

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.025

基于Ansys仿真的开关柜局部放电研究

苏海博¹, 普美娜², 朱兆芳², 易满成¹, 李刚¹, 杨爱军²

(1. 广州供电局有限公司电力试验研究院, 广州 510410; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 局部放电是预示电气设备绝缘状态的重要指标, 电气设备内电场的分布与局部放电的产生密切相关。近年来, 有关开关柜中母线室、电缆室、手车室、断路器处的电场分布得到了普遍关注并取得了重要研究成果, 而针对开关柜内负荷开关本体电场分布的研究较少。文中运用静电场分析的方法, 利用Ansys建模仿真得到开关柜内负荷开关处的电场分布图, 找出电场强度相对集中的区域, 确定了开关柜内负荷开关处易发生局部放电的位置, 并通过实际运行状况进行了验证, 这是开关柜局部放电监测的重要理论基础。笔者还考虑了环境湿度, 通过改变周围环境相对介电常数, 寻找到了负荷开关出线端表面电场强度的变化规律, 在此基础上提出采取加装除湿器作为改善开关柜内部局部放电的措施。文中电场仿真结果还对同类型半绝缘开关柜负荷开关的结构设计及优化具有重要的指导意义。

关键词: 开关柜; 局部放电; Ansys; 电场强度; 仿真分析

Research on Partial Discharge of Switchgear Based on Ansys Simulation

SU Haibo¹, PU Meina², ZHU Zhaofang², YI Mancheng¹, LI Gang¹, YANG Aijun²

(1. Test & Research Institute of Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510410, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Partial discharge (PD) is the important index of insulation conditions in electrical equipment, and the distribution of electric field in electrical equipment is closely related to the generation of partial discharge. In recent years, the research on the distribution of electric field in the bus room, cable room, handcart room, and circuit breaker inside a switchgear, have attracted widespread attention and already acquired important research results. However, there are few investigations on electric field distribution of load switch inside a switchgear. In this paper, the electric field distribution of load switch is obtained by using electrostatic field analysis with the software, Ansys, and some relatively concerned areas of the electric field have been observed. In addition, the position which is vulnerable to partial discharge in the interior of a load switch is verified by the actual operating status of equipment, and those research conclusions are the basis of theory of the partial discharge monitoring. Considering the humidity of the ambient environment, this paper changes the relative dielectric constant of environment, and the relevant change rules of electric field intensity in the surface of outgoing line ends are found out, based on which, installing a dehumidifier inside a switchgear as an effective measure for suppressing partial discharge is proposed. What's more, the whole electric field simulation results have important guidance significance for the structure design and optimization of load switch inside the same type semi-insulating switchgear.

Key words: switchgear; partial discharge; Ansys; electric field intensity; simulation

0 引言

配电网中的开关柜数目众多, 长期工作在高温、高压、潮湿的恶劣环境下, 必然会发生绝缘劣化

的现象, 进而引发局部放电。局部放电事故的不断蔓延和发展, 就会引起绝缘的损伤, 如果任其发展最终会导致绝缘丧失介电性能, 造成严重事故, 破坏系统的安全稳定能力^[1-6]。根据2011—2014年广州地区配网开关柜故障统计, 由绝缘损坏而引起的

故障占总数的44.2%，其中因绝缘部分的闪络造成的事故高达79.0%，因此对高压开关柜局部放电问题的研究具有重要的现实意义。

开关柜的电场分布与局部放电的产生密切相关，一直以来都备受研究机构及设备制造厂商关注。近年来，有不少学者采用有限元分析方法对开关柜中母线室、电缆室、手车室、断路器等处电场分布进行了仿真分析^[7-11]，而对适用于半绝缘开关柜的负荷开关的电场分布研究较少。文中采用有限元分析方法从静电场角度对开关柜内的负荷开关柜的电场进行分析，旨在确定电场相对集中易发生局部放电的部位。

