

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.013

12 kV 固体柜环氧浇注模块外表面无金属化层时的电场分布特征研究

孔国威¹, 魏 杰¹, 王昊晴², 李向阳²

(1. 北京双杰电气股份有限公司, 北京 101407; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100085)

摘要: 固体绝缘技术在中压特别是 12 kV 开关设备当中已经得到广泛的认可与应用。为实现固体柜产品小型化、提高耐候性、安全性等目的,在固体柜绝缘表面进行金属化处理成为当前新的研究热点。但目前固体柜产品中很大一部分环氧浇注外表面未做金属化处理,文中对现有 12 kV 固体柜产品环氧浇注模块外表面无金属化处理时的电场分布特征进行了仿真研究。仿真结果表明,现有固体柜产品环氧浇注模块外表面无金属化层时,固体柜能够满足电场绝缘考核要求,但环氧浇注模块内部真空灭弧室结构及环氧模块与柜体外壳间隙距离对固体柜的电场分布影响显著。

关键词: 固体柜; 环氧浇注; 表面金属化; 电场分布

Research on the Electric Field Distribution Characteristics of 12 kV Solid Epoxy Mold Insulated Switchgear Without Surface Metallization

KONG Guowei¹, WEI Jie¹, WANG Haoqing², LI Xiangyang²

(1. Beijing Shuangjie Electric Co., Ltd., Beijing 101407, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Solid insulation technology has been widely used in medium voltage, especially 12 kV switchgears. For the purpose of miniaturization, weather ability and safety of the solid insulated switchgear (SIS), metallization treatment on insulation surface has attracted more attention in corresponding researches. However, a large proportion of the commonly used SISs are not treated by metallization on the outer surface of epoxy mold. In this study, the electric field distribution characteristics on the epoxy mold of the 12 kV switchgear without surface metallization are simulated. The results show that the SISs without metallization on epoxy mold surface can satisfy the requirement for electric field assessment, but the internal vacuum interrupter structure in epoxy mold and the distance between epoxy mold and cabinet shell have significant influence on a SIS electric field distribution.

Key words: solid insulated switchgear; epoxy pouring; surface metallization; electric field distribution

0 引言

随着中国及其他一些国家 10~35 kV 配电网的迅速发展和开关设备环保要求的提高,固体绝缘技术在中压特别是 12 kV 开关设备当中已经得到广泛的认可与应用^[1-5]。固体绝缘开关设备将真空断路器的密封技术和制造工艺扩大应用,高电位相间及相对

地之间主绝缘介质采用固体绝缘材料或固体绝缘材料加空气,常用的固体绝缘材料为环氧树脂、硅橡胶、聚碳酸酯等^[6]。目前中压固体绝缘开关柜关注的主要技术问题包括:结构设计、绝缘材料选择、材料表面处理、APG 浇注工艺改进、环境适应等^[7-8]。其中,固体柜绝缘表面金属化处理成为当前产品的研究热点。

固体柜环氧浇注模块外表面金属化是指在环氧浇注模块外表面涂覆导电或半导体层材料并可靠接地,以实现产品小型化、提高耐候性、安全性

收稿日期:2015-10-23; 修回日期:2015-11-22

基金项目:北京市博士后科研活动经费项目(2015ZZ-146)。

Project Supported by the Beijing Postdoctoral Research Foundation(2015ZZ-146).

等。但另一方面,由于将单一的固体绝缘材料作为主绝缘介质,因对绝缘材料老化考核苛刻,另外内外屏蔽设置要求多、成本较高^[9-10]。目前国内现有产品中很大一部分环氧浇注外表面未做屏蔽和金属化处理。针对上述情况,文中将对 12 kV 固体柜环氧浇注模块外表面无金属化处理时的电场分布特征展开仿真研究,为固体柜的绝缘可靠、运行安全提供一种判定依据。

1 研究方案

文中仿真中选用的 12 kV 系列固体柜按照内部单元功能可分为两类,分别为负荷开关柜(简称 C 柜)和断路器柜(简称 V 柜)。C 柜和 V 柜的结构示意图见图 1,二者环氧浇注模块外表面皆无金属化层。

