

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.008

± 500 kV 换流站直流场金具表面电场数值计算

周 胜¹, 杜志叶¹, 阮江军¹, 金 硕¹, 董志勇¹, 胡 蓉², 孙帮新²

(1. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072; 2. 南方电网超高压公司, 广州 510620)

摘要: 直流换流站高压设备金具表面电场的准确计算有助于电晕控制以及防电晕设计。针对换流站直流场设备复杂、计算区域大、对特殊金具局部表面电场计算精度要求高的特点,以某 ± 500 kV 换流站直流场为研究对象,基于电场数值计算方法,建立 3D 有限元仿真模型,对整个直流场设备进行电场计算,获得了各部位的电位和电场分布计算结果。通过对全模型计算结果进行分析,对其中需要重点关注的部位采用了子模型进行了更精确的求解,获得了更加准确的电场强度数值。最后基于 Peek 公式对直流场各金具进行了电晕控制安全裕度的评估,结果表明直流场各金具表面最大场强符合电场控制要求,研究结果可为超、特高压换流站直流场的设计、规划提供参考。

关键词: 直流场; 金具; 子模型; Peek 公式; 最大场强

Numerical Solution of the Surface Electric Field of the Fittings in DC Field of ± 500 kV HVDC Converter Station

ZHOU Sheng¹, DU Zhiye¹, RUAN Jiangjun¹, JIN Shuo¹, DONG Zhiyong¹,
HU Rong², SUN Bangxin²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. EHV Company, CSG, Guangzhou 510620, China)

Abstract: The accurate calculation of the surface electric field on equipment fittings in HVDC converter station will help to make corona control and anti-corona design. For HVDC converter station field is of complicated equipment, large computational domain, high precision of special fittings local surface field computing, a ± 500 kV HVDC converter station field is taken for the study. Based on field numerical calculation method, 3D finite element simulation model of the entire DC field equipment is built for field computing, and the calculation of various parts of the potential and the electric field distribution is obtained. Through the results of the full model analysis, the parts which need to be focused on are more accurate solved by the use of sub-models, and a more accurate value of the electric field strength is gotten. Finally, based on the Peek formula, the corona control margin of safety assessment for all fittings in DC field is made. Results show that DC field with each fittings surface electric field control of the maximum field strength in line with the requirements, the results can provide reference to the design and planning of extra-and ultra-high voltage direct current converter station.

Key words: DC field; fitting; sub-model; Peek formula; maximum field strength

0 引言

换流站承担着交/直流转化的重要作用。换流站直流场布置有直流避雷器、直流电流互感器、平波电

抗器、滤波电容器等诸多设备。上述设备的连接和组合通过金具实现,各种形式的金具起着传递机械、电气负荷和对主要设备进行电磁防护的作用。对换流站直流各场量进行计算,有助于了解换流站直流场电位分布,实现各设备的合理布置,确定各个连

收稿日期:2016-07-17; 修回日期:2016-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477120)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51477120).

接处的金具形态和尺寸大小,使换流站直流场场强关注在合理的水平,保障换流站的安全稳定运行。

目前,国内对于换流站计算方面的研究主要集中在阀厅方面;对于直流场的研究,主要集中在污秽以及外绝缘方面^[1-3],直流场金具电场的计算研究相对较少。文[4]对 ± 800 kV 隔离开关进行了电场方面的计算,对隔离开关的设计具有指导意义;文[5]对比了是否考虑绝缘支柱内部恒定电场情况下直流场金具场强的大小,得出了不考虑绝缘材料内部传导电流,采用静电场分析方法对直流场金具表面电场分布进行分析安全裕度更高的结论。关于阀厅部分的计算;文[6]提出了模块化与独立化的建模方法,并利用并行求解方法实现阀厅建模及求解,该方法解决了大规模计算量问题。其他一些文献^[7-10]大多侧重于阀厅换流变压器套管等一些设备内部的数值模拟,或者换流站绝缘配合方面的分析。文[11-16]针对 ± 500 、 ± 600 、 ± 800 kV 的阀厅进行了全模型数值计算,并采用子模型法^[14-15]实现了阀厅金具表面电场的精确求解,对于直流场的计算具有一定的借鉴意义。相比之下,直流场模型金具更多、计算域更大,对于剖分和计算效率的要求更高。

