

一起500 kV输变电工程启动调试中HGIS短路事故的分析研究

傅智为, 许 军, 林一泓, 黄海鲲

(福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007)

摘要: 介绍了一起在500 kV输变电工程启动调试中发生的HGIS短路跳闸事故的过程。通过对故障录波图的分析、现场情况调查以及对故障设备的拆解检查,发现一起HGIS隔离开关由于机构中花键与有齿套管连接松脱致使合闸不到位,从而在解环操作过程中发生击穿放电导致了短路跳闸事故。通过试验对花键与有齿套管松脱的原因进行了分析研究。通过深入分析,提出了避免类似事故的技术措施。

关键词: HGIS; 合闸不到位; 跳闸; 厌氧胶; 预紧力矩; 花键

中图分类号: TM83

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0089-05

Analysis on a Short Accident of HGIS in Start Debugging Process of the 500 kV Power Transmission Project

FU Zhiwei, XU Jun, LIN Yihong, HUANG Haikun

(Electric Power Science Research Institute of Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A short trip accident of HGIS in start debugging process of the 500 kV power transmission project is discussed. Through analysis of the oscillograph trace of the fault, field investigation, and disassembly check of the faulty equipment, the cause of the trip is determined that the loose connection of the spline and the sleeve led to incomplete closing of an HGIS isolating switch, thereby breakdown took place in the loop-untying operation to result in the trip accident. The reason for the loose connection of spline and sleeve is analyzed experimentally. In addition, some technical measures are suggested to avoid similar accident.

Key words: HGIS; incomplete closing; trip; anaerobic adhesive; pre-tightening torque; spline

0 引言

HGIS(hybrid gas insulated switchgear)能有效应对 GIS (gas insulated switchgear) 造价昂贵以及 AIS (air insulated switchgear) 占地面积大的问题,近年来在电力系统中得到了广泛应用^[1-6]。由于 HGIS 所有开关设备都处于金属封闭壳体内,且多在制造厂内安装调试后整体运输到现场,现场调试、运行人员无法直接观测开关设备状态,只有通过各种二次信号、机械位置指示了解 HGIS 中开关设备的运行状态^[7-9]。因此,HGIS 设备制造、安装、调试各个环节的可靠性就显得尤为重要。2013年2月3日,某500 kV 变电所输变电工程进行送电调试工作中发生了一起因 HGIS 隔离开关合闸不到位引起的短路跳闸事故。笔者通过了解事故经过,对事故原因进行了深

入分析,并针对类似事故的防范措施进行了探讨。

1 事故经过

2013年2月3日,500 kV 某变电所(以下简称 A 站)输变电工程进行启动送电调试工作,启动调试系统一次接线示意图见图1。该站500 kV 开关设备均为 HGIS。

启动调试过程中,500 kV I 路、500 kV II 路分别通过500 kV B 站5043 开关、C 站5043 开关带电运行,在与 A 站5023 开关、500 kV II 段母线与5043 开关进行合环运行调试时发现,A 站5023、5043 开关 C 相无电流,各变电站开关 CT 所测电流见表1。

现场立即申请停电检查,15 时 25 分,调度下令500 kV C 站500 kV II 路由运行转热备用,15 时 30 分 30 秒 405 毫秒5043 开关断开(SOE 记录时间,