笔者采用 Ansys 有限元软件对某变电站半绝缘开关柜内型号为 FLN36-12 的负荷开关的电场进行建模分析，得到其电位及电场分布云图。经过分析，提取出电场相对集中的区域，同时参照设备实际运行状况，确定开关柜内负荷开关处易发生局部放电的位置，以揭示局部放电问题的根源。笔者还考虑了周围环境因素对负荷开关电场分布的影响，研究了电场强度随环境因素的变化规律，为开关设备局部放电的检测提供指导。

1 开关柜局部放电简述

电气设备的绝缘系统中，各部位电场强度存在差异，当局部区域电场强度较高，达到该区域的击穿场强时，就会在该区域中出现放电，但此时放电并没有贯穿施加电压的两导体之间造成整个绝缘系统击穿，称这种现象为局部放电^[12-14]。局部放电不会立即导致绝缘整体的击穿，但其对绝缘介质的危害异常严重。局部放电是造成绝缘劣化的主要原因，也是绝缘化的重要征兆和表现形式，与绝缘材料的劣化和绝缘体的击穿过程密切相关，能有效地反映设备内部绝缘的潜伏性缺陷和故障。

通常电气设备绝缘体所承受的电场分布是不均匀的，而电介质本身也往往是不均匀的，这就是导致在绝缘介质内部或表面出现高场强区域，一旦这些区域的场强高到足以引起该区域的局部击穿，就会形成局部放电。在不均匀电场中，局部放电通常是在电场强度相对较高，绝缘体电气强度相对较低的部位发生^[15-16]。据调研，开关柜内部发生局部放电的区域主要有3处：母线排接触处、负荷开关出线处、分压电容绝缘子高、低压两端。文中将通过 Ansys 电场仿真确定开关柜内部的高场强区域并结合实际运行状况对开关柜局部放电进行分析。

2 半绝缘开关柜静电场仿真分析

2.1 仿真的流程

Ansys 是一种基于有限元分析的仿真软件，具有强大的求解器和前、后处理功能和较为完善的分析功能。该仿真软件可以通过自动生成网格进行剖分使得用户不用深究理论算法，操作简单且仿真结果与实际值吻合度较高，是进行电场仿真计算的很好选择^[17-20]。因此，文中采用 Ansys 软件作为仿真工具对半绝缘开关柜的电场进行相关仿真计算^[21-22]，其仿真的流程见图1。

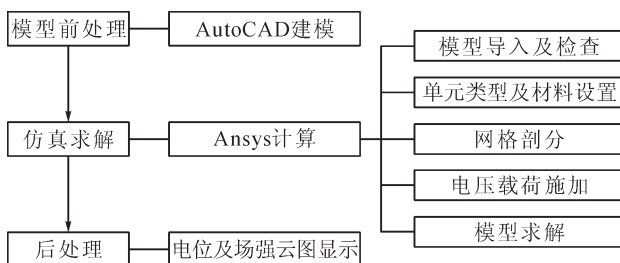


图1 开关柜静电场仿真流程

Fig. 1 Switchgear electrostatic field simulation procedure

2.2 仿真模型的建立

FLN36-12 型号的半绝缘开关柜是一种三工位、旋转式动触头、外壳由高强度环氧树脂压铸而成的户内交流高压六氟化硫开关设备，其主要组成部分为负荷开关本体、机构接地铜排、触头座、罩壳等。文中仿真重点放在负荷开关本体，仿真模型所用到的电介质物理参数见表1。

表1 介质物理参数

Table 1 Parameter of medium physics

参数	空气	环氧 树脂	钢	铜	铝	水
相对介电常数 ϵ_r	1	4	—	—	—	81
电阻率 (20℃)/ ($\Omega \cdot m$)	0.00	无穷大	9.78×10^{-8}	1.75×10^{-8}	2.83×10^{-8}	—

为了降低对计算机硬件的要求，加快计算的效率，同时兼顾计算机精度与合理性，文中针对半绝缘开关柜本体及柜体对称部位，采用图2所示仿真模型。而针对带电显示器与分布电容绝缘子处的非对称部位，采用图3所示侧面仿真模型作为补充分析模型。