文中以某 ± 500 kV 换流站直流场金具表面电场数值计算项目为依托,研究高压换流站直流场金具表面电场的建模和数值计算方法。根据实际图纸,对直流场设备建立 3D 模型,进行静电场计算和分析,重点采用有限元法获得直流场设备正常工作时表面电场的分布特征,找出其各金具表面场强最大处,分析其是否起晕;若起晕,则进行相应优化。对于重点关注区域则进行了子模型求解。研究结果可为超、特高压换流站直流场的设计、规划提供参考,对特高压换流站直流场金具国产化有一定推动作用。

1 直流场模型

1.1 直流场整体模型布局图

± 500 kV 换流站直流回极整体图,见图 1。图 1 中的直流 1 回极 1 和直流 1 回极 2 表现为对称结构,中间部分为接地极。

1.2 直流场整体模型

由于换流站直流场设备结构复杂、数量众多、种类繁多,且计算区域大。计算金具表面的电场强度,需要对金具表面法向网格的尺寸进行精细的控制,但随着控制单元尺寸的减小,剖分单元的数量将大大增加,计算内存消耗会超过硬件容量。为了同时在计算精确度和计算资源两方面达到较高的效率,建模时,考虑到整体图的对称性,采用了半模

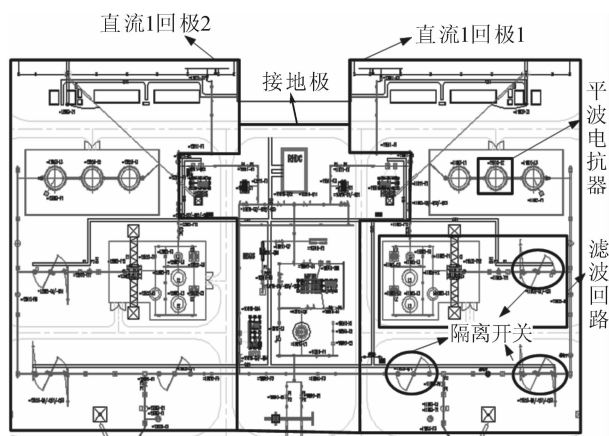


图 1 ± 500 kV 换流站直流回极整体图

Fig. 1 ± 500 kV HVDC converter station field overall layout

型处理,只搭建了右边的直流 1 回极 1 线路。模型见图 2。该模型主要包括平波电抗器、滤波电容器组、断路器、隔离开关、避雷器等主要设备以及相应的连接金具。

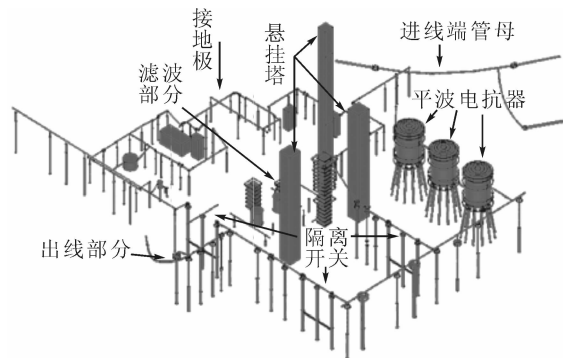


图 2 整体模型

Fig. 2 Whole model of the DC field

2 直流场全模型计算

2.1 静电场加载求解结果

换流站直流场各电气设备工作电压为直流电压,计算其金具表面电场时,各点的电位按照正常电位的 1.05 倍加载。所有高压回路的管母、球、环等均加载高电位 525 kV。所有与地相接的金属部分等都加载低电位 0 V。其余如直流 1 回极 1 与接地极相连的隔离开关中间均压环和管母等则为悬浮电位。计算得到的整体电位分布情况见图 3,整体电场分布见图 4。

