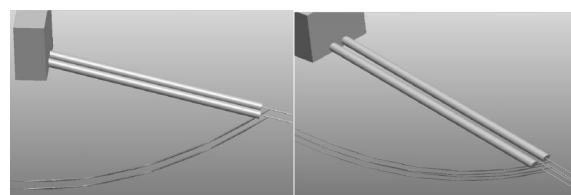
(b) 六变二金具处电晕放电

图7 电晕放电比较严重的区域

Fig. 7 Serious corona discharge district

4.1 跳线处电场分布及优化方法

750 kV 变电站跳线采用二分裂 JLHN58K-1600 型空心扩径导线,分裂间距为 450 mm,弧垂距离 5 300 mm,图8为跳线优化前后子模型示意图。



(a) 优化前

(b) 优化后

图8 跳线子模型示意图

Fig. 8 Sketch map of jumper sub-Model

经过加载求解后,计算结果见图9。二分裂跳线三维模型中,最大电场强度为 2 512.54 V/mm,其与起晕场强的比值 E/E_0 达到 0.885 7(由 Peek 公式求得 $E_0=2\ 836.75$ V/mm),已超出技术标准的最大限值(750 kV 不超过 88%来校验^[21]),设备一旦发生老化,该处极易产生电晕现象,应该积极改善电场分布。

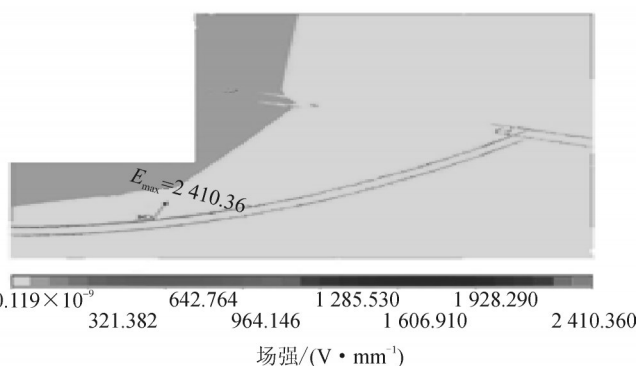
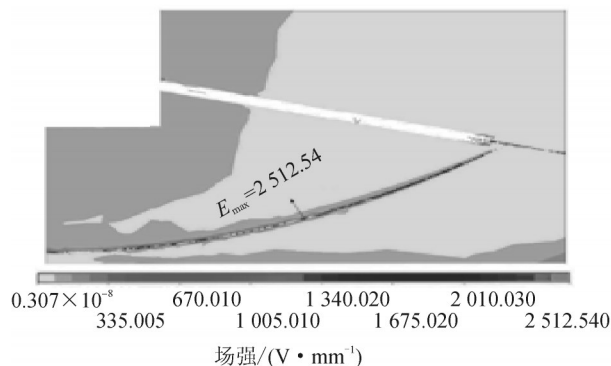


图9 跳线表面电场分布

Fig. 9 Electric field distribution of jumper

由3.2节结论知,可以通过利用四分裂导线取代二分裂导线来优化跳线处表面电场。建立四分裂导线三维计算模型,见图8(b),其中子导线的半径为 25 mm、分裂间距为 250 mm,计算结果见图9(b),最大电场强度为 2 410.36 V/mm,与二分裂导线相比降低了 102.18 V/mm,其与起晕场强的比值 E/E_0 为 0.849,满足技术标准最大限值。

4.2 六变二线夹表面电场分析及优化

750 kV 输电线路主要采用六分裂 LGJ-400/50 结构,而 750 kV 变电站内主要采用二分裂 JLHN58K-1600 型铝钢扩径绞线,从六分裂到二分裂的转换需要配套的金具官亭 750 kV 变电站出线部分采用 T 型六变二金具。通过三维建模软件建立的六变二金具模型见图 10。