2.3 Ansys 仿真结果与分析

工频交流电气设备中，不同电位导体间的电位差随时间的变化比较缓慢，且导体间的距离远小于相应电磁场的波长($3 \times 10^6 m$)，所以在任一瞬间工频

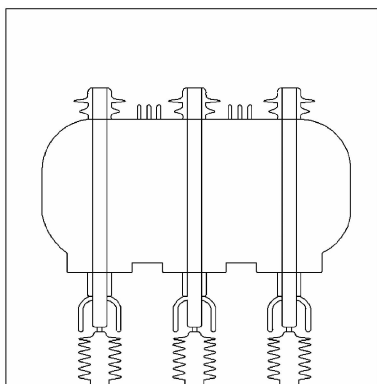


图2 开关柜仿真模型 1

Fig. 2 Switchgear simulation mode 1

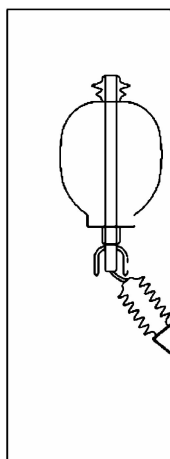


图3 开关柜仿真模型 2

Fig. 3 Switchgear simulation mode 2

交流电气设备中的电场可以视为静电场。

文中采用 Ansys 软件对半绝缘开关柜的静电场进行仿真分析, 为确定开关柜易发生局部放电的位置提供了理论依据。在仿真过程中, 文中设定分压电容绝缘子低压端及柜体电位为零电位, 将高压端金具电位设置为: A 相 -2.5 kV 、B 相 5 kV 、C 相 -2.5 kV , 得到其电位 U 分布、电场强度 E 分布见图4、5。

从图4、5可以看出, 电场最为集中区域为 B 相铝制屏蔽罩内部与分压电容绝缘子连接处即为带电显示器及分压电容绝缘子高压端位置, 此处的最大场强可以达到 441.592 V/mm 。此外, 还可以看出, 负荷开关与母线排接触处及进线端相间绝缘表面的区域, 电场也较为集中。

