

# 智能型开关电器的研发现状与分析

臧春艳, 胡李栋

(华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 随着中国智能电网建设向纵深推进,大量采用智能型电力开关设备是大势所趋。笔者列举了若干国内外最新研发的智能型开关电器产品实例,包括智能断路器、智能 GIS、智能开关柜、智能熔断器和其他新型智能开关电器产品,并对目前智能型开关电器研发存在的困难以及相关标准的制订情况进行了分析,以供研究人员和工程设计者参考。

**关键词:** 智能型开关电器; 智能电网; 数字化变电站

**中图分类号:** TM56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2011)03-0001-05

## Development and Analysis of Intelligent Switch Devices

ZANG Chun-yan, HU Li-dong

(Institute of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** With the development of the smart grids in China, applying more and more intelligent power switch devices becomes a trend. This paper lists some newly developed intelligent switch devices in China and abroad, which include intelligent circuit breaker, intelligent GIS, intelligent switchgear, and intelligent fuse, etc., and analyzes the difficulties in development of the intelligent switch devices and the relative standards making status. This study may offer a reference to the relative researchers and project designers.

**Key words:** intelligent switch; smart grid; digital substation

## 0 引言

开关电器是电力系统中的重要元件,它是电力系统中使用量最大且耗资最多的一次设备,它能否正常工作直接维系系统的安全与稳定<sup>[1]</sup>。智能化是开关电器的发展趋势,其动力来自于电力系统越来越高的可靠性要求及其自动化程度。可以说智能化开关的应用是自动化电力设施维持电网稳定运行的前提<sup>[2]</sup>。早在 40 年前,研究者就开始在配电系统实践开关智能化,即在配电开关外附加智能控制器,用以自动判别线路故障,切除与隔离故障并恢复健康区段的供电,称之为“自动重合器”与“自动分断器”。随着计算机技术的普及,开关电器智能化沿着两条路线发展:一是把设备状态通过遥控的方法反映到电站主控计算机,实现开关乃至整个系统的智能化,这是电站层面的智能化;二是开关本体的智能化。其中后者更为国内外制造厂家所接受,因为元件智能

化才是最根本最可靠的智能化<sup>[3]</sup>。

相比传统开关,智能型开关设备最大的优势在于其拥有智能。智能型开关电器是指开关电器既具有传统开关功能,又能实现人工智能,即开关电器设备应该首先具有灵敏准确获取周围大量信息的感知功能;其次具有对获取信息进行处理及对处理结果进行判断的思维能力;最后还具有对处理结果的再生信息实施的操作功能<sup>[4]</sup>。智能型开关电器应具有如下特点:①高性能、高可靠性;②减少维护;③硬件软件化;④具备在线监测和自诊断功能;⑤提供网络化远动接口;⑥功能自适应等<sup>[5]</sup>。

目前智能型开关设备的研究已有较大的进展,这些研究主要集中在新型传感器技术、控制器技术等难点与具有智能保护和测控功能的实际产品的开发上。随着智能断路器、智能 GIS 等一系列新产品的涌现,将使供电可靠性提高、监测能力增强、恢复供电加快、运行维护更加经济方便,也将为中国的智能电网建设打下坚实基础。

收稿日期:2010-09-05; 修回日期:2010-11-07

## 1 产品实例

### 1.1 智能断路器

IEC 62063 标准中对于智能断路器设备的定义为:具有较高性能的断路器和控制设备,配有电子设备、传感器和执行器,不仅具有断路器的基本功能,还具有附加功能,尤其在监测和诊断方面<sup>[6]</sup>。

中国早在 1992 年,由西安高压电器研究所、广东湛江高压电器厂、四川川东高压电器厂联合研制的高压 SF<sub>6</sub> 重合器,采用电子式控制器完成重合器的判定与控制,不仅具备常规断路器的控制和保护功能,而且还能自动地监视输电线路的运行状态<sup>[7]</sup>。近年来,国内不少厂家也推出了包括户内和户外、开关本体与操动机构一体安装和开关本体与操动机构分离安装等各种类型全方面的智能断路器产品。