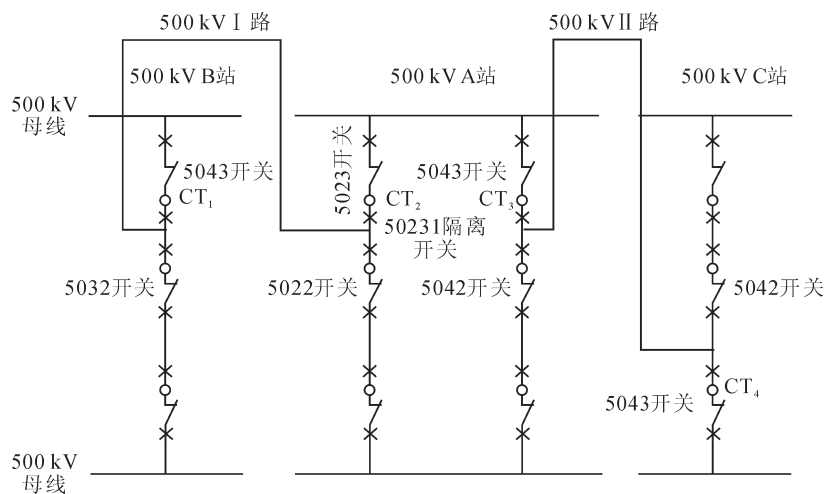


图1 系统一次接线示意图

Fig. 1 Primary connection schematic of the system

表1 各变电所开关 CT 电流

Tab. 1 Current of substations's switch CT

站点/CT	A相/A	B相/A	C相/A
A站/CT ₂	103	105	0
B站/CT ₁	170	170	90
C站/CT ₄	163	104	159

5042开关已断开),15时30分30秒409毫秒B站侧500 kV I路RCS931距离II段保护动作,C相故障(RCS931保护作为启动后备,差动及另一套保护PSL603未投入),500 kV I路三相跳闸。各500 kV变电站保护装置统一采用GPS对时。

2 跳闸原因调查分析

2.1 故障录波图分析

500 kV I路跳闸后,现场立即调取线路故障录波图进行分析。故障录波波形见图2。

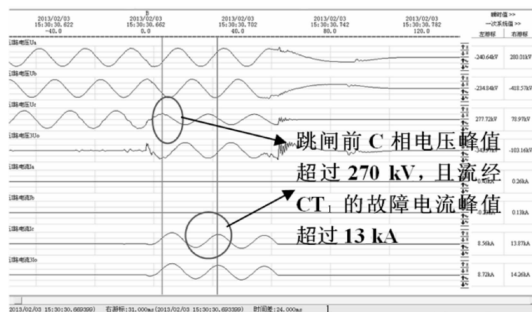
由图2故障波形可见:

1)B站500 kV I路故障波形显示,C相一次故障电流峰值超过13 kA,如此大的电流说明在500 kV I路RCS931保护范围内发生了单相接地故障。

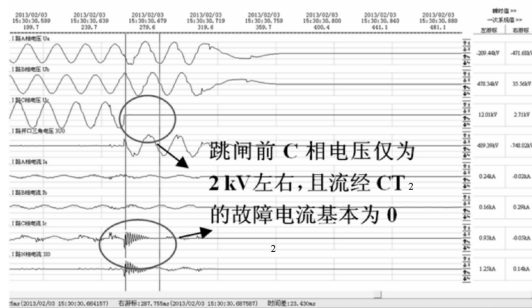
2)A站CT₂、CT₃均未测量到故障电流,说明故障点位于500 kV I路B站5043开关CT₁至A站5023开关CT₂之间,CT位置如图1中所示。

3)在跳闸切除故障电流前,500 kV I路B站侧C相故障电压峰值超过270 kV,而A站侧C相电压接近为0,可推断故障点应在A站侧出口处。保护软件故障测距结果为故障点距B站56.8 km处(500 kV I路线路全长59.7 km),与推断结果相符。

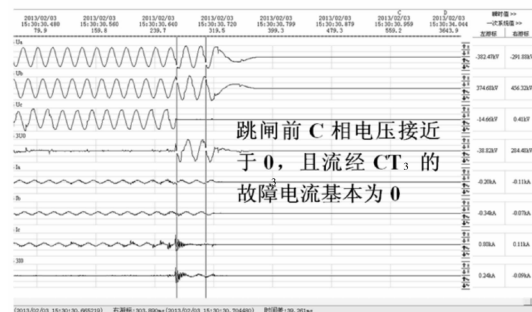
通过对故障录波图的分析^[9],可以判断在500 kV I路A站侧出口处发生C相对地短路。结合线路合环时500 kV A站5023、5043开关C相无电流的现象,怀疑现场A站5023间隔开关设备存在故障。