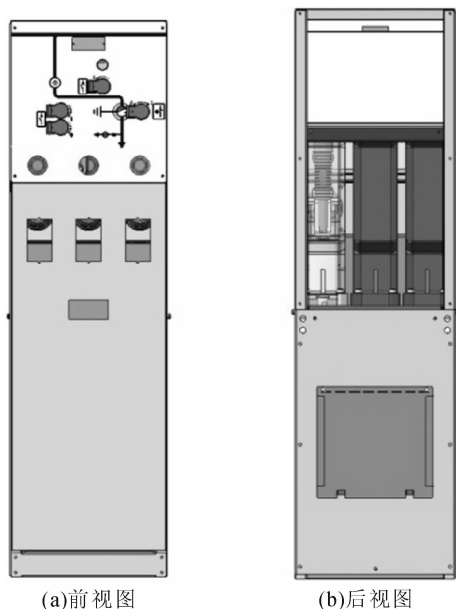


图 1 C 柜、V 柜结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of C and V cabinet

C 柜和 V 柜的主体结构、柜体尺寸、环氧浇注模块尺寸、隔离与接地开关等均相同,其区别在于内部浇注的真空灭弧室内部结构有差异,这将导致真空灭弧室固封区域的电场分布不同。同时由于固体柜环氧浇注模块未进行表面金属化处理,旁侧其浇注模块外表面与柜体外壳的间隙大小也将对固封局部电场产生影响。

基于上述分析,该节的电场仿真工作主要包括两部分:一是对 C 柜、V 柜不同真空灭弧室固封后的局部区域电场分布进行仿真;二是针对 V 柜环氧浇注模块与柜体外壳不同间隙情况下的局部电场进行仿真。

2 电场仿真结果

12 kV 固体柜无表面金属化时的电场仿真主要

基于环氧浇注模块的局部区域展开,C 柜、V 柜环氧浇注模块局部外观示意图见图 2。根据实际产品尺寸参数建立 C 柜、V 柜电场仿真模型分别见图 3(a)、(b)。为进一步分析该局部区域关键点的电位和场强,对水平中心线上的关键点进行了标记,各点的位置水平见表 1。



图 2 C 柜、V 柜环氧浇注模块局部外观示意图

Fig. 2 Appearance of local epoxy casting mold in C and V cabinet

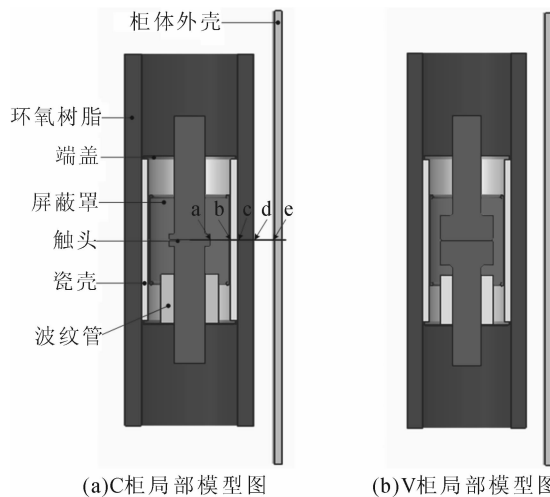


图 3 C 柜、V 柜合闸状态时环氧浇注模块局部区域仿真模型
Fig. 3 Simulation models of local epoxy casting mold in C and V cabinet at closed condition

电场仿真采用 Maxwell 3D 有限元分析软件^[11],在静电场场域下对上述模型进行仿真。仿真中施加电压为局放测试电压 $1.2U_1$ (最高电压)^[12],其峰值为即 20.4 kV,施加部位包括真空灭弧室触头、导电杆、波纹管 and 端盖,灭弧室屏蔽罩电位悬浮,柜体外壳零电位。