从图 4 的计算结果可以看出,直流场中的最大场强出现在进线部分绝缘子均压环上,最大场强值为 19.38 kV/cm,其附近局部电场分布见图 5。此处出现较大场强的主要原因,是该均压环的尺寸较小,管径 80 mm,环径为 640 mm。致使该均压环的

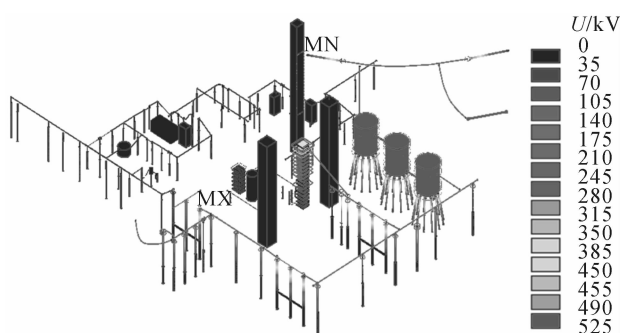


图3 整体电位分布

Fig. 3 Electric potential distribution of whole model

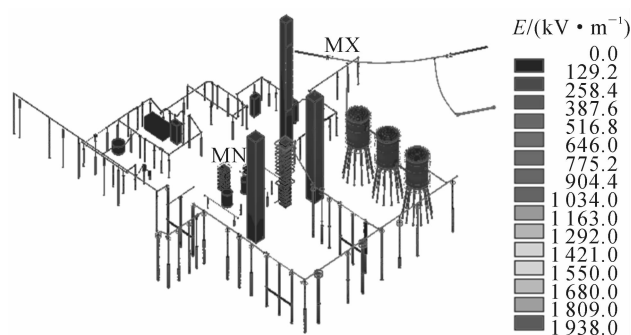


图4 整体电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of whole model

曲率半径过小,因而出现了较大的场强。

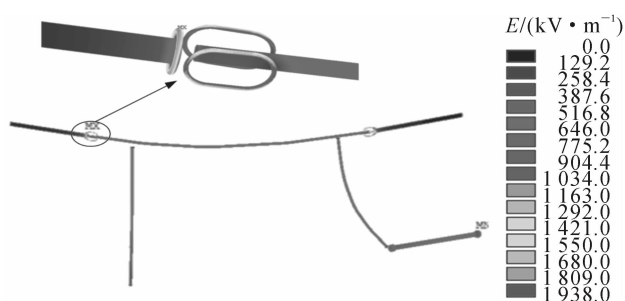


图5 进线部分电场分布图

Fig. 5 Part of the electric field distribution of the line

此外,电场相对较大的部位还有出线侧与接地极相连的隔离开关的均压环表面,其最大场强值为 17.75 kV/cm ,局部场强分布见图6。隔离开关出现较大场强的均压环同样尺寸比较小,其中均压环管径为 100 mm ,环径为 1100 mm 。除了尺寸较小外,隔离开关两侧电位差较大也是造成此处场强较大的一个主要原因。

模型中其他部位的最大场强主要出现在与隔离开关均压环相同尺寸的支柱绝缘子均压环表面,其最大场强值均在 16 kV/cm 以下。其余设备金具表面的场强相对较小,因此不再作详细讨论。

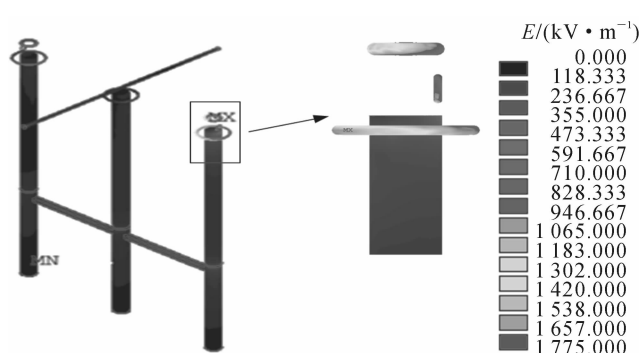


图6 隔离开关局部电场分布图

Fig. 6 Isolating switch local electric field distribution

2.2 子模型加载求解结果

子模型法又称切割边界未依法、切边约束法、特定边界位移法等。其基本思想是从原模型中以合理大小的边界区域切割出一部分作为子模型,并以整体模型计算结果,或称为粗计算结果,在此部分边界上进行差值作为边界条件。其优势在于:

1)根据切割区域的实际情况,可以减少甚至避免有限元模型中载荷的传递过程,进而简化其传递区域,便于提升计算速度。

2)可根据实际需要和计算机硬件处理能力,合理加密关注区域的有限元网格尺寸,得到更精确的结果。

3)通过分析子模型加密后的计算结果,并与粗模型比较,计算粗模型的精确度。

静电场计算中,由于直流场模型复杂,器件众多,同时还受计算机配置的限制,难以同时兼顾计算精度和速度,部分区域的网格划分可能比较疏,对计算精度有一定影响。鉴于此,通过采用子模型法对直流场环境中的重点关注区域或场强较大处进行进一步处理,能够检验之前“粗计算”得到的结果是否可靠。

文中重点关注高压部分金具表面电场强度,尤其对于场强较大部分应重点关注。进线部分绝缘子均压环和高压回路与接地极处隔离开关均压环两处电场强度比较大,子模型可在这两处选取。

对于进线部分,子模型边界区域选取包围其的立方体空间(由3个小立方体组成)。其中均压环的剖分尺寸控制在 10 mm ,管母尺寸控制在 20 mm ,相比原模型缩小2到4倍。子模型总体单元数为1900万(粗模型单元数约为160万)。子模型见图7。

从原模型中提出与子模型切割边界处的计算结果并插值,对于模型中加载与原模型相同的激励,进行静电场求解。在子模型切割边界上选取一条路径,得到其电场分布结果,与原模型中相同路



图 7 进线部分子模型

Fig. 7 Into line sub-model

径上的计算结果比较,见图 8。

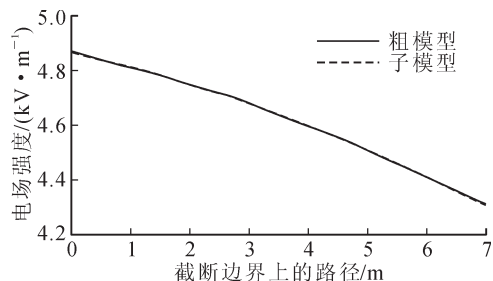


图 8 路径结果对比

Fig. 8 Comparison electric field calculation results on path

由图 8 可知,子模型与原模型在相同路径下的计算结果吻合度较高,最大误差在 2%以内,说明切割边界选取合适,子模型计算结果可靠(隔离开关处子模型路径验证与此处相似,都在 3%以内),其场云图结果见图 9。

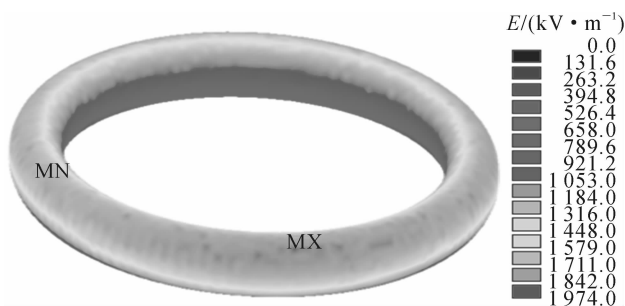


图 9 进线部分导线左端均压环电场图

Fig. 9 Left portion of the wire into the line equalizing ring field

相比于原模型,进线部分绝缘子端部均压环上最大电场值由 19.38 kV/cm 增加到 19.74 kV/cm,误差 1%。主要原因是此部分为重点关注区域,粗模型计算时,这部分剖分已经很精细了,为 20 mm,子模型剖分尺寸为 10 mm。

