

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.013

牵引变压器套管电场分布计算与绝缘破坏分析

邓志祥¹, 彭宗仁¹, 殷凤伟², 赵志强³, 吴昊¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 长春研奥电器有限公司, 长春 130113;
3. 长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

摘要: 高速列车牵引变压器套管易出现绝缘击穿事故,严重影响列车的供电安全。探索牵引变压器套管的电场分布有利于找出绝缘的薄弱点。笔者结合牵引变压器套管的设计方案与安装环境,采用有限元方法计算了其电场分布,分析了电场分布规律以及制造和运行过程中各类缺陷对电场分布产生的影响。在仿真的基础上,分析了造成绝缘破坏的可能原因,并提出了优化屏蔽网和电容测试端子的绝缘结构,提高工艺水平,采用半导体材料制作屏蔽网等改进措施。

关键词: 高速列车; 牵引变压器套管; 电场计算; 缺陷; 绝缘击穿

Calculation of Electric Field Distribution and Analysis of Insulation Breakdown for Traction Transformer Bushings

DENG Zhixiang¹, PENG Zongren¹, YIN Fengwei², ZHAO Zhiqiang³, WU Hao¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Changchun Yan'ao Electrical Appliance Co., Ltd., Changchun 130113, China; 3. Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: Insulation breakdown accidents may happen on traction transformer bushings of high-speed train to severely harm the power supply security of the high-speed train. Exploring the electric field distribution of the bushings can help to find out the weak spot of the insulation. In this paper, the electric field distribution is calculated and analyzed with FEM method considering the design of the bushing and the installation environment. The influences of various defects in manufacturing and operation processes on the electric field distribution are investigated. Simulation is conducted to analyze possible factors causing insulation breakdown. Furthermore, some countermeasures against insulation breakdown of a traction transformer bushing are offered, such as optimizing structures of the shielding net and capacitance testing terminal, improving manufacture technique, and adopting semiconductive material for shielding net.

Key words: high-speed train; traction transformer bushings; electric field calculation; defects; insulation breakdown

0 引言

高速列车的运行主要靠电力提供动力。牵引变压器将高压交流电能降压处理传送给牵引变流器,为列车的传动系统提供电能,其安全可靠运行对列车的供电安全至关重要^[1-2]。高速列车牵引变压器套管连接了高压电缆和牵引变压器,处于“咽喉”的重要位置。中国高速列车出现多起牵引变压器套管绝缘破坏和击穿事故。牵引变压器套管一旦发生绝

缘事故,不仅损害套管本身,还可能造成牵引变压器的损坏,并造成列车供电中断,导致列车趴窝,造成巨大的经济损失和不良的社会影响。目前,国内外文献鲜有高速列车牵引变压器套管的绝缘性能的相关报道。计算牵引变压器套管的电场分布,有利于发现套管绝缘结构的薄弱点,找出绝缘破坏的可能原因,对牵引变压器套管的绝缘结构优化设计提供一定的理论依据。

笔者介绍了高速列车牵引变压器套管的运行工况、结构和安装环境。结合相关设计图纸与现场

测量,利用有限元分析软件,建立牵引变压器套管电场分布计算模型,得到套管的电场分布,并结合套管制造以及运行过程中可能产生的缺陷,计算缺陷对套管电场分布的影响,并分析造成套管绝缘破坏的可能原因,提出了相应的建议。

1 高速列车牵引变压器套管

1.1 高速列车牵引变压器套管的运行工况

目前中国高速铁路牵引供电系统采用单相工频 25 kV 的供电方式,供电臂侧的电压为 27.5 kV^[3],因此套管额定工况下承受的电压为 27.5 kV。由于高速列车的运行特点,牵引供电系统容易产生频繁的过电压,主要包括分相过电压、弓网离线过电压等。文[4]的研究表明,动车组在过分相时将产生幅值为 75~110 kV 的过电压,而列车运行时每天将承受将近一百次分相过电压。另外,由于车体和弓网的振动,线路不平顺等干扰,弓网离线频繁,并产生瞬态冲击电压,其幅值为正常工作电压的 1.25~1.6 倍。弓网离线过电压幅值虽然在设备可以承受的范围之内,但是它伴随动车组的运行一直存在,会加速绝缘的老化,对设备的寿命与安全运行产生不利影响。此外,由于列车的高速运行与车体的轻量化设计,车体及车内设备在运行时都会承受一定的机械振动^[5],这对套管的长期安全运行也是不利的。