(a) B站500 kV I路故障录波图



(b) A站500 kV I路故障录波图



(c) A站500 kV II路故障录波图

图2 A、B站500 kV线路故障录波图

Fig. 2 Graphs of 500 kV line's fault recorder of substation A and B

2.2 现场设备检查分析

通过询问500 kV A站现场人员得知,事故发生时,5023开关附近有异常声响,进一步印证了

5023 开关间隔存在故障的判断。现场对 5023 开关设备进行了进一步检查, 将各气室的 SF_6 气体回收至常压后打开气室观察窗, 发现 50231 隔离开关 C 相动触头尚未接触到静触头, 且隔离开关触头有明显放电烧蚀痕迹, 见图 3。而现场分合闸指示器显示该隔离开关处于合闸到位状态。



图 3 50231 隔离开关动静触头示意图

Fig. 3 Schematic of the moving and static contact of isolating switch 50231

综合以上故障现场和调查分析结果, 可判断此次故障的发展过程如下:

1) 在进行合环调试过程中, 5023 开关转热备用时, 50231 隔离开关 C 相合闸不到位, 5023 开关合上后, 由于 50231 隔离开关两侧电压均为系统电压, 压差很小, 合闸暂态电压并未使隔离开关间隙发生击穿。

2) 在现场进行解环停电操作时, C 站侧开关先行断开, 50231 隔离开关 C 相动触头 (500 kV II 路侧) 失压, 间隙在两侧系统压差作用下击穿、燃弧, 并发展为对 HGIS 外壳短路放电。

另外, A 站 RCS931 保护动作时间与 C 站线路开关断开时间仅相差 4 ms, 从时间上高度相关, 与推断相符。

3 隔离开关故障原因分析

3.1 隔离开关操作机构拆解情况

为确认隔离开关合闸不到位的具体原因, 现场对 50231 隔离开关 C 相机构箱进行了拆除检查, 发现隔离开关本体花键与有齿套管松脱、防松胶(厌氧胶)失效, 造成传动过程中花键与有齿套管咬合力度不够, 传动失效, 详见图 4。因此机构箱输出轴正常传动至花键, 但无法带动内传动轴转动, 导致动触头合闸不到位, 而辅助开关及分合闸指示器均指示合闸到位。

该型号隔离开关的机构与 HGIS 本体属一体化组件, 在制造厂内安装调试合格后运送现场, 现场安装调试均未调整该部位。

在 50231 隔离开关的传动环节中, 内传动轴与有齿套管相连, 有齿套管通过花键与操作机构的输出



图 4 50231 隔离开关机构拆解示意图

Fig. 4 Schematic of the operating mechanism of isolating switch 50231

轴连接, 从而令操动机构带动本体内部动触头运动。制造厂在进行花键与有齿套管正常装配时, 在螺纹连接处使用厌氧胶作为螺纹防松胶(在内传动轴螺孔圆周均分 3 点滴, 每点 2~4 滴), 使用工装将花键拧入, 在拧紧连接时必须施加预应力, 锁紧力矩为 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

3.2 松脱原因分析

根据花键与有齿套管的传动结构, 可能影响其螺纹连接强度的因素有 2 个, 分别是连接装配时的预紧力矩和螺纹涂抹厌氧胶的用量^[11-14]。

为明确 500 kV A 站 500 kV 侧 HGIS 用隔离开关花键松脱的原因, 在试验室内对花键与有齿套管螺纹连接强度进行破坏性试验。在正常施加预应力 ($50 \text{ N}\cdot\text{m}$) 而厌氧胶使用量不同的情况下, 进行花键与有齿套管间螺纹连接强度破坏性试验, 以验证厌氧胶的使用量对花键与有齿套管间螺纹连接强度的影响。具体试品情况见表 2。