直流 1 回板 1 与接地极之间的隔离开关子模型(模型图不再展示)的电场计算结果见图 10。

相比于原模型,隔离开关均压环上最大电场值由 17.55 kV/cm 增加到 19.19 kV/cm,误差 10.9%。主要原因是为减少计算量,原模型均压环剖分尺寸偏大,导致圆角处网格较大,从而使计算存在一定

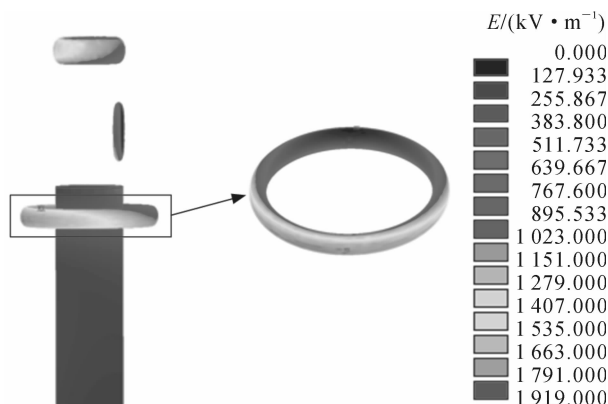


图 10 隔离开关子模型局部电场图

Fig. 10 Local electric field of the disconnector sub-model

的误差。均压环粗模型剖分尺寸为 80 mm,子模型为 30 mm。

3 安全裕度的评估

换流站直流场中球状金具比较少,集中在管母两端,其场强计算结果一般不大;根据计算结果显示,最大场强一般出现在均压环上,因此重点讨论均压环和管母上的起晕场强。

美国工程师皮克(F.W.PEEK)最早对输电线上的电晕现象进行了一系列实验研究,总结出一系列经验公式(如导线表面的起晕场强、导线起晕电压、起晕导线的功率损耗等),即 Peek 公式。

$$E_{\text{onset}} = E_0 m \delta \left[1 + \frac{k}{(\delta r)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

式(1)中, E_0 和 k 是两个经验常数。对交流线路来说 $E_0=30.3$ kV/cm, $k=0.298$ 。对于直流线路,通常认为 $E_0=33.7$ (正极)或 31.0 (负极)kV/cm; $k=0.24$ (正极)或 0.308 (负极)。

式(1)中: E_{onset} 为标准大气条件下(101.3×10^3 Pa, 20°C)导线表面起晕场强,kV/cm; δ 为空气相对密度,标准大气条件下 $\delta=1$; r 为导线半径,cm; m 为反应导线表面状况的粗糙系数,平滑非绞合导线 $m=1$,不光滑导线全面电晕 $m=0.82$,不光滑导线局部发生电晕 $m=0.72$ 。

换流站直流场中直流避雷器均压环、隔离开关均压环、电压互感器和电流互感器均压环、管母等都属于圆柱形导体。对这一类型导体,现有文献资料中很少有相关的试验数据,而且限于试验条件,笔者没有进行相应的试验研究。文[13]基于圆柱导体的起晕场强经验公式,提出了针对阀厅不同尺寸均压环的起晕场强控制值。考虑到直流场金具设备工作在户外场环境中,一方面温度和湿度变化较大,

另一方面由于均压环相对导线来说, 比较光滑, 而且环形的起晕场强比管形起晕场强要大, 再综合考虑过载倍数, 将表面粗糙系数定为 0.8。根据 Peek 公式, 计算得到标准大气压下 ($\delta=1$), $E_0=31.0$, $k=0.308$ 下不同尺寸均压环的起晕场强见表 1。

表 1 均压环起晕场强控制值

Table 1 Corona control electric field value of corona rings in DC field

均压环管 径/mm	50	60	80	100	200	250
起晕场强控制 值/(kV·cm ⁻¹)	29.36	29.21	28.62	28.22	27.21	26.96