1.2 高速列车牵引变压器套管的结构与安装环境

牵引变压器套管的结构见图 1,主要包括铜质导电杆、接地屏蔽网、配合接口、环氧树脂柄、固定法兰、连接螺栓等部分。套管采用铜制造中心导杆,其导热与导电性能优异。屏蔽网为铜丝编织的网状结构,使套管内部电场均匀化,避免在某些区域出现过高电场。屏蔽网的端部卷制了一定曲率半径的金属翻边,避免屏蔽网端部由于边缘效应出现局部电场集中。套管的主绝缘为混有一定填料的环氧材料,具有电气及力学性能优异、耐腐蚀、体积小、重量轻等优点^[6]。套管配合接口插入电缆的 T 型终端,并与电容测试端子连接。套管的环氧树脂柄插入变压器油箱中。

根据电磁场理论,套管的电场分布受周围环境中各设备的影响,在建立套管的电场计算模型时,必须将套管的安装环境考虑进来^[7]。牵引变压器套管以及电缆 T 型终端处于安装于高速列车车厢下方的狭小空间内,设备布局紧凑,且容易积污,易发生绝缘破坏。套管配合接口插入电缆 T 型终端,与电缆建立电气连接。T 型终端包括电缆侧和套管侧两部分,由于电缆侧对文中分析结果影响较小,故可以忽略。T 型终端套管侧包括硅橡胶外护套,电容

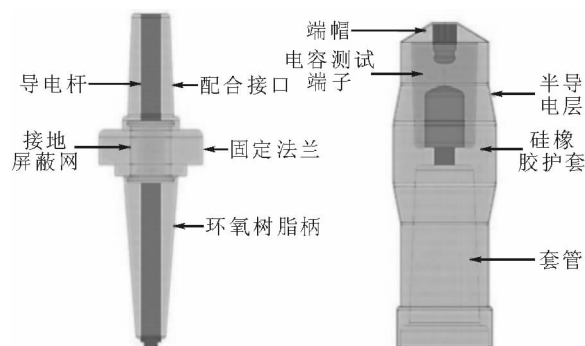


图 1 套管及 T 型终端结构示意图

Fig. 1 Structure of bushing and type-T termination

测试端子,端帽等部分,如图 1 所示。外护套表面喷涂一层半导体材料并接地,使外护套表面屏蔽并确保处于地电位。

2 电场分布有限元计算

2.1 计算模型

由于附近的车厢壳体和牵引变压器不满足轴对称性,对电场分布具有一定的畸变作用。因此,为保证计算的精确性,需要建立三维全模型。根据相关的设计图纸和现场测量,文中建立了如图 2 所示的计算模型。模型主要包括牵引变压器油箱、牵引变压器套管、电缆 T 型终端套管侧、法兰压接金具、距离套管较近的车厢壳体等对套管电场分布影响较大的设备及金具,忽略了其他对套管电场影响较小的设备及金具^[8-12]。

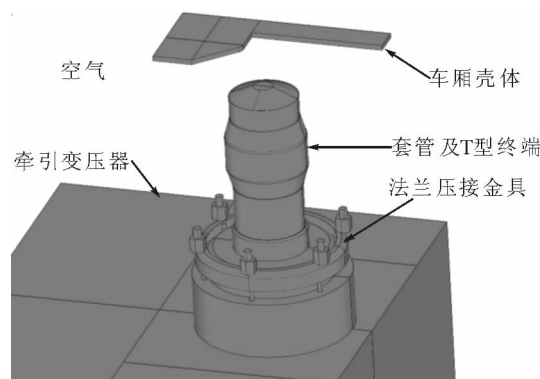


图 2 电场计算模型

Fig. 2 Calculation model of electric field

2.2 边界条件和网格划分

牵引变压器套管的电场计算问题属于第一类边界问题。计算时,给牵引变压器套管中心导杆赋予高电位,给空气边界和零电位导体赋予零电位。考虑额定运行工况时,套管中心导杆施加的电压为 27.5 kV。由于模型的形状并不规则,在网格划分时,采用三维四面体单元自由划分^[13-17]。网格划分后总共形成了 1 701 374 个节点。采用共轭梯度法进行