鉴于带电显示器、分压电容绝缘子为非对称结构, 文中采用图2模型对其周围的电场强度分布做进一步优化分析, 其仿真分析结果见图6、7。

从图6可以看出, 半绝缘负荷开关的出线端与屏蔽罩外部周围之间的电位分布比较均匀, 而分压

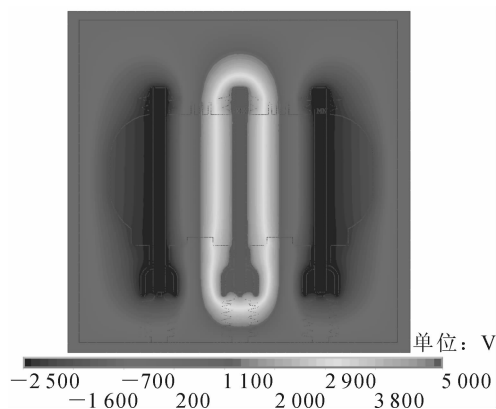


图4 开关柜电位分布图

Fig. 4 Distribution of potential in switchgear

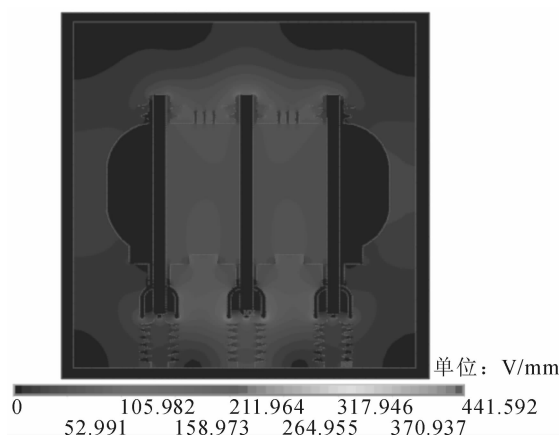


图5 开关柜电场强度分布图

Fig. 5 Distribution of electric field intensity in switchgear

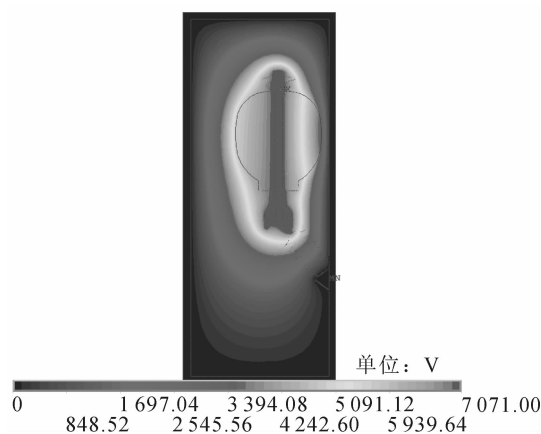


图6 开关柜电位分布图

Fig. 6 Distribution of potential in switchgear

绝缘子高压端的电位线较为集中。从图7可以看出, 半绝缘开关柜最大场强仍位于带电显示器与分压电容绝缘子的钢制弹簧连接处, 其电场强度可达到 511.502 V/mm 。此外, 进线端与母线排的接触处的场强也较大, 文中将对这些电场强度较大的区域做更进一步分析。

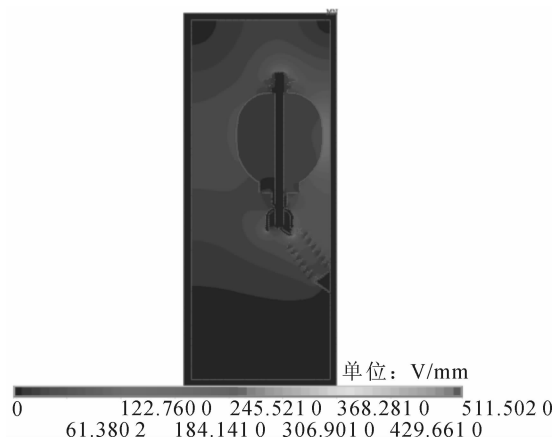


图7 开关柜电场强度分布图

Fig. 7 Distribution of electric field intensity in switchgear

2.4 Ansys 仿真结果与实际情况的对比分析

为了确定半绝缘开关柜易发生局部放电的位置,笔者提取了开关柜电场强度分布集中的关键部位,并与其实际运行状况做对比,分析开关柜局部放电产生的原因。

母线排接触处场强分布图见图8,从图8中可见,在半绝缘开关柜负荷开关与母排的接触处电场强度较大约为200 V/mm,虽然此处不是电场最为集中的地方,但在实际运行中该处经常会出现严重的放电破坏现象,见图9。分析其主要原因是在实际运行过程中此处常有污秽附着且表面潮湿,导电的污秽颗粒虽然对其表面电位分布影响不大,但会导致电场强度分布不均匀,使得导电污秽颗粒局部区域电场强度畸变。因此,在工频电磁场的长期作用下,该处极易产生局部放电现象,进而加速其周边绝缘材料劣化,绝缘劣化又将进一步造成其周边电场分布畸变,形成恶性循环,从而逐步形成放电通道,最终导致此处发生绝缘事故。

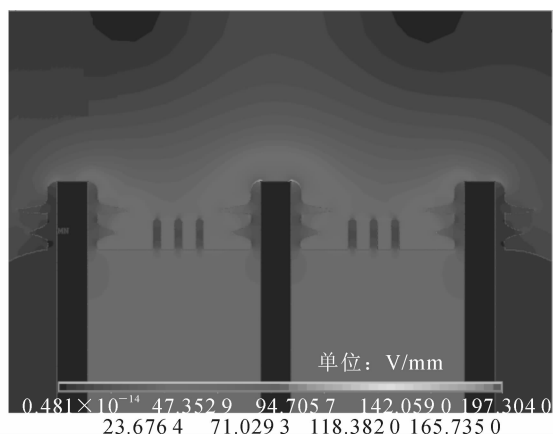


图8 母线排接触处场强分布图

Fig. 8 Distribution of electric field intensity in bus-bar contact field



图9 母线排接触处的实际情况

Fig. 9 Actual situation of bus-bar contact field

屏蔽罩内部带电显示器处的电场比较聚集,B相带电显示器处场强分布图见图10,从图10可以看出,最大场强位于分压电容绝缘子与出线铜导体连接处,连接处是一个钢制的弹簧体,其最大场强约为440 V/mm。从实际运行情况图11中可以看出,在分容电压绝缘子的顶部有明显的烧蚀痕迹,此与仿真结果中最大场强位于该处的结果相吻合。