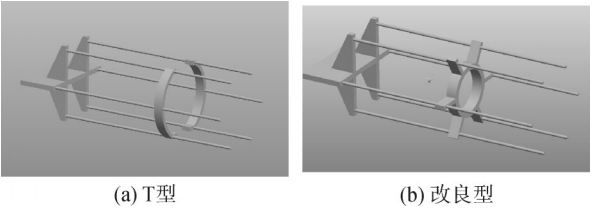


图 10 六变二金具三维模型示意图

Fig. 10 3D models of six-to-two fitting

图中两个半圆环部分即为 T 型六变二线夹, 在导体部分施加载荷及边界条件并计算, 电场分布计算结果见图 11。750 kV 变电站 T 型六变二金具附近的最大场强值达到 4 712.63 V/mm, 已远远高出起晕场强值, 而金具外侧线夹表面的电场强度为 3 322.68 V/mm, 也已经超出起晕场强值, 急需对周围电场进行优化改善。

由于 T 型六变二金具呈两个半圆环的形式, 处

于六分裂导线的外部, 金具的边缘有棱角, 容易引起周围电场的畸变, 造成局部场强过高而导致放电。为了改善该现象, 文中设计了一种改良型的六变二金具, 见图 10(b)。改良型六变二金具将金具的主体部分置入六分裂导线内部, 利用分裂导线的屏蔽作用改善金具表面的电场, 减少金具对外部电场的影响, 从而改善六变二金具处电晕放电的现象。

改良型的六变二金具周围电场分布的计算结果见图 11(b), 采用改良型六变二金具表面附近的最大场强值为 2 906.15 V/mm, 电场畸变有明显的改善, 而金具外侧线夹表面的电场强度约为 2 147.89 V/mm, 较 T 型六变二金具表面电场强度下降了 1 174.79 V/mm, 其与起晕场强比值 E/E_0 约为 0.752, 满足导线表面场强标准限值。

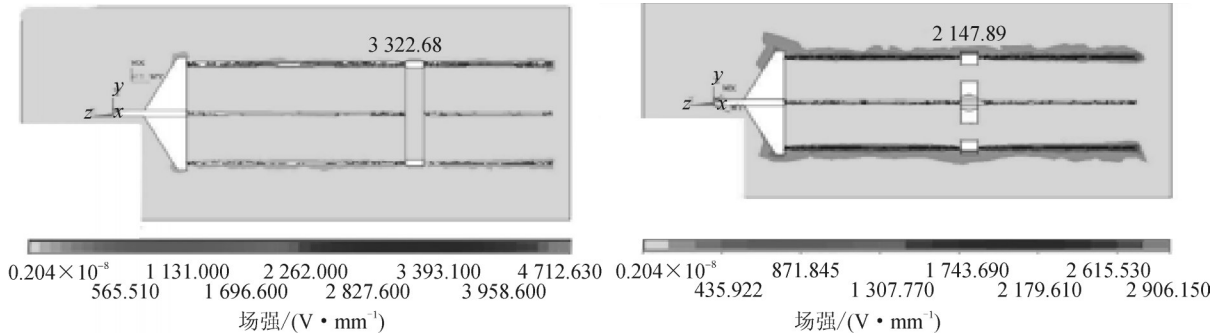


图 11 六变二金具电场分布

Fig. 11 Electric field distribution of six-to-two fitting

综上所述, 文中对跳线和六变二金具两处易产生电晕部位的表面电场进行计算并优化, 对比数据见表 3。

表 3 跳线和金具优化前后表面场强计算结果

Table 3 Calculation results of electric field for jumper and fitting before and after optimization

计算部位	优化前		优化后	
	$E/(V \cdot mm^{-1})$	E/E_0	$E/(V \cdot mm^{-1})$	E/E_0
跳线六变	2 512.54	0.885 7	2 410.36	0.828
二金具	3 322.68	1.171 9	2 147.89	0.752