求解,并在内存为 72 GB 的工作站上进行,求解需要 5 min。

2.3 计算结果及分析

套管各部位的电场分布见图 3。从图 3 可以看到,套管的高场强区集中在铜屏蔽网上下边沿内侧以及中心导杆表面。套管的中心导杆表面电场最高

达到 3 203 V/mm。铜屏蔽网上边沿的电场最大可达 2 769 V/mm,下边沿侧最大场强为 3 148.2 V/mm。T 型终端的电容测试端子的电极外边沿电场最高,达到 3 962 V/mm。因此,中心导杆表面、铜屏蔽网的金属翻边和电容测试端子的电极边沿是绝缘电气性能的薄弱区域。

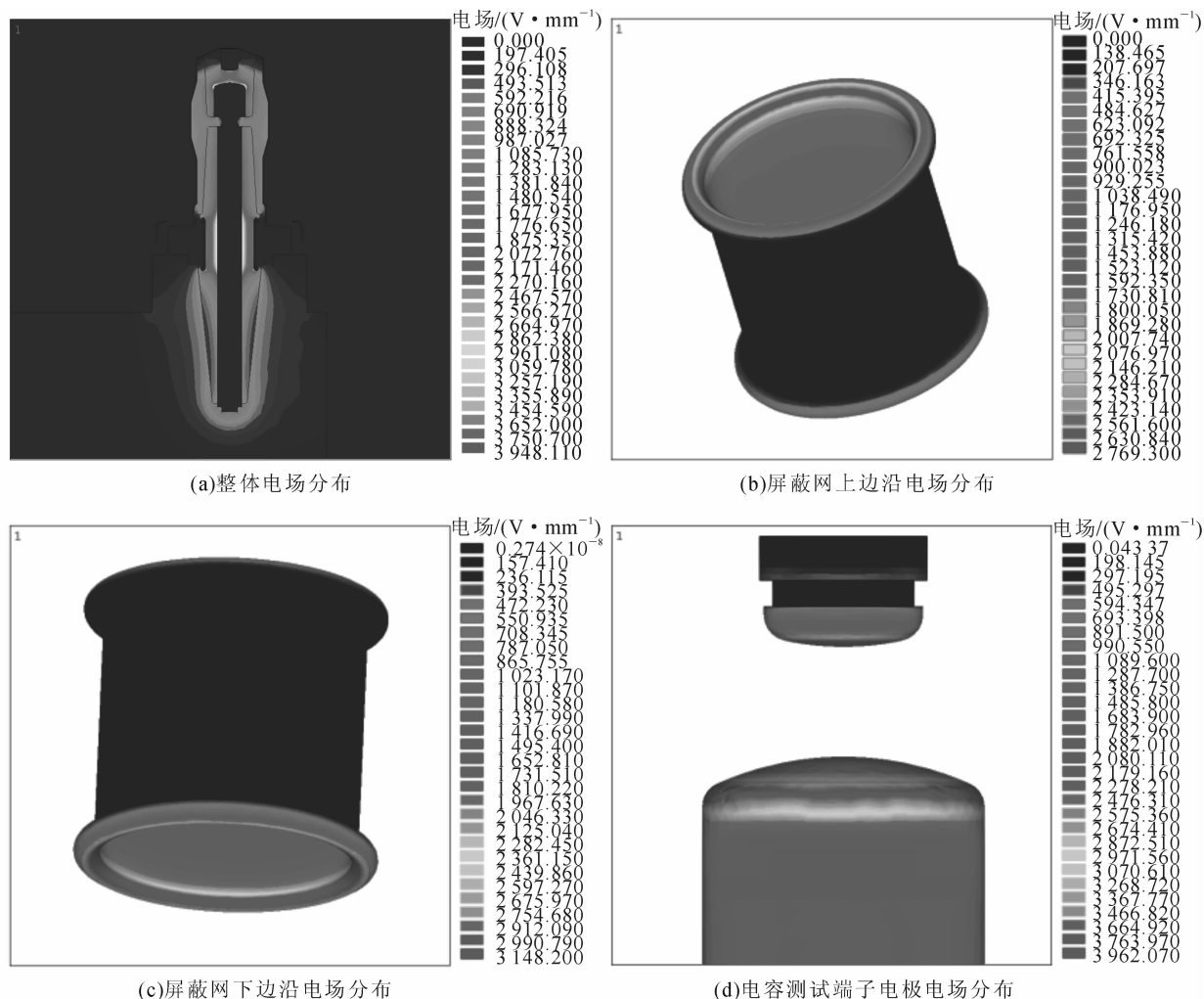


图 3 额定工况下电场分布计算结果

Fig. 3 Calculation results of electric field distribution under rated condition

套管外表面的电场不高且较均匀,最大不超过 1 000 V/mm,因此出现爬电的可能性较小。另外由于 T 型终端外表面的半导体层的屏蔽作用,套管和 T 型终端内部的电力线基本被屏蔽于内部,使 T 型终端外部电位基本为零电位,电场也基本为零,达到了“全屏蔽可触摸”的设计要求。同时,压接金具和车厢壳体的电场也非常低,因此该处不会出现电晕放电现象。

3 缺陷情况下电场分析

3.1 气隙

套管在制造的过程中,由于工艺水平限制,不