2.1 C 柜、V 柜环氧浇注模块局部区域电场分布

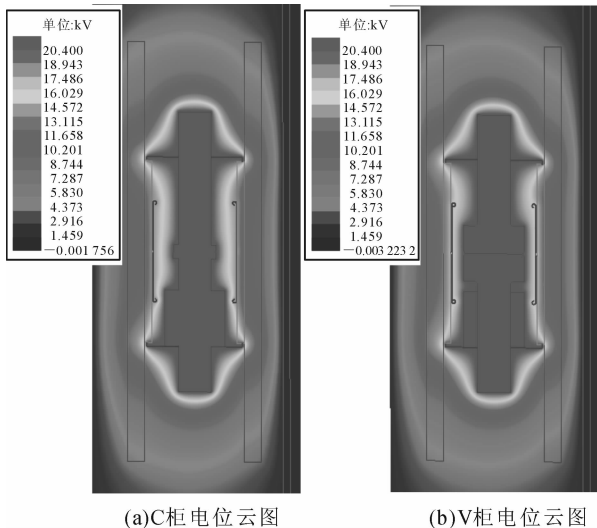
该节主要研究 C 柜、V 柜因固封真空灭弧室内

表 1 仿真模型中关键点位置标记说明

Table 1 Critical positions description in simulation models

位置	位置说明
a	灭弧室触头边缘
b	屏蔽罩中心/瓷壳内壁
c	瓷壳外壁/环氧树脂筒内壁
d	环氧树脂筒外壁/气隙
e	气隙/柜体外壳

部结构的不同而导致的环氧浇注模块局部电场分布的差异。C 柜、V 柜环氧浇注模块真空灭弧室局部区域电位分布仿真结果见图 4。从图 4 电位分布云图可知, V 柜真空灭弧室中的中间屏蔽罩离高电位更近, 感应电压更高。C 柜真空灭弧室触头边缘与屏蔽罩之间电位差别较大, 屏蔽罩电位较低。

图 4 C 柜、V 柜环氧浇注模块真空灭弧室
局部区域电位分布仿真结果图Fig. 4 Potential simulation results of local epoxy casting
mold in C and V cabinet

针对 C 柜、V 柜两种不同真空灭弧室条件, 图 5 对环氧浇注模块真空灭弧室局部区域的电位仿真结果进行了比较。相比 C 柜, V 柜中各关键点的电位整体要高。上述水平中心线各关键点的电位仿真结果见表 2。

从表 2 结果可知, 在 C 柜、V 柜施加 $1.2U_r$ 峰值电压 20.4 kV 时, C 柜真空灭弧室中屏蔽罩处电位为 13.1 kV, 为施加电位的 64.2%。而 V 柜屏蔽罩处电位为 14.6 kV, 为施加电位的 71.6%。C 柜、V 柜此处电位变化率为 10.3%。

C 柜环氧浇注模块外表面气隙处电位为 7.8 kV, 为施加电位的 38.2%。V 柜此处电位为 8.7 kV, 为施加电位的 42.6%。C 柜、V 柜此处电压差异为 10.4%。

图 6 为 C 柜、V 柜真空灭弧室内部及环氧浇注

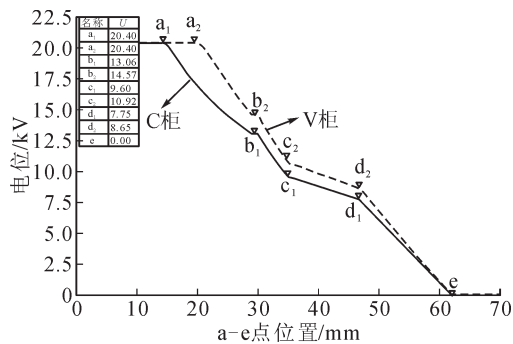
图 5 C 柜、V 柜环氧浇注模块真空灭弧室局部区域电位仿
真结果比较Fig. 5 Comparison of potential simulation results of local
epoxy casting mold in C and V cabinet