结合表 1 和直流场计算结果分析可知:

1) 直流高压部分各均压环管径均分别为 50~100 mm, 最大值出现在进线部分绝缘子均压环上, 为 19.38 kV/cm, 低于最低起晕场强控制值 28.22 kV/cm, 说明从电晕控制角度来讲, 高压部分各均压环均能在换流站直流场环境中安全稳定运行。

2) 该换流站直流场中所选管母直径均为 250 mm, 对于管母起晕场强的估计, 仍采用 Peek 公式进行计算, 计算得到管母的起晕场强为 26.96 kV/cm。而通过计算得到管母最大场强小于 16 kV/cm。可以得出, 管母能安全稳定运行。

4 结论

通过分析, 可以得出:

1) 文中通过对某 ± 500 kV 换流站直流场搭建了 3D 有限元建模, 考虑平波电抗器、滤波器、高压直流断路器、避雷器、联接金具及管母等的作用, 采用静电场加载方式计算, 获得了较为准确的金具表面场强值, 并通过子模型对关键部分计算结果进行了验证。经过分析计算, 最大场强值出现在进线端绝缘子均压环上, 为 19.38 kV/cm, 其余位置场强均小于此处。

2) 考虑到直流场模型设备结构复杂、数量众多, 为了保证计算速度牺牲了部分精度, 为此采用了子模型法对重点关注区域的场强进行了进一步精确求解。结果显示, 部分金具由于剖分尺寸较粗, 对于结果的影响较大, 达到了 10% 左右。

3) 采用 Peek 公式对换流站直流场金具电场进行校核, 并结合环境因素考虑一定的过载倍数, 得到直流场均压环的起晕场强控制值。结合对应的起晕场强控制值可以发现, 换流站直流场各个部位的最大场强均低于起晕场强控制值, 从场强控制角度来讲均存在一定的裕度。

参考文献:

- [1] 申卫华, 胡明, 王黎彦, 等. 特高压直流换流站直流场型式比较及选择[J]. 电力建设, 2007, 28(5): 8-11.
SHEN Weihua, HU Ming, WANG Liyan, et al. Model comparisons and selection of UHVDC converter station DC field[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(5): 8-11.
- [2] 宿志一, 尚涛, 王代荣. 高海拔直流场设备污秽性能试验研究[J]. 电力设备, 2005, 6(6): 23-26.
SU Zhiyi, SHANG Tao, WANG Dairong. Test study on pollution characteristics of DC equipments at high altitude areas[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(6): 23-26.
- [3] 郭贤珊, 宿志一, 乐波. 特高压直流换流站支柱绝缘子设计[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 1-6.
GUO Xianshan, SU Zhiyi, YUE Bo. Design of post insulator for UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 1-6.
- [4] 田冀焕, 沙彦超, 周远翔, 等. 800 kV 等级高压隔离开关的交、直流电场仿真计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1216-1223.
TIAN Jihuan, SHA Yanchao, ZHOU Yuanxiang, et al. Simulation of AC and DC electric field for 800 kV grade high voltage disconnector[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1216-1223.
- [5] 胡蓉. ± 500 kV 换流站直流场电场分析及金具表面电场计算[J]. 电瓷避雷器, 2014(6): 55-98.
HU Rong. Electric field analysis and fitting surface electric field calculation of ± 500 kV HVDC converter station DC field[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(6): 55-98.
- [6] 田冀焕, 周远翔, 郭绍伟, 等. 直流换流站阀厅内三维电场的分布式并行计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1205-1210.
TIAN Jihuan, ZHOU Yuanxiang, GUO Shaowei, et al. Distributed parallel computation of the 3D electric field in the HVDC converter valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1205-1210.
- [7] 李文平, 章忠国, 黎小林, 等. 直流输电用 800 kV 换流变压器的场域分析[J]. 变压器, 2009, 46(6): 1-5.
LI Wenping, ZHANG Zhongguo, LI Xiaolin, et al. Field analysis of 800 kV converter transformer for DC transmission[J]. Transformer, 2009, 46(6): 1-5.
- [8] 张喜乐, 王建民, 吴增泊, 等. 超高压直流换流变压器阀侧引出线电场的数值分析[J]. 变压器, 2009, 46(7): 1-4.
ZHANG Xile, WANG Jianmin, WU Zengbo, et al. Numerical analysis of electric field in valve side lead-out wire for UHV DC converter transformer [J]. Transformer, 2009, 46(7): 1-4.
- [9] 李季, 罗隆福, 许加柱, 等. 换流变压器阀侧绝缘电场特性研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 121-124.
LI Ji, LUO Longfu, XU Jiazhu, et al. Study on electric field