可避免的在环氧中形成气隙等缺陷。而气隙的存在会造成局部电场畸变,并且引发局部放电,造成周围绝缘介质的劣化,导致击穿场强下降^[18-21]。文中选取了 3 种不同位置的气隙进行电场分析,气隙假设为球状,直径为 1 mm,见图 4,计算结果列于表 1。可见,出现在高场强区内的气隙 1、2 的内部电场都已经达到空气的击穿场强 3 000 V/mm,会导致局部放电。而在较低场强区内的气隙 3 内部电场则不是很高,在额定工况下很难引发局部放电,不会对绝缘产生危害。

3.2 金属毛刺和凸起

套管内部的接地屏蔽采用金属铜网屏蔽,由于

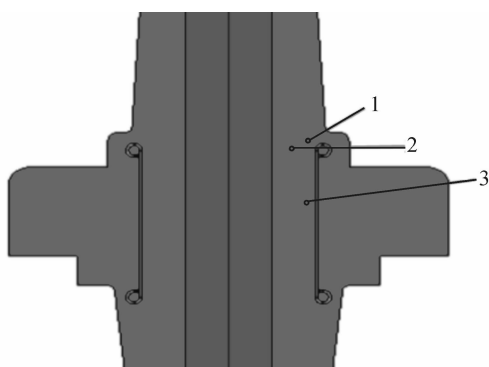


图4 气隙的位置示意图

Fig. 4 Location of the air gaps

表1 不同位置气隙处的电场

Table 1 Electric field at different air gaps

气隙位置	电场强度/(V·mm ⁻¹)
1	3 122
2	3 035
3	2 411

工艺限制,铜网很容易出现毛刺和凸起,并造成局部电场畸变,并可能导致周围绝缘介质的局部击穿^[18-21]。文中选取了金属屏蔽网中可能出现毛刺的位置,见图5所计算结果列于表2。从图5和表2可以看到,在铜屏蔽网上边沿的毛刺上的电场值非常高,超过了20 kV/mm,已经接近了环氧材料的击穿场强,如果在过电压的作用下,该处的电场将超过30 kV/mm,容易引发造成局部放电,导致环氧材料的击穿。出现在铜屏蔽网极板中间处的毛刺上的电场约11 kV/mm,会加速环氧材料的老化,对绝缘有一定的危害。文中假设在屏蔽网的上边沿出现凸起,则该处的电场增强达到6 499 V/mm,也会加速环氧的老化。可以看出,屏蔽网上的凸起对电场的畸变影响较大,应尽可能避免。