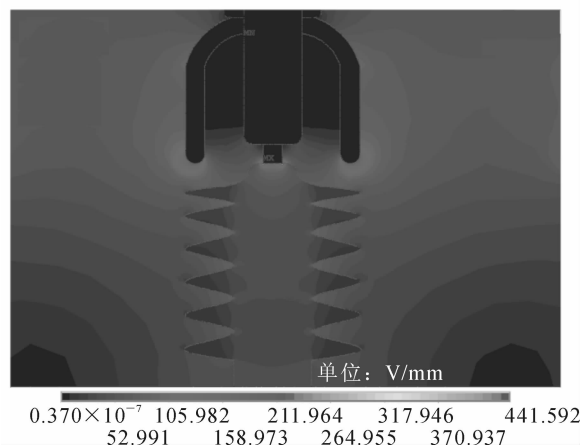


图10 B相带电显示器处场强分布图

Fig. 10 Distribution of electric field intensity in B phase live display



图11 带电显示器处的实际情况

Fig. 11 Actual situation of live display

为了更确切地分析分压电容绝缘子的电场分布,笔者采用图2仿真模型进行仿真,仿真结果见

图 12。从 12 图中可以看到,分压电容绝缘子高、低压端场强较大,场强最大的位置位于绝缘子高压端,最大场强可以达到 512 V/mm。与图 13 实际运行图对比,可以看到,分压电容绝缘子高、低压端在运行过程中均出现过火花放电的现象,仿真结果与实际情况吻合。



图 12 分压电容绝缘子处场强分布图

Fig. 12 Distribution of electric field intensity in partial pressure capacitive insulator

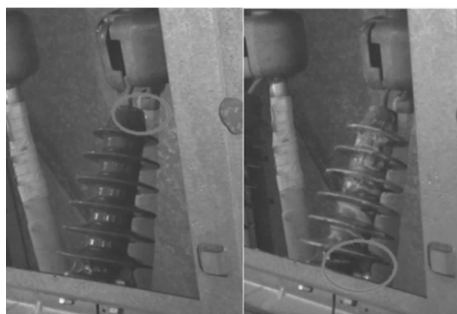


图 13 分压电容绝缘子处的实际情况

Fig. 13 Actual situation of partial pressure capacitive insulator

综上所述,可以确定半绝缘开关柜易发生局部放电的区域为:负荷开关与母线排接触处、带电显示器处、分压电容绝缘子高低压端。对易发生局部放电现象的放电点的定位,便于及时处理这种现象,进而达到预防高压开关柜电气设备绝缘故障的目的,防患于未然,因此研究高压开关柜进行电场仿真具有重要的现实意义。

3 环境因素对半绝缘开关柜电场分布的影响

广州地区气温高、降水多、湿度大,开关柜运行环境较为恶劣。对该地区配网开关柜进行调研,发现开关柜内常有凝露出现,柜内负荷开关出线端绝缘表面烧蚀非常严重。文中在设定开关柜周围环境

为理想条件(周围空气相对介电常数取 1,出线端绝缘表面光滑洁净)借助于 Ansys 软件进行仿真分析,得到出线端处最大电场强度仅为 56 V/mm,场强较小,不易出现因局部放电造成出线端烧蚀严重的现象。针对这一情况,文中将环境因素考虑进去,着重分析环境湿度对负荷开关出线端电场分布的影响。