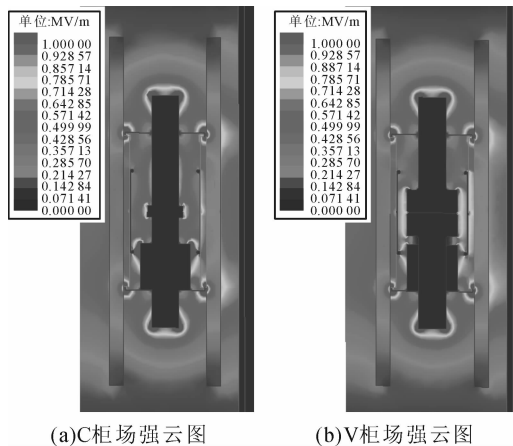
表 2 C 柜、V 柜各关键点的电位比较

Table 2 Potential comparison of critical
positions in C and V cabinet

位置	C 柜电位		V 柜电位		$(\Delta U_{VC}/U_C)/\%$
	U_C/kV	$(U_C/U_0)/\%$	U_V/kV	$(U_V/U_0)/\%$	
a	20.4	100.0	20.4	100.0	0.0
b	13.1	64.2	14.6	71.6	10.3
c	9.6	47.1	10.9	53.4	11.9
d	7.8	38.2	8.7	42.6	10.4
e	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

注: ΔU_{VC} 为 V 柜各点电位 U_V 与 C 柜各点电位 U_C 之差, U_0 为 20.4 kV。

模块外部场强分布仿真结果。



(a)C 柜场强云图 (b)V 柜场强云图

图 6 C 柜、V 柜环氧浇注模块真空灭弧室
局部区域场强仿真结果图Fig. 6 Electric field simulation results of local epoxy
casting mold in C and V cabinet

从图 6 结果可知, 针对 C 柜、V 柜两种不同真空灭弧室条件, 相同场强 1 MV/m 基准下, C 柜真空灭弧室内部及固封外部场强薄弱区域相对较小, V 柜真空灭弧室触头边缘与屏蔽罩之间电场分布相对更集中, 场强值较大。

图7对C柜、V柜真空灭弧室内部及环氧浇注模块外部局部区域中关键点的场强进行了比较。上述水平中心线各关键点场强仿真结果见表3。

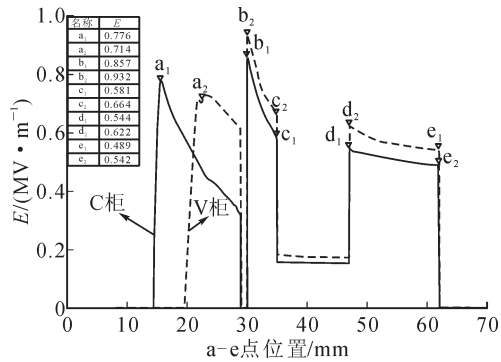


图7 C柜、V柜环氧浇注模块真空灭弧室局部区域场强仿真结果比较

Fig. 7 Comparison of electric field simulation results of local epoxy casting mold in C and V cabinet

表3 C柜、V柜各关键点的场强比较

Table 3 Electric field comparison of critical positions in C and V cabinet

位置	$E_c/(MV \cdot m^{-1})$	$E_v/(MV \cdot m^{-1})$	$\Delta E_{vc}/(MV \cdot m^{-1})$	$(\Delta E_{vc}/E_c)/\%$
a	0.78	0.73	-0.05	-5.8
b	0.82	0.93	0.11	13.7
c	0.57	0.66	0.09	16.2
d	0.53	0.61	0.08	14.3
e	0.48	0.53	0.05	10.6

注: ΔE_{vc} 为V柜各点场强 E_v 与C柜各点场强 E_c 之差。

从表3结果可知,在C柜、V柜施加 $1.2U_t$ 峰值电压 20.4 kV 时,C柜、V柜中各关键点 a-e 场强最大值出现在 b 点,即屏蔽罩处。但考虑到 b 点场强最大值仅为 9.3×10^5 V/m,这对于真空介质来讲可以耐受。

C柜、V柜绝缘模块外表面的场强分别为 0.53 MV/m 和 0.61 MV/m,二者相差 14.3%。这二者场强水平低于外表面空气—环氧气固界面介质闪络与击穿限值^[13],不会导致绝缘失败发生。

但此处的电场特征将可能对固体柜局部放电产生影响,原因是环氧浇注模块长时处于高电场之中,由于空间电离等作用,使得绝缘表面带电,形成空间电荷,产生局部放电现象^[14-16]。与此同时此处的电场水平又受到其与柜体外壳间的气隙大小的制约。基于上述分析,有必要针对固体柜环氧浇注模块与柜体外壳不同间隙下的电场分布进行研究。