表 2 被试品分组情况

Tab. 2 Table of the grouping of samples

试品厌氧胶涂抹情况	试品编号
不涂抹	1、2、3
涂抹少量(仅 1 滴)	4、5、6
涂抹正常使用量一半	7、8、9
涂抹正常使用量	10、11、12

待厌氧胶固化完全后, 将有齿套管与花键的连接固定在试验工装上, 通过连接工装将力矩扳手与花键进行连接, 使用力矩扳手对花键施加逆时针方向(松脱方向)的力矩, 见图 5。

依次对 1~12 号试品进行力矩检测试验, 以 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 力矩为单位逐渐增加力矩扳手的动作力矩, 直到有齿套管与花键松脱为止, 同时记录松脱时力矩扳手的力矩值, 见表 3。



图5 力矩检测示意图

Fig. 5 Schematic of the torque test

表3 力矩检查结果

Tab. 3 Result of the torque test

厌氧胶使用情况	样品编号	松脱力矩 /(N·m)	平均值 /(N·m)
不涂抹的情况	1	53	54.5
	2	55	
	3	55	
涂抹少量的情况 (一滴)	4	60	65.0
	5	65	
	6	70	
涂抹正常使用量 一半的情况	7	75	76.7
	8	85	
	9	70	
涂抹正常使用量 的情况	10	70	76.7
	11	70	
	12	90	

从有齿套管与花键外螺纹连接强度破坏性试验结果发现,厌氧胶对螺纹的连接强度只起到辅助增强的作用,且当厌氧胶的使用达到一定量时,锁紧作用就不明显了。

通过排除法即可判断预紧力矩对螺纹的连接强度起到主要作用,通过试验也证明了即使未使用防松胶,花键与有齿套管的螺纹连接也可达到一个较高的强度(54.5 N·m),远大于此型号隔离开关最大操作力矩(2.5 N·m)。因此,可以推断该次 500 kV HGIS 隔离开关故障中,花键与有齿套管松脱的主要原因因为人工装配时紧固力矩不足。

4 事故防范措施

事故发生后,现场对故障以及相邻气室进行了整体更换,不仅造成了人力、物力上的浪费,也推迟了工程的工期,对电网安全稳定运行造成了不良的影响。为了避免此类事故的再次发生,需要对防范措施进行深入探讨。

4.1 合理安排倒闸操作顺序避免设备短路跳闸

在该次启动调试中,进行合环运行的倒闸操作

顺序为:先合上 C 站、B 站侧线路开关,使 500 kV I 路、II 路带电,最后合上 A 站 5043、5023 开关实现合环运行。而当发现异常,进行解环、停电转检修操作时,先断开了 C 站侧线路开关,导致 50231 隔离开关 C 相单侧失压,最终引发了燃弧短路事故。

在此次事故中,现场发现异常时,若按照合环调试操作的逆顺序进行倒闸操作,首先断开 A 站 5023/5043 开关,将系统逐步回退至上一个安全状态,此时由 5023/5043 开关断口和 50231 隔离开关间隙共同承担系统压差和暂态电压,则可避免击穿燃弧的发生。停电检查后,只需在现场进行隔离开关机构传动环节的处理,而无需进行整体更换,可减少隔离开关故障带来的损失。另外,根据现场各站开关 CT 测量结果,B 站以及 C 站 C 相均有电容电流存在,也可初步判断 A 站有开关设备存在故障可能,并可据此安排倒闸操作顺序。