考虑到广州地区配网开关柜周围环境中湿度极度饱和,有时甚至有液态水珠的存在,因此可近似认为周围环境的相对介电常数介于 1~81 之间,环境湿度越大,相对介电常数越大。负荷开关出线端为柱状轴对称结构,因此在仿真中可以通过图 14 所示预设路径来分析环境湿度对出线端电场分布的影响。图 14 中,路径 1 为沿出线端绝缘表面向下,路径 2 为沿出线端屏蔽罩表面向下。

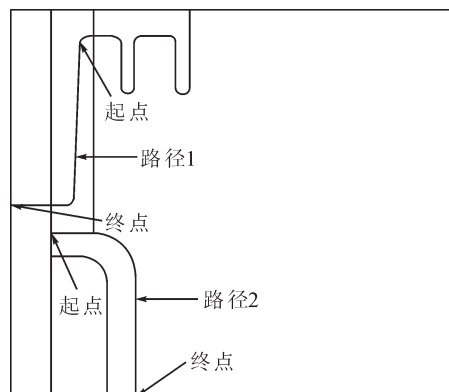


图 14 电场仿真预设路径

Fig. 14 The presupposed routes of electric field simulation

改变负荷开关柜出线端周围空气相对介电常数,得到路径 1、路径 2 上电场分布的变化规律,见图 15、16。

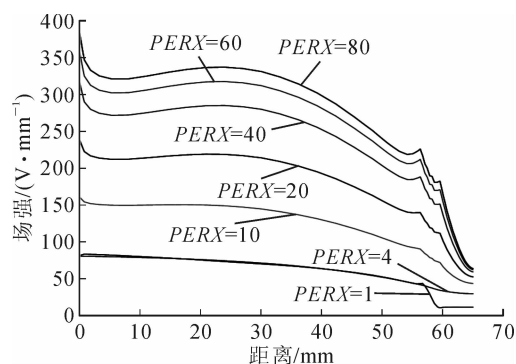


图 15 不同空气参数下路径 1 的电场分布

Fig. 15 The electric field distribution of route 1 under different parameters of air

从图 15 可以看到,随着环境湿度增加,空气相对介电常数(PERX)变大,出线端绝缘表面所有区域的电场强度均变大,而最大电场强度始终出现在环氧树脂绝缘材料的倒角处。当环境湿度低、相对介

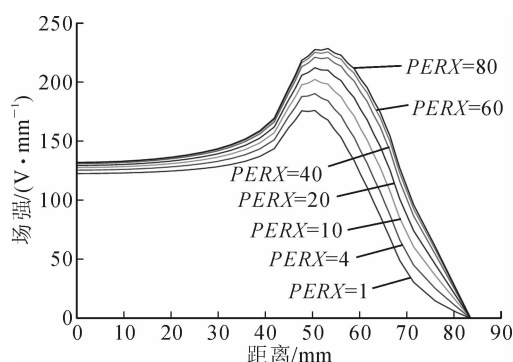


图 16 不同空气参数下路径 2 的电场分布

Fig. 16 The electric field distribution of route 2 under different parameters of air

电常数小时,出线端绝缘表面电场分布均匀,变化较为平缓,最大场强仅为 56 V/mm,不易发生局部放电。当周围环境湿度大、相对介电常数大,出线端绝缘表面电场的分布不均匀,变化较陡峭,最大场强高达 400 V/mm,极易出现局部放电现象造成出线端绝缘表面烧蚀严重。由图 16 可以看出,随空气介电常数增加,出线端屏蔽罩表面电场强度也出现不同程度的增长,但变化不大,表面区域电场分布变化不大。由上述可知,环境湿度主要影响出线端绝缘表面的电场分布,是造成出线端绝缘表面烧蚀严重的重要因素。为防止环境湿度大而造成负荷开关出线端局部放电严重出现绝缘事故,应在负荷开关出线端柜内加装除湿器。在实际运行过程中,发现在柜内加装加湿器对改善局部放电现象的效果明显。

4 结论

文中利用 Ansys 仿真软件对半绝缘开关柜内负荷开关本体电场分布进行仿真并考虑环境因素、结合实际情况,找出其易发生局部放电的区域并分析其产生原因,得到如下主要结论:

1) 基于静电场分析理论,采用有限元计算方法,通过合理的模型处理和简化,对半绝缘开关柜内部电场进行分析,找出易发生局部放电故障的位置为负荷开关与母线排接触处、带电显示器处、分压电容绝缘子高低压端及负荷开关出线端,因此,在开关柜实际运行过程中,运维人员对这些区域局部放电的监测应给予充分的重视,以预防事故的发生。

2) 在广州,潮湿的环境是导致负荷开关出线端绝缘表面烧蚀严重的重要因素,环境湿度越大,出线端电场强度越大,越易发生局部放电使得绝缘表面烧蚀严重。环境湿度对负荷开关出线端电场的影响主要表现在对出线端绝缘表面电场分布的影响,出线端屏蔽罩表面电场分布受环境湿度影响不大。

3) 考虑环境湿度对负荷开关出线端处电场分布的影响,在潮湿环境中运行的开关柜应考虑在柜内加装除湿器,经实际运行验证这对于改善出线端局部放电现象的效果明显。

4) 笔者基于 Ansys 仿真实现对半绝缘开关柜负荷开关处的分析与计算,能为该类型开关柜负荷开关的结构设计及优化提供理论参考依据。

参考文献:

- [1] 印 华,王 勇,王 谦. 12 kV 开关柜内部放电的分析与处理[J]. 高压电器,2006,42(5):395-396.
YIN Hua, WANG Yong, WANG Qian. Analysis and disposal of the discharging in 12 kV switch cubicle[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5): 395-396.
- [2] 嵇丽明,邱 崑,徐 翀,等. 开关柜局部放电综合诊断技术的应用研究[J]. 高压电器,2014,50(7):106-110.
JI Liming, QIU Kun, XU Chong, et al. Application of on-line comprehensive diagnosis technology to detection of partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 106-110.
- [3] 王有元,李寅伟,陆国俊,等. 开关柜局部放电暂态对地电压传播特性的仿分析[J]. 高电压技术,2011,37(7):1683-1688.
WANG Youyuan, LI Yinwei, LU Guojun, et al. Simulation of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgears[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1683-1688.
- [4] 田 勇,田景林. 6~10 kV 开关柜事故统计分析与改进意见[J]. 东北电力技术,1996(8):5-10.
TIAN Yong, TIAN Jinglin. The statistics and analysis of faults in 6~10 kV switchgears[J]. Northeast Electric Power Technology, 1996(8): 5-10.
- [5] 李海德. 基于 TEV 与超声波的高压开关柜局部放电检测方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2013:1-6.
LI Haide. Research on partial discharge detection methods of HV switchgear based on TEV and ultrasonic wave[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013: 1-6.
- [6] 宋 杲,崔景春,袁大陆. 2004 年高压开关设备运行统计分析[J]. 电力设备,2006,7(2):10-14.
SONG Gao, CUI Jingchun, YUAN Dalu. Operation statistics and analysis of high voltage switchgear in 2004[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(2): 10-14.
- [7] 李 泉,修士新. 中压开关设备内部电场仿真分析与优化[C]//2010 输变电年会论文集. 南京:[s.n.],2010:73-75.
LI Quan, XIU Shixin. Simulation analysis and optimization for internal electric field of medium-voltage switchgear[C]//Symposiums of 2010 Annual Meeting of Power Transmission and Transformation. Nanjing:[s.n.],2010:73-75.
- [8] 吐松江·卡日. 蔺 红,希望·阿布都凡伊提. 中压开关柜三维电场有限元分析[J]. 计算机仿真,2015,32(8):166-170.
TU Songjiangkari, LIN Hong, XIWANG · ABUDUWAYITI. 3D finite element analysis of cubicle metal-enclosed switchgear[J]. Computer Simulation, 2015, 32(8): 166-170.