2.2 V柜环氧浇注模块外表面与柜壳间不同间隙时的电场分布比较

该节主要针对V柜环氧浇注模块外表面无金属化处理情况,仿真研究环氧浇注模块外表面与柜

体外壳(地电位)间隙大小对固封局部区域电场分布的影响。仿真过程中上述间隙的设置变化范围为 1~60 mm。

V柜环氧浇注模块外表面与柜体外壳空气间隙不同大小时,真空灭弧室内部及环氧浇注模块外部局部区域各关键点的电位分布仿真结果见图8。上述不同空气间隙时,各关键点 a-e 的电位值仿真结果见表4。

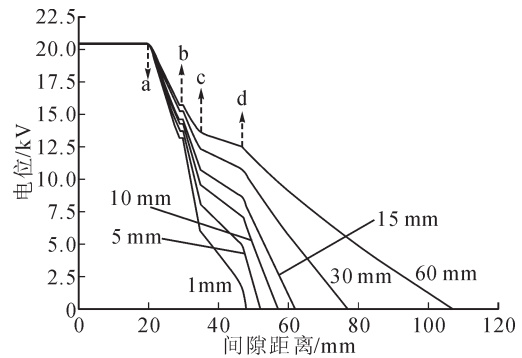


图8 V柜环氧浇注模块外表面与柜体外壳不同间隙时的电位分布

Fig. 8 Potential distribution in V cabinet with different air-gap between epoxy mold and cabinet shell

表4 V柜环氧浇注模块外表面与柜体外壳不同间隙时各关键点 a-e 电位值

Table 4 Potential results of a-e in V cabinet with different air-gap between epoxy mold and cabinet shell

空气间隙/mm	U_a/kV	U_b/kV	U_c/kV	U_d/kV	U_e/kV
1	20.4	13.2	6.0	1.7	0
5	20.4	13.8	8.1	4.9	0
10	20.4	14.3	9.7	7.1	0
15	20.4	14.5	10.7	8.6	0
30	20.4	15.1	12.2	10.7	0
60	20.4	15.7	13.5	12.5	0

图9为V柜在环氧浇注模块外表面与柜体外壳空气不同间隙条件下,真空灭弧室内部及环氧浇注模块局部区域各关键点的场强分布仿真结果。上述不同间隙时各关键点 a-e 的场强值仿真变化结果见表5。

根据表4、5结果,图10对V柜中 a-e 点电位及场强随环氧浇注模块外表面与柜体外壳间隙的变化趋势进行了综合比较。

从图10结果可知,V柜中随着地电位柜体外壳与环氧浇注外表面之间间隙的递增,真空灭弧室中间屏蔽罩、瓷壳、环氧浇注模块外表面等关键点的电位也越来越高。这说明环氧浇注模块外表面无金属化处理情况下,增大环氧浇注模块外表面与柜体外壳之间距离对于降低环氧浇注模块局部区域的

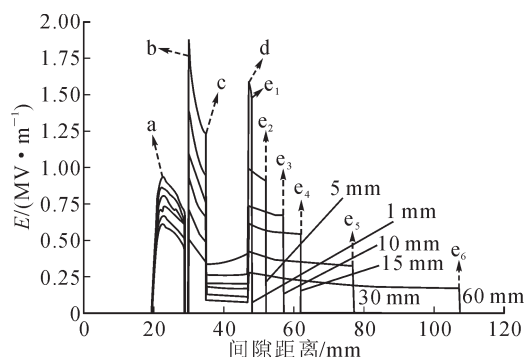


图9 V柜环氧浇注模块外表面与柜体外壳
不同间隙时的场强分布

Fig. 9 Electric field distribution in V cabinet with
different air-gap between epoxy mold and cabinet shell

表5 V柜环氧浇注模块外表面与柜体外壳不同间隙时各关键
点a-e场强值

Table 5 Electric field results of a-e in V cabinet with
different air-gap between epoxy mold and cabinet shell