因此在遇到类似异常现象,进行解环、停电操作时,不应局限于传统的思维和倒闸操作原则,而应根据故障现象合理安排倒闸操作顺序^[15-18]。

4.2 防范隔离开关传动缺陷措施

对于操作机构采用相似传动结构的开关产品,为了避免类似隐患的存在,宜在安装或检修现场对花键和有齿套管的连接进行力矩检查。考虑到隔离开关绝缘拉杆强度(该型号产品为 40 N·m)和最大操作力矩,进行现场检查时,应合理选择力矩值^[11-12]。

可按如下步骤进行力矩检查:

- 1)将隔离开关操动机构从隔离开关本体上拆下,使用连接工装、力矩扳手与花本体键进行连接;
- 2)先逆时针旋转力矩扳手(面对隔离开关),使隔离开关本体进行合闸操作,当隔离开关合闸到底时,继续按原方向施加 15 N·m 力矩,花键未发生松动,视为花键与有齿套管螺纹连接可靠;
- 3)然后,顺时针旋转扳手(面对隔离开关),使隔离开关本体进行分闸操作,当隔离开关分闸到底时,继续按原方向施加 25 N·m 力矩,使花键与有齿套管螺纹连接更加可靠,确保隔离开关安全可靠运行。

5 结论

此次事故的根本原因是制造厂装配人员在装配 HGIS 隔离开关本体花键与有齿套管时,未按要求施加足够的预紧力矩,导致花键与内传动轴在出厂试验以及现场调试的反复操作中松脱,致使隔离开关出现合闸不到位而本体合闸指示到位的情况,并最终造成了击穿燃弧事故。

近年来,由于行业内竞争激烈以及招标环境的

变化,设备中标价格越来越低,各制造厂工作重心更多的放在设备的新技术研发和成本控制中,而在制造、安装、调试等各个环节的把控不严,HGIS 设备故障引发的电网事故时有发生^[19-24]。为了在现有条件下确保电网安全稳定运行,应当深入分析、相互借鉴,对设备存在的隐患采取必要的防范措施,防止事故的发生。

参考文献:

- [1] 蔡金博,郝 炜,徐东升. HGIS 在 500 kV 变电所中的应用前景[J]. 吉林电力,2003,169(6):36-38.
CAI Jinbo,HAO Wei,XU Dongsheng. Prospect of HGIS applied to 500 kV substation[J]. Jilin Electric Power,2003,169(6):36-38.
- [2] 宋 杲,李 炜,宋竹生,等. 国网公司系统组合电器运行情况[J]. 高压电器,2009,45(6):78-82.
SONG Gao,LI Wei,SONG Zhusheng,et al. Operation condition analysis for GIS in state grid corporation of China[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(6):78-82.
- [3] 龙锦壮,王克涛,赵 鑫,等. 一种工程实用的 GIS 定量检漏方法[J]. 电网与清洁能源,2013,29(6):67-70.
LONG Jinzhuang,WANG Ketao,ZHAO Xin,et al. A practical engineering method for GIS leaking quantitative detection[J]. Power System and Clean Energy,2013,29(6):67-70.
- [4] 李云阁,尚 勇,施 荣,等. 750 kV GIS 中 VFTO 现场实测波形分析[J]. 电网与清洁能源,2011,27(11):25-29.
LI Yunge,SHANG Yong,SHI Rong,et al. Analysis of VFTO waveforms on-site measured on 750 kV GIS[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(11):25-29.
- [5] 王志毅. 新型 500 kV 超高压开关设备(HGIS)的设计选择[J]. 电力建设,2004,25(4):47-49.
WANG Zhiyi. Design and selection of NEW 500 kV HGIS[J]. Electric Power Construction,2004,25(4):47-49.
- [6] 包红旗,刘 静.HGIS 组合电器技术的应用[J]. 吉林电力,2005,181(6):10-12.
BAO Hongqi,LIU Jing. Application of HGIS combined electrical apparatus[J]. Jilin Electric Power,2005,181(6):10-12.
- [7] 傅旭华. 组合式高压电器(HGIS)的特点浅析[J]. 浙江电力,2006,25(3):67-68.
FU Xuhua.Characteristic of hybrid gas insulated switchgear[J]. Zhejiang Electric Power,2006,25(3):67-68.
- [8] 郭贤珊. 高压开关设备生产运行实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [9] 沈 婷. 变电站中使用 HGIS 设备应注意的问题[J]. 电力建设,2008,29(10):98.
SHEN Ting. Issues on application of HGIS devices in substations[J]. Electric Power Construction,2008,29(10):98.
- [10] 王微波. 故障录波数据中的故障信息提取与分析[D]. 北京:华北电力大学,2007.
- [11] 张露露,杨学林,游 敏,等. 厌氧胶[J]. 中国胶粘剂,2004,13(2):46-49.
ZHANG Loulou,YANG Xuelin,YOU Min,et al. Anaerobic adhesive[J]. China Adhesives,2004,13(2):46-49.
- [12] 翟海潮,李印柏,林新松. 胶粘剂、密封剂在机械设备制造与维修中的应用[J]. 粘接,2002,23(1):36-40.
ZHAI Haichao,LI Yinbai,LIN Xinsong. Adhesive and sealant used in machinery and equipment assembly,maintain and repair[J]. Adhesion,2002,23(1):36-40.
- [13] 陈 燕. 联接用螺栓预紧力矩计算和参考使用值[J]. 电机技术,2009(1):53-55.
CHEN Yan. Pre-tightening torque calculation of screw bolts hitch and its applicable reference value[J]. Electrical Machinery Technology,2009(1):53-55.
- [14] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [15] 汤建人,曹保良. 变电站倒闸操作关键点及危险点分析与预控[J]. 机电信息,2012,354(36):12-13.
TANG Jianren,CAO Baoliang. Key points of substation's switching operation and analysis and pre-control of dangerous points[J]. Mechanical and Electrical Information,2012,354(36):12-13.
- [16] 孙晓敏. 变电站倒闸操作过程中隔离开关故障处理方法[J]. 广东电力,2011,24(7):84-89.
SUN Xiaomin. Treatment process of disconnecting switch faults in switching operation of substations[J]. Guangdong Electric Power,2011,24(7):84-89.
- [17] 马银山. 电气倒闸操作及误操作分析[J]. 中国电力,2003,36(z1):43-46.
MA Yinshan. Analysis of electric operation and operational errors[J]. Electric Power,2003,36(z1):43-46.
- [18] 李云阁,侯清川,周 斌,等. 750 kV GIS 中 VFTO 峰值[J]. 电网与清洁能源,2010,26(12):8-11.
LI Yunge,HOU Qingchuan,ZHOU Bin,et al. VFTO magnitude values on the 750 kV GIS[J]. Power System and Clean Energy,2010,26(12):8-11.
- [19] 杨立军,甄 利,李 强,等. 500 kV HGIS 隔离开关合闸不到位原因分析[J]. 河北电力技术,2011,30(6):40.
YANG Lijun,ZHEN Li,LI Qiang,et al. Cause analysis on some 500 kV HGIS disconnecter fault[J]. Hebei Electric Power,2011,30(6):40.
- [20] 朱作欣,朱全胜,马 超,等. 基于 MapX 的电力系统 GIS 人机交互设计[J]. 电网与清洁能源,2011,27(12):28-33.
ZHU Zuoxin,ZHU Quansheng,MA Chao,et al. Design of GIS human-computer interaction based on MapX for electric power system[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(12):28-33.