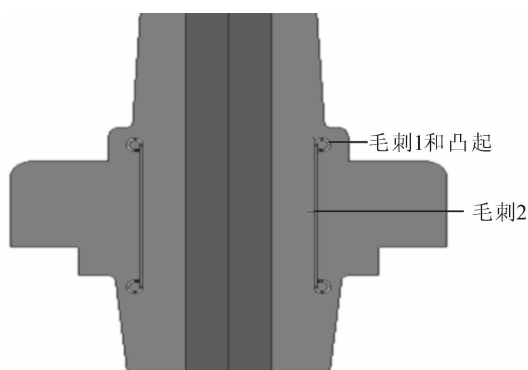


图5 毛刺和凸起位置示意图

Fig. 5 Location of the burrs and salient

必须指出,毛刺和凸起处的电场强度与毛刺和凸起的大小和形状密切相关。毛刺和凸起的存在会使电场严重畸变,威胁绝缘的安全。因此,在铜屏蔽

表2 毛刺和凸起处电场

Table 2 Electric field at burrs and salient

缺陷	电场强度/(V·mm ⁻¹)
毛刺1	20 515
毛刺2	11 760
凸起	6 499

网的制造过程中,必须严格控制工艺,避免毛刺和凸起的产生。另外也可以考虑不采用铜网屏蔽,改用表面光滑的半导体材料作为屏蔽。

3.3 半导体层接地失效

由前面的分析可知,T型终端的半导体层对于套管电场起到屏蔽作用,使得T型终端外部空间电位和电场几乎为零。然而T型终端在运行过程中,易出现半导体层接地孔烧蚀的情况^[22],在这种情况下,半导体层对套管将起不到屏蔽作用,对套管的电气性能会造成一定的影响。计算该工况下的电场分布,半导体层接地失效前后的电场列于表3。可以看到,在半导体层失效后,套管本体的电场变化并不大。套管内部的铜屏蔽处和中心导杆处的电场略有增强,分别达到3 224 V/mm和3 296 V/mm。电容测试点电极之间的电场则大幅下降,仅为1 075 V/mm。而由于半导体层接地失效,硅橡胶表面电位升高且分布不均匀,硅橡胶表面电场亦升高至652 V/mm,硅橡胶护套失去了对套管的屏蔽作用,没有达到运行中“全屏蔽可触摸”的要求。套管固定法兰的压接金具的表面电场升高,达到1 866 V/mm,见图6(a)。如果在过电压的作用下,压接金具将出现电晕放电。另外,距离电容测试端子较近的车厢壳体表面也出现了较高的电场强度,达1 297 V/mm,见图6(b)。由于高速列车途经区域广,运行时间长,各地的气候环境差异大,暴露在外面的压接金具、车厢壳体以及硅橡胶外护套处容易积污,使得积污处的起晕场强降低,在过电压的作用下,容易引起电晕放电甚至闪络。实际运行经验也表明,电容测试端子易对车厢壳体闪络。由此可见,硅橡胶外护套外表面的半导体层应保证可靠接地。因此,在安装过程中,可以考虑适当增大T型终端和车厢壳体的空气间隙。另外,在不改变T型终端整体电气性能的基础上,可以给T型终端增加一个接地环,提高半导体层接地的可靠性,从而减少电晕放电和闪络的发生。