空气间 隙/mm	$E_a/$ ($\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$)	$E_b/$ ($\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$)	$E_c/$ ($\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$)	$E_d/$ ($\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$)	$E_e/$ ($\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	0.93	1.88	1.22	1.59	1.48
5	0.87	1.39	0.95	1.00	0.91
10	0.80	1.07	0.77	0.74	0.68
15	0.73	0.93	0.66	0.62	0.54
30	0.67	0.71	0.49	0.41	0.33
60	0.61	0.52	0.34	0.28	0.18

感应电位起着“反作用”。同时图10结果表面随着V柜环氧浇注模块外表面与柜体外壳之间间隙的递增,对应各关键点区域的场强呈指数递减,环氧浇注模块局部区域的场强分布趋于优化。

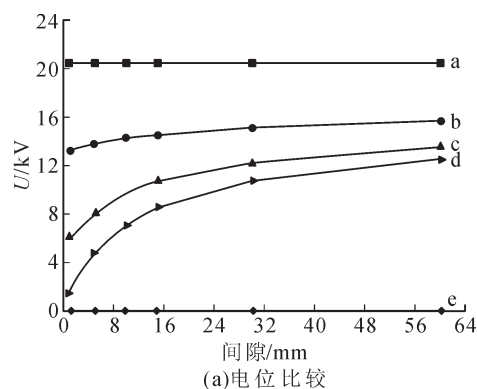
上述结果表明,由高低电位构成的静电场,虽然拉大低电位的位置对于降低高电位周围感应电位起着“反作用”,但对于降低高低电位之间各种介质的场强水平是非常有利的。

需说明是对于固体柜而言,场强这种随绝缘间隙的变化关系正好与局部放电规律相一致。可以认为固体柜产品的局放水平要遵循场强设计,而非电位设计。因此针对固体柜环氧浇注模块外表面无金属化处理情况,增大其表面与柜体外壳的空气间隙是解决该种情况下固体柜局放问题的一项有力可行的措施。

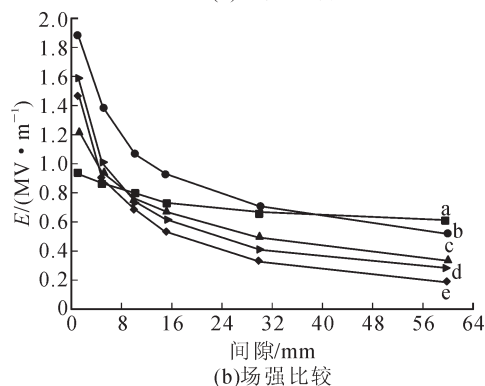
3 结论

文中针对现有实际12 kV固体柜产品环氧浇注模块外表面无金属化处理情况,展开了电场仿真研究工作。得出的主要结论如下:

1)固体柜环氧浇注模块外表面无金属化层时,



(a)电位比较



(b)场强比较

图10 V柜a-e点电位及场强随环氧浇注模块外表面与柜
体外壳间隙的变化趋势

Fig. 10 Potential and Electric field variation of a-e in V
cabinet with different air-gap between epoxy
mold and cabinet shell

现有C和V单元柜产品的电场仿真结果能够满足绝缘考核要求。

2)C和V单元柜因固封真空灭弧室内部结构的不同而导致环氧浇注模块局部电场分布存在差异。相比V柜,C单元柜中的电场分布更优。

3)增大固体柜环氧浇注模块外表面与柜体外壳之间的间隙,环氧浇注模块局部区域的场强呈指数递减,但对于降低该区域的电位却起着“反作用”。

4)电场仿真可为实际固体柜产品局放考核提供一种参考依据。认为固体柜环氧浇注模块内部导体结构及环氧浇注模块与柜体外壳间隙的场强特征制约着固体柜局部放电水平。

参考文献:

- [1] 朱书明. 12 kV 固体绝缘环网柜生产应用与市场调研报告[EB/OL]. <http://www.chinacbe.com/jishu/1/806.html>, 2014-06-27.
LI Shuming. Report of the product application and market survey about 12 kV solid insulated ring main unit[EB/OL]. <http://www.chinacbe.com/jishu/1/806.html>, 2014-06-27.
- [2] SATO J J, SAKAGUCHI O, KUBOTA N, et al. New technology for medium voltage solid insulated switchgear[C]// Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution

- Conference and Exposition(T & D).Yokahama:IEEE,2002:1-5.
- [3] LEE J H, MA J H, KIL G S. The development of 28.5 kV class solid insulated switchgear[C]//CIGRE 20th International Conference on Electricity Distribution.Prague:IEEE, 2009:1-4.
- [4] 刘志远,耿英三. 真空开关技术新动态[J]. 高压开关行业通讯,2010(2):28-36.
- LIU Zhiyuan,GENG Yingsan. The new technical developments of vacuum switch[J]. High Voltage Switchgear Review,2010(2):28-36.
- [5] 钟恒强. 固体绝缘环网柜在配网中压领域的技术现状及市场前景分析[J]. 电气应用,2011(17):60-63.
- ZHONG Hengqiang. Analysis of the technology status and market prospect of solid insulated switchgear in the distribution power system[J]. Electrotechnical Application, 2011,(17):60-63.
- [6] 李建基. 固封真空断路器及其固封绝缘开关柜[J]. 江苏电器,2008(9):64.
- LI Jianji. Solid insulated vacuum circuit breaker and solid insulated switchgear[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2008(9):64.
- [7] SHIMIZU T,KINOSHITA S,MAKISHIMA S,et al. Material and simulation technology for solid insulated switchgear [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya:IEEE, 2003:1194-1197.
- [8] SATO J,SHIOIRI T. Investigation of long-term reliability for solid insulated switchgear[C]//Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D).Orlando:IEEE, 2012:1-4.
- [9] 汤伟,张建宏,王振良,等. 环氧树脂绝缘浇注件表面金属涂层末端结构设计的探讨[J]. 高压电器,2014,50(12):137-140.
- TANG Wei, ZHANG Jianhong, WANG Zhenliang, et al. Study on the terminal structure design of metal-coating for epoxy resin casting insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2014,50(12):137-140.
- [10] 翟鹏飞. 12 kV 固体绝缘环网开关设备的研究与开发[D].保定:华中电力大学,2013.
- ZHAI Pengfei. Research and develop on 12 kV solid insulated switchgear[D]. Baoding: North China Electric Power University,2013.
- [11] 赵博,张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- ZHAO Bo,ZHANG Hongliang. The application of Ansoft12 in the field of engi-neering[M]. Beijing: China Water Power Press,2010.
- [12] 国家电网公司企业标准 Q/GDW730—2012 12 kV 固体绝缘环网柜技术条件[S].2012.
- China State Grid Corporation Standard Q/GDW730—2012 Specification for 12 kV solid-insulated ring main units[S]. 2012.
- [13] 陈玉,成永红,阴玮,等. 环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性[J]. 西安交通大学学报,2008,42(6):703-707.
- CHEN Yu,CHENG Yonghong,YIN Wei,et al. Flashover property of pure epoxy and composites along the gas-solid interface under fast pulse[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(6):703-707.
- [14] LORKOWSKA B,FLORKOWSKI M,ROEHRICH J,et al. Modeling of PD mechanism in non-uniform field at high pressure[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12):2662-2667.
- [15] 汪汛,邱毓昌,张乔根,等. 冲击电压作用下绝缘子表面电荷的积聚[J]. 高电压技术,2002, 28(8):7-8.
- WANG Feng,QIU Yuchang,ZHANG Qiaogen,et al. Charge accumulation on insulator surface under BIL[J]. High Voltage Engineering,2002,28(8):7-8.
- [16] 庞晓刚. 开关柜局部放电原因分析和处理[J]. 云南电力技术,2011,39(4):56-58.
- PANG Xiaogang. Analysis and processing reason of switch cabinet partial discharge[J]. Yunnan Electric Power,2011, 39(4):56-58.
- 孔国威(1985—),男,博士,主要从事高压真空开关、环网配电开关设备等方向研究。

(上接第78页)

interaction phenomena[R]. France:CIGRE,1997.

张军(1986—),男,硕士,研究方向为直流输电系统分析、过电压与绝缘配合设计(通信作者)。

潘爱强(1984—),男,硕士,研究方向为电力系统自动化、

电能质量等。

吴金龙(1981—),男,硕士,研究方向为柔性直流输电系统分析与控制技术。

王先为(1985—),男,博士,主要从事电力自动化研究工作。