- characteristics at ends of valve-side winding in converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 121-124.
- [10] 陈庆国, 张杰, 高源, 等. 混合电场作用下换流变压器阀侧绕组电场分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 484-488.
- CHEN Qingguo, ZHANG Jie, GAO Yuan, et al. Analysis of complex electrical field on valve side winding of converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 484-488.
- [11] 王栋, 阮江军, 杜志叶, 等. ± 500 kV 直流输电系统换流站阀厅内金具表面电场数值求解[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 404-410.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Numerical solution of the surface electric field of electric power fittings in ± 500 kV DC converter station valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 404-410.
- [12] 王栋, 阮江军, 杜志叶, 等. ± 660 kV 直流换流站阀厅内金具表面电场数值求解[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2594-2600.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Numerical solution of electric power fittings about surface electric field in ± 660 kV DC converter station valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2594-2600.
- [13] 杜志叶, 阮江军, 詹婷, 等. ± 660 kV 阀厅金具电场分布计算及优化研究[R]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- DU Zhiye, RUAN Jiangjun, ZHAN Ting, et al. Research on the calculation and optimization of the surface electric field of electric power fittings in ± 660 kV valve hall[D]. Wuhan: Wuhan University 2012.
- [14] 王栋, 阮江军, 杜志叶, 等. 直流换流站阀厅内部场域电位和电场强度子模型法数值求解[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 158-163.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Numerical solution of potential and electric field intensity in field domain of valve hall of DC converter station by sub-model method[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 158-163.
- [15] 阮江军, 詹婷, 杜志叶, 等. ± 800 kV 特高压直流换流站阀厅金具表面电场计算[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 2916-2923.
- RUAN Jiangjun, ZHAN Ting, DU Zhishe, et al. Numerical solution of electric power fittings about surface electric field in ± 800 kV UHVDC converter station valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2916-2923.
- [16] 姬大潜, 刘泽洪, 邓桃, 等. 特高压直流输电系统稳态运行时高端阀厅内部的电场分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3000-3008.
- JI Daqian, LIU Zehong, DENG Tao, et al. Analysis of overall electric field in high-voltage valve hall end on steady state of UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3000-3008.
- [17] BOLEY B A. Some observations on saint-venant's principle [C]//Proceedings of the 3rd US National Congress of Applied Mechanics. New York, USA: [s.n.], 1958: 259-264.
- [18] 许安, 何大猛, 刘守豹, 等. ± 500 kV 德阳换流站支柱绝缘子放电故障电场计算分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(3): 12-19.
- XU An, HE Dameng, LIU Shoubao, et al. The electric field analysis on ± 500 kV post insulator with discharge failure in deyang converter station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(3): 12-19.

周胜(1990—), 男, 硕士生, 研究方向为电磁场计算、高电压与绝缘技术。

杜志叶(1974—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电磁场数值计算、高电压与绝缘技术、特高压直流输电关键技术等方面的研究工作。

(上接第42页)

电磁场理论及其应用。

叶齐政(1965—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电磁场理论与气体放电研究。

李兴旺(1985—), 男, 硕士, 主要从事高压开关、绝缘诊断

技术测试等研究工作。

王增彬(1983—), 男, 博士, 主要从事高压设备沿面闪络、状态诊断和绝缘诊断研究工作。