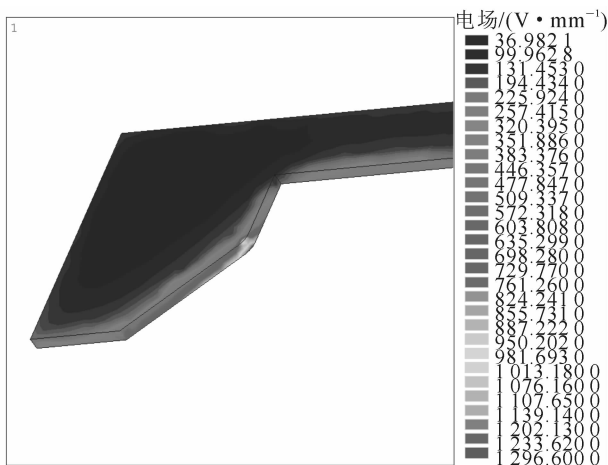
4 套管的绝缘破坏和击穿分析

中国高速列车的运行经验表明,高铁套管容易从屏蔽网处炸裂,电容测试端子也容易出现电极之

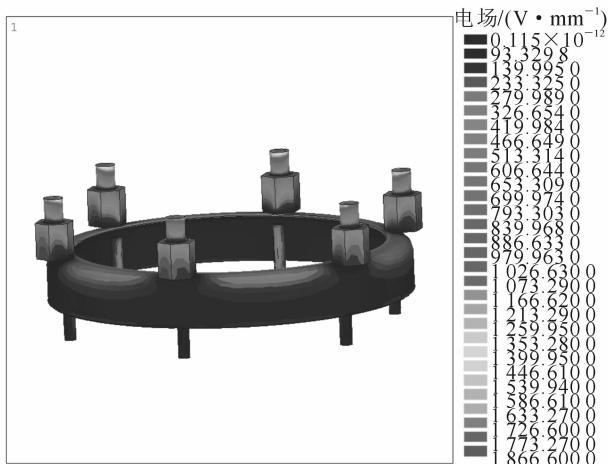
表3 半导体层接地失效前后各关键部位的电场

Table 3 Electric field at the key positions before and after the semiconducting layer ground connection lose validation

位置	电场强度/(V·mm ⁻¹)	
	半导体层接地	接地失效
中心导杆	3 203	3 296
屏蔽网上边沿	2 769	3 224
屏蔽网下边沿	3 148	3 150
电容测试端子	3 962	1 075
车厢壳体	0	1 297
法兰压接金具	6	1 866



(a) 车厢壳体处电场分布



(b) 法兰压接金具电场分布

图6 半导体层接地失效后电场分布

Fig. 6 Electric field distribution when semiconducting layer not grounded

间的击穿,见图7。根据解剖的结果,绝缘击穿的破坏大部分都是从铜屏蔽网和电容测试端子的电极外边沿起始,也是电应力最集中的部分。环氧的本征击穿强度为25~30 kV/mm,空气的击穿强度为3 kV/mm左右。但在制造和运行过程中在绝缘材料中形成气隙、金属毛刺和凸起等缺陷能导致局部电场畸变,引发局部放电甚至局部击穿,造成环氧的

局部劣化,击穿场强下降。另外,由于列车运行过程中的机械振动长期存在,可能在套管中形成微观裂纹,导致击穿场强的显著下降。套管频繁的过电压冲击会加剧局部放电,在固体介质中形成局部损伤或不完全击穿,在多次冲击电压作用下,一系列的不完全击穿将导致介质的完全击穿。由于固体绝缘介质的这种累积效应,随着过电压的冲击次数增多,固体绝缘的击穿场强将下降^[18-24]。



图7 击穿的套管和电容测试端子

Fig. 7 Bushing and capacitance testing terminal after insulation breakdown

根据电场计算结果与解剖分析,一方面,套管法兰和电容测试端子绝缘击穿的起始部位都是电应力集中的区域,因此需要优化铜屏蔽网的结构和电容测试端子电极的结构,改善高场强区的电场分布,减少绝缘事故的发生;另一方面,套管制造过程中的缺陷对套管的绝缘有较大危害,因此在制造过程中应改进工艺,提高制造水平,采用性能更优异的材料,避免气隙、毛刺及凸起的产生。

5 结论

1) 高速列车牵引变压器套管的运行工况的特点主要包括频繁的过电压冲击和长期的机械振动,对套管的长期安全运行不利。

2) 在额定工况下,牵引变压器套管内部的最高电场远低于环氧材料的击穿场强,但是达到了空气的击穿场强。套管内部的气隙和屏蔽铜网上的毛刺和凸起,会造成局部电场的畸变,导致局部放电甚至局部击穿,使绝缘材料劣化,击穿场强下降,在累积效应的作用下,可能导致贯穿性的击穿。

3) T型终端外表面的半导体层接地失效会造成法兰的压接金具,车厢壳体上的电场增大,在恶劣的运行工况下可能导致电晕放电甚至闪络,因此运行过程需要避免半导体层接地孔烧蚀的事故。

4) 实际运行中炸裂的套管和电容测试端子的绝缘击穿的通道都是从电场集中的区域起始的,因此,需要优化套管的屏蔽网和电容测试端子的电极

的绝缘结构,改善电场分布,并提高制造工艺水平,改进材料,尽量避免气隙、毛刺等缺陷,以减少绝缘事故的发生。

参考文献:

- [1] 刘正亮. 动车组高压电缆局部放电成因分析和检测研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2013.
LIU Zhengliang. Research on partial discharge causing analysis and detecting system for high-voltage cables of electric multiple unit[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2013.
- [2] 黄燕艳,龙礼兰,邱文俊,等. 动车试验线牵引供电动态平衡补偿装置的研制[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(3):1-5.
HUANG Yanyan, LONG Lilan, QIU Wenjun, et al. Development of dynamic balance-compensation equipment used on the traction test line of high-speed railway[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(3):1-5.
- [3] 宋永增. 动车组概论[M]. 北京:北京交通大学出版社,2012.
SONG Yongzeng. Introduction to multiple units[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press,2012.
- [4] 高国强. 高速列车运行状态暂态过电压机理与抑制方法的研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
GAO Guoqiang. Study on the over-voltage mechanism and suppressing method for high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2011.
- [5] 吴会超. 高速动车组车体与车下设备耦合振动研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
WU Huichao. Study on coupling vibration of high-speed EMU between carbody and underframe equipment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2012.
- [6] 王旗. 微米氧化铝铝对环氧树脂导热和电气性能的影响研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
WANG Qi. Investigation of the thermal conductivity and electrical property of epoxy resin with nano or micro alumina fillers[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2013.
- [7] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
FENG Cizhang, MA Xikui. Introduction to engineering electromagnetism [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [8] 党沙沙,许洋,张红松. ANSYS12.0多物理耦合场有限元分析入门到精通[M]. 北京:机械出版社,2010:254-311.
DANG Shasha, XU Yang, ZHANG Hongsong. ANSYS12.0 finite element analysis of multiphysics coupling field from start to master[M]. Beijing: China Mechanical Press,2010:254-311.
- [9] 张施令,彭宗仁,杜进桥,等. RBF神经网络与NSGA-II混合算法用于 ± 110 kV穿墙套管三维电场模拟及内屏蔽结构优化[J]. 高电压技术,2014,40(6):1847-1857.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, DU Jinqiao, et al. Three-dimensional E-field simulation and inner shielding structure optimization of ± 110 kV wall bushing with RBF neural network and NSGA-II algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6):1847-1857.
- [10] 陈昌龙,王黎明. 电力机车车顶绝缘子电场计算[J]. 高压电器,2011,47(1):53-57.
CHEN Changlong, WANG Liming. Electric field calculation for electric locomotive roof insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1):53-57.
- [11] 孙西昌,彭宗仁,党镇平,等. 特高压交流架空线路用复合绝缘子均压特性研究[J]. 高压电器,2008,44(6):527-530.
SUN Xichang, PENG Zongren, DANG Zhenping, et al. Study on electrical stress grading of composite insulators for UHV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6):527-530.
- [12] 苏明虹,孙伟,赵刚,等. 特高压双极直流电压发生器的电场分布计算与优化[J]. 高压电器,2008,44(5):402-405.
SU Minghong, SUN Wei, ZHAO Gang, et al. Electric field distribution and optimization of a bipolar UHVDC voltage generator[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5):402-405.
- [13] 钟建英,狄谦. 550 kV SF₆气体绝缘GIS套管内屏蔽结构研究[J]. 高压电器,2011,47(4):33-36.
ZHONG Jianying, DI Qian. Research of 550 kV SF₆ gas-insulated GIS bushing inner shielding layer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4):33-36.
- [14] NIE Dexin, ZHANG Hailong, CHEN Zhong, et al. Optimization design of grading ring and electrical field analysis of 800 kV UHVDC wall bushing[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4):1361-1368.
- [15] 黄道春,黄正芳,王国利,等. 特高压交流输电线路瓷绝缘子串电位和均压环电场分布计算模型的简化[J]. 高电压技术,2012,38(9):2163-2170.
HUANG Daochun, HUANG Zhengfang, WANG Guoli, et al. Calculation model simplification for porcelain insulator string potential and grading ring surface electric field distribution of UHV AC transmission line[J]. High Voltage Technology, 2012, 38(9):2163-2170.
- [16] 王晓琪,吴春风,李鑫,等. 1000 kV GIS用套管的设计[J]. 高电压技术,2008,34(9):1792-1796.
WANG Xiaoqi, WU Chunfeng, LI Xuan, et al. Design of 1000 kV GIS bushing[J]. High Voltage Technology, 2008, 34(9):1792-1796.
- [17] LI Naiyi, YANG Xi, PENG Zongren. Measurement of elec-