由表 2 可知, 两者通过以上方法进行优化之后, 表面电场最大值均能满足标准最大限值, 即 $E/E_0 \leq 88\%$ 。

5 结论

文中基于有限元法和子模型法, 对甘肃某 750 kV 变电站导线一跨的整体和局部工频电场进行计算, 得出以下结论:

1) 三维模型计算结果指出变电站内最大场强处出现在门型架正下方绝缘子端, 与二维模型结果一致。导线表面电场随分裂数的增加而下降, 同时验证了采用三、四具有较二分裂线路具有更优良的电晕性能的结论;

2) 在跳线处用半径为 25 mm、分裂间距为 250 mm 的四分裂导线代替二分裂导线可以优化导线表面电场分布, 最大电场强度为 2 410.36 V/mm 小于起晕场强, 满足标准要求限值。

3) 改良型的六变二金具将主体内置于分裂导线中, 利用分裂导线屏蔽作用, 改善金具处电晕放电现象, 比 T 型金具有更优越的性能, 使得 $E/E_0 \leq 88\%$, 推荐使用这种新型的金具。

参考文献:

[1] 赵录兴, 吴桂芳. 1 000 kV 变电站工频电场和工频磁场的预测研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2003.
ZHAO Luxing, WU Guifang. Prediction of power frequen-

- cy electric field and magnetic field in 1 000 kV substation [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2006.
- [2] LEE B Y, PARK J K, MIN S W, et al. An effective modeling method to analyze the electric field around transmission lines and substations using a generalized finite line charge [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1143-1150.
- [3] 李乃一, 彭宗仁. 特高压变电站工频电场模拟计算及其分布规律[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2178-2188.
LI Naiyi, PENG Zengren. Calculation and regulation of power frequency electric field in UHV substation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2178-2188.
- [4] 梁振光, 董霞. 500 kV 变电站工频电场的测量[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 81-83.
LIANG Zhengguang, DONG Xia. Measurement and analysis of power frequency electric field in a 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 81-83.
- [5] ABDEL-SALAM M, EI-MOHANDES M TH, EI-KISHKY H. Electric field around parallel dc and multi-phase ac transmission lines[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1990, 25(6): 1145-1152.
- [6] ZHANG Bo, HE Jinliang, CUI Xiang, et al. Electric field calculation for HV insulators on the head of transmission tower by coupling CSM with BEM[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2006, 42(4): 543-546.
- [7] 黄道春, 阮江军, 余世峰, 等. 特高压紧凑型输电线路工频电场强度计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 69-71.
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, YU Shifeng, et al. Calculation of the power frequency electric field intensity of UHV compact transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 69-71.
- [8] 俞集辉, 周超. 复杂地势上超高压输电线路的工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 18-20.
YU Jihui, ZHOU Chao. Power-frequency electric field of EHV transmission lines under condition of complex landscape[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 18-20.
- [9] 甘艳, 阮江军, 邬雄. 有限元法分析高压架空线路附近电场分布[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 52-55.
GAN Yan, RUAN Jiangjun, WU Xiong. Analysis of the electric field intensity near high voltage transmission line by FEM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 52-55.
- [10] 张榴晨, 徐松. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
ZHANG Liuchen, XU Song. Application of finite element method in electromagnetic computation[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1996.
- [11] 李历波, 姚陈果, 陈攀, 等. 基于模拟电荷和边界元法的变电站工频电场分布仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(1): 39-43.
- LI Libo, YAO Chenguo, CHEN Pan, et al. Power frequency electric field calculation in substation by CSM and BEM[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(1): 39-43.
- [12] 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路3维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-73.
PENG Ying, RUAN Jiangjun. Calculation of three dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 69-73.
- [13] SINGER H, STEINBIGLER H, WEISS P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1974, 93(5): 1660-1668.
- [14] 杜志叶, 阮江军, 干喆渊, 等. 基于3D模拟电荷法的变电站工频电场计算[J]. 高电压技术, 2012, 376(10): 2587-2593.
QUAN Zhiye, RUAN Jiangjun, GAN Zheyuan, et al. Calculation of power frequency electric field in substation based on 3D the charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2012, 376(10): 2587-2593.
- [15] 曾庆禹. 特高压输电线路地面最大工频电场强度和导线最大弧垂特性[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 1-7.
ZENG Qingyu. Study on characteristics of maximum power frequency electric field gradient on ground and maximum sag of bundle conductor for UHVAC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 1-7.
- [16] 卢铁兵, 肖刊, 张波, 等. 超高压输电线路铁塔附近的三维工频电场计算[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 24-26.
LU Tiebing, XIAO Kan, ZHANG Bo, et al. Calculation of electric field distribution near EHV power towers[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 24-26.
- [17] 罗鹏, 杨峰, 周君杰, 等. 500 kV 超高压变电站整体工频电场仿真计算与测量分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(9): 67-73.
LUO Peng, YANG Feng, ZHOU Junjie, et al. Analysis of power frequency electromagnetic field in 500 kV substation during fault status[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(9): 67-73.
- [18] PAREKH H, SRIVASTAVA K D. Effect of avalanche space charge field on the calculation of corona onset voltage[J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 1979, EI-14(4): 181-191.
- [19] 安然, 鲁海亮, 蓝磊, 等. 变电站三维电场计算简化模型及误差分析[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3242-3248.
AN Ran, LU Hailiang, LAN Lei, et al. Analysis on simplified model and error of three-dimensional calculation for 3d electric field in substation[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3242-3248.

- transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 154-160.
- [16] 宋小弟,冯恩信,傅君眉,等. 分形天线工程及其新进展[J]. 无线通信技术,2008(2):48-54.
SONG Xiaodi, FENG Enxin, FU Junmei, et al. Fractal antenna engineering and its new progress[J]. Wireless Communication Technology, 2008(2): 48-54.
- [17] 殷立新. 分型阵列天线研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
YAN Lixin. Fractal array antenna research[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [18] 李明洋,刘敏,杨放. HFSS天线设计[M]. 北京:电子工业出版社,2011:19-74.
LI Mingyang, LIU Min, YANG Fang. Design of HFSS antenna [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 19-74.
- [19] 张微. GIS设备局部放电检测技术的试验研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
ZHANG Wei. Experimental study on partial discharge detection technology of GIS equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [20] 律方成,金虎,王子建,等. 252 kV GIS局部放电实验仿真平台的设计[J]. 高压电器,2014,50(7):21-23.
LYU Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. Design of the 252 kV GIS partial discharge experimental simulation platform[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 21-23.
- [21] 阮玲,高胜友,郑重,等. 宽带脉冲电流法局部放电检测方法的应用[J]. 高压电器,2009,45(5):80-83.
RUAN Ling, GAO Shengyou, ZHENG Zhong, et al. Pulse quantitative determination in partial discharge detection using wide bandwidth pulse current method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 80-83.
- 王永强(1975—),男,博士,副教授,硕导,从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断系统等方面研究。
- 张斌(1993—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

(上接第20页)

- [20] 马爱清,陈吉,马文立. 基于APDL的750 kV变电站内分裂导线结构优化[J]. 电力系统自动化学报,2016,28(8):85-90.
MA Aiqing, CHEN Ji, MA Wenli. Structural optimization of split conductors in analysis on corona field of lines in 750 kV substation based on APDL[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 85-90.
- [21] 110~750 kV 架空输电线路设计技术规范: QGDW_179—2008[S], 2008.
Code of design 110~750 kV overhead transmission line: QGDW_179—2008[S], 2008.
- 马爱清(1975—),女,博士,副教授,硕士生导师,从事高电压及其绝缘方面的研究、高压电气设备绝缘结构数值计算与结构优化、高压输电线路电磁环境数值分析等研究。
- 赵天成(1991—),男,硕士研究生,从事高电压及其绝缘方面的数值模拟研究。