- [9] 贾文卓. 基于 Ansys 的开关柜电场与温度场仿真计算[D]. 天津: 天津大学, 2013: 17-33.
JIA Wenzhuo. The simulation of electric field and temperature field about switchgear based on Ansys[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 17-33.
- [10] 卢 旻. 基于 Ansys 仿真的 10 kV 开关柜绝缘改造[J]. 电气技术, 2015(9): 83-85.
LU Min. 10 kV high voltage switchgear insulation modification based on Ansys[J]. Electrical Engineering, 2015(9): 83-85.
- [11] KANE C, BLOKHINTSEV I, GOLUBEV A. Measurement and analysis of partial discharge in switchgear[C]//Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Conference. [S.l.]: IEEE, 2005: 203-210.
- [12] KURRER R, KLUNZINGER K, FESER K, et al. Sensitivity of the UHF-method for defects in GIS with regard to on-line partial discharge detection[C]//Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S.l.]: IEEE, 1996: 95-98.
- [13] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [14] 叶海峰, 钱 勇, 王红斌, 等. 开关柜表面暂态地电压信号频谱特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3849-3857.
YE Haifeng, QIAN Yong, WANG Hongbin, et al. Spectrum characteristics of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3849-3857.
- [15] KEMP I J. Partial discharge plant-monitoring technology: present and future developments[J]. IEE Proceedings of the Science, Measurement and Technology, 1995, 142(1): 4-10.
- [16] 何肖军, 徐志斌. 高压开关柜绝缘性能检测与故障诊断技术研究[J]. 浙江电力, 2010, 29(5): 6-10.
HE Xiaojun, XU Zhibin. Study on insulating property detection and fault diagnosis technology for HV switchgear [J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(5): 6-10.
- [17] 张文凯, 吴小钊, 郑亚利, 等. 基于静电场分析的固封极柱局部放电研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3858-3865.
ZHANG Wenkai, WU Xiaozhao, ZHENG Yali, et al. Research on embedded pole partial discharge based on electrostatic field analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3858-3865.
- [18] 廖嘉骏, 阳 林, 郝艳捧. 融冰期 110 kV 覆冰复合绝缘子电场仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 47-54.
LIAO Jiajun, YANG Lin, HAO Yanpeng. Simulation of electric field for 110 kV iced composite insulator in melting period[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 47-54.
- [19] 刘国利, 肖登明. 套管局部放电分析及电场仿真[J]. 电气技术, 2014(9): 1-4.
LIU Guoli, XIAO Dengming. Bushing PD analysis and electric field simulation[J]. Electrical Engineering, 2014(9): 1-4.
- [20] 段大鹏, 赵承楠, 詹花茂, 等. 252 kV GIS 盆式绝缘子金属法兰开孔的电场分析及优化设计[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 74-79.
DUAN Dapeng, ZHAO Chengnan, ZHAN Huamao, et al. Electric field simulation and optimization design of the metal flange pouring hole of basin-type insulator in 252 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 74-79.
- [21] 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 disconnecter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1216-1223.
- [22] 杨敬华, 范承勇. 40.5 kV 真空断路器绝缘结构电场分析及优化设计[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 146-152.
YANG Jinghua, FAN Chengyong. Electric field analysis and optimization design of insulation structure of 40.5 kV vacuum circuit-breaker[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 146-152.
- 苏海博(1986—), 男, 工程硕士, 助理工程师, 主要从事高压设备试验及新技术应用推广。
- 普美娜(1990—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为配电网主要开关设备的寿命延长措施。
- 朱兆芳(1990—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为电力开关设备故障诊断技术。
- 易满成(1985—), 男, 工程硕士, 工程师, 主要从事高压开关设备试验及新技术应用推广。
- 李 刚(1957—), 男, 工学学士, 教授级高级工程师, 主要从事大型变压器和超高压断路器等电力设备的运行维护、安装调试和故障检修工作。
- 杨爱军(1986—), 男, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为电力开关设备故障诊断和寿命评估。

(上接第 158 页)

- ZHANG Junmin, XU Guozheng. Mathematical model of nozzle ablation in an SF₆ auto-expansion circuit breaker[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(9): 1172-1175.
- [19] 李介谷. 电器的熄弧原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1956.

LI Jiegu. The principle of electric arc[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1956.

邢照亮(1988—), 男, 硕士研究生, 主要进行电工设备绝缘材料的绝缘性能及耐烧蚀性能研究。