- tric fields around a 1 000 kV UHV substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2356-2362.
- [18] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage and insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [19] 俞翔霄, 陆惠英. 环氧树脂电绝缘材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- YU Xiangxiao, LU Huiying. Electrical insulation materials of epoxy resin[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [20] 温红旗, 王荣亮, 房克荣. 变压器套管末屏接地型式存在的问题及解决方法[J]. 变压器, 2014, 51(2): 72-73.
- WEN Hongqi, WANG Rongliang, FANG Kerong. Problems and solution for grounding types of transformer bushing end shield[J]. Transformer, 2014, 51(2): 72-73.
- [21] 周海滨, 彭翔, 陈禾. 变压器套管在线监测装置运行风险分析[J]. 变压器, 2014, 51(3): 58-60.
- ZHOU Haibin, PENG Xiang, CHEN He. Risk analysis of Transformer bushing on-line monitoring device[J]. Transformer, 2014, 51(3): 58-60.
- [22] 田学静, 王鑫, 王建功, 等. 高速动车组牵引变压器T型插头放电烧损分析及对策[J]. 机车电传动, 2013(6): 105-106.
- TIAN Xuejing, WANG Xin, WANG Jiangong, et al. Analysis of type-T termination burning of traction transformer of high-speed train[J]. Electric Drive For Locomotives, 2013(6): 105-106.
- [23] 刘芹. 复合绝缘子内部缺陷污秽条件下电场仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- LIU Qin. Electric field simulation study of composite insulators with internal defects and under pollution conditions respectively[D]. Guangzhou: South China University of technology, 2012.
- [24] ROKUNOHE T, KATO T, HIROSE M, et al. Development of insulation technology in compact SF₆ gas-filled bushings: development of compact 800 kV SF₆ gas-filled bushings[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 171(1): 19-27.
- 邓志祥(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备绝缘结构的优化设计,

(上接第77页)

- [17] 季娟, 俞集辉, 袁一飞, 等. 空心电抗器磁场分布和保护体架设研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 61-64.
- JI Juan, YU Jihui, YUAN Yifei, et al. Research of the magnetic field distribution and protection body setting for air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 61-64.
- [18] 季娟, 俞集辉, 杨光, 等. 电抗器磁场干扰及屏蔽研究[C]//电工理论与新技术学术年会论文集. 重庆: 中国电机工程学会, 中国电工技术学会, 2008: 44-46.
- JI Juan, YU Jihui, YANG Guang, et al. The research of the magnetic interference and shielding for reactor[C]//Annual Meeting of Electrical Engineering Theory and New Technology Academic. Chongqing: CSEE, CES, 2004: 44-46.
- [19] 刘国强, 赵凌云, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [20] 程汉湘, 何绍洋, 黄超宪, 等. 磁控电抗器的电磁特性分析[J]. 变压器, 2013, 50(8): 16-18.
- CHENG Hanxiang, HE Shaoyang, HUANG Chaoxian, et al. Electromagnetic characteristic analysis of magnetically controlled reactor[J]. Transformer, 2013, 50(8): 16-18.
- [21] 李霞, 刘燕, 肖勋. 关于干式空心电抗器试验的几个问题[J]. 变压器, 2013, 50(2): 57-59.
- LI Xia, LIU Yan, XIAO Xun. Several questions of dry-type air-core reactors test[J]. Transformer, 2013, 50(2): 57-59.
- [22] 刘东升, 胡国龙, 郑泉, 等. 空心接地电抗器的磁场和电抗计算[J]. 变压器, 2008, 45(5): 5-7.
- LIU Dongsheng, HU Guolong, ZHENG Quan, et al. Calculation of magnetic field and reactance of earth reactor with air core[J]. Transformer, 2008, 45(5): 5-7.
- [23] 王丽君, 刘卓. 干式空心串联电抗器耐受短路电流能力计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(4): 44-48.
- WANG Lijun, LIU Zhuo. Calculation of withstand short circuit current ability of dry core series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(4): 44-48.
- 刘克彬(1983—), 男, 工程师, 主要从事电抗器及无功补偿装置产品的研发与设计。