(下转第 99 页)

- current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(1):84-87.
- [12] 赵建洲, 姚恒智, 袁奥琪, 等. 电流互感器末屏损耗测试稳定性分析与研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(4):46-50.
- ZHAO Jianzhou, YAO Hengzhi, YUAN Aoqi, et al. Stability analysis and study on bottom shielding loss test of current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4):46-50.
- [13] 严璋, 朱德恒. 高电压试验技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [14] 李鹏. 高压开关设备国内外产品水平[Z]. 西安: 西安高压电器研究院有限责任公司, 2011.
- [15] YANG Qiping, XU Danfeng. Development of an power transmission line online monitoring system[C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. [S.l.]: IEEE, 2011: 1-5.
- [16] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [17] IEEE Std 1159—1995 IEEE recommended practice for monitoring electric power quality[S]. 1995.
- [18] LIU Jian, SONG Zhen, CHENG Hongli, et al. A current transformer feeding power supply for distribution automation systems[J]. IEEE Trans. on PEITS, 2009(3):105-109.
- [19] 杨书杰, 张贤跃. 高压侧测量用电源设计[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(12):113-115.
- YANG Shujie, ZHANG Xian Yue. Design of power source for measuring at high-voltage side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(12):113-115.
- [20] 赵丽华, 高进强, 郭相国. 浅谈电力设备智能化[J]. 高压电器, 2010, 46(12):1-4.
- ZHAO Lihua, GAO Jinqiang, GUO Xiangguo. Discussion on intelligent electric power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12):1-4.
- 秦欢. 高压测量系统感应取能电源设计[J]. 现代电力, 2009, 26(5):32-36.
- QIN Huan. Design of induced power apparatus for high voltage measuring system[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(5):32-36.
- [22] 郭琳云, 尹项根, 严新荣, 等. 配电网智能设备自取能电源的效率提升研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(S1):217-221.
- GUO Linyun, YIN Xianggen, YAN Xinrong, et al. Research of improving power efficiency for intelligent device self-power supply utilized in power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1):217-221.
- [23] 郭昊坤, 吴军基. Agent 技术在中国智能电网建设中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2):13-16.
- GUO Haokun, WU Junji. Application of Agent technology in China's smart grid construction[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2):13-16.
- [24] 杨帆, 赵书强. 智能电网的发展对大电网可靠性评估的影响[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(10):24-30.
- YANG Fan, ZHAO Shuqiang. Impact of smart grid development on composite power system reliability evaluation[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(10):24-30.
- [25] 朱鸿吉, 侯成革, 李洪臣. 电容式电压互感器铁磁谐振产生机理及其抑制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(2):43-46.
- ZHU Hongji, HOU Chengge, LI Hongchen. Production mechanism of ferro-resonance of capacitor voltage transformer and its suppression method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(2):43-46.
- 王静丽(1985—), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事高压产品开发工作。

(上接第 93 页)

- [21] 段剑, 何子东, 霍凤鸣, 等. 550 kV HGIS 隔离开关拒动分析[J]. 高压电器, 2010, 47(1):58-60.
- DUAN Jian, HE Zidong, HUO Fengming, et al. Analysis about rejecting remote accident of 550 kV HGIS disconnecting switch[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 47(1):58-60.
- [22] 李真, 刘俊莹. 一起 HGIS 检修作业不当引起跳闸事故的分析[J]. 电工技术, 2010(6):45.
- LI Zhen, LIU Junying. Analysis of HGIS trip accident caused by improper maintenance[J]. Electric Engineering, 2010(6):45.
- [23] 黄伟雄. 500 kV HGIS 操作机构的缺陷处理[J]. 广东输电与变电技术, 2006(1):18-21.
- HUANG Weixiong. 500 kV HGIS operation mechanism of processing[J]. Guangdong Transmission and Substation Technology, 2006(1):18-21.
- [24] 巫环科, 陈永佳. 500 kV HGIS 液压操作机构打压频繁的分析及对策[J]. 高压电器, 2012, 48(2):119-122.
- WU Huanke, CHEN Yongjia. Analysis and countermeasures to frequent pressurizing of 500 kV HGIS hydraulic operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2):119-122.
- 傅智为(1985—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统防雷及高压开关技术。
- 许军(1985—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统过电压。