ABB 公司最新研制的集测量、保护、开断于一体的 eMV1 型真空断路器,是在 VM1 型作为集成模块的基础上,每一极加装了 Rogowski 线圈,电子控制装置加装了保护功能,其可选的通信模块几乎无需二次接线就能实现全面控制<sup>[8]</sup>。另外,该公司还推出了具有人工智能技术的断路器 (circuit breaker with artificial intelligence technology, CAT),它是专为 ELF 型 SF<sub>6</sub> 断路器和 ELK 型封闭式组合电器而开发和实验的,见图 1。CAT 为一模块式电路,它由 3 个独立的分相模块所组成,可使断路器在最佳投切时刻进行每相独立操作,减轻了投切时的瞬时过电压和电流对设备的应力<sup>[9]</sup>。

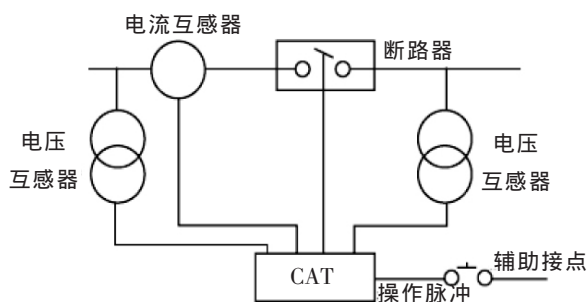


图 1 CAT 接线示意图

Fig.1 Sketch map of CAT connection

日本富士公司在原有真空断路器上添加了过电流继电器、检测用电流互感器以及各种传感器,使断路器具备了自诊断功能及传输功能,构成了集监视、通信、控制和保护为一体的智能单元,从而提高了可靠性。

在众多智能断路器产品中,智能型低压万能式断路器的技术发展的较为成熟。如中国上海电器科学研究所研发的 DW45 型万能式断路器和国外

ABB 公司的 F 和 E 系列、德国金钟-默勒公司的 IZM 系列、GE 公司的 MPAKRT 系列等均属该类产品,并已在低压配电网中得到大量应用<sup>[10]</sup>。

### 1.2 智能 GIS

智能 GIS 是将微电子技术、计算机技术、传感技术以及数字处理技术同电器控制技术结合在一起应用在 GIS 的一次和二次部分,将传统的机电系统发展成以计算机为中心的现代智能化系统。GIS 的智能化主要表现在不同的参数在线监测与控制操作两个方面<sup>[11]</sup>。具体来说,它是采用新型传感器替代电磁式电流电压互感器,新的电子操动机构代替机电继电器,利用免损传感器采集 GIS 的状态数据,这些数据通过光纤数据总线送到其他具有控制、保护、计量功能的计算机中,计算机对数据进行检测、分析、判断、控制、保护和测量,监视 GIS 的运行状态,并可对系统自身行定期自检。

SIEMENS 公司的 8DN9GIS 采用了在线检测系统,利用计算机辅助的电子控制和监视单元进行连续控制和监测,用电流和电压传感器取代传统电流电压互感器,带间隔处理能力的数字间隔控制系统用于监测和记录所有基本运行参数,这样可以进行系统发展趋势分析,实现状态检修<sup>[12]</sup>。

Alstom 公司在就地控制柜中安装计算机控制二次回路,用密度计、光电传感器、电流传感器和局放测量传感器对 GIS 进行状态监测,用光纤或屏蔽电缆传送信号,数字技术和计算方法将所有信息不仅用于间隔的自动控制,也用于监测整个设备<sup>[13]</sup>。

日本东芝公司在第 2 代 C-GIS 中采用多种传感器技术,如应用电晕传感器、压力传感器、气体传感器、温度传感器、漏电流传感器监视诊断绝缘性能;应用温度传感器、光纤温度计检测导电性能;使用了开、闭传感器检测机械性能,掌握 GIS 的内部状况。C-GIS 投入运行后可以按照诊断结果进行预先维修,提高各设备可靠性<sup>[14]</sup>。

ABB 公司的 EXK 型 GIS 为智能化产品,有 72.5/123 kV 两个电压等级。其 EXK-01 型 Smart-GIS 中体现了较为典型的智能技术应用<sup>[15]</sup>,见图 2。它利用新型传感器和操动机构代替了感应式互感器和电磁继电器及辅助开关,通过 6 个传感器检测电流电压、温度、气压、气体密度、开关关合、操作机械能量;同时给每个一次装置配备传感器和执行器的处理器接口 (process interface for sensors and actuators, PISA),传感器采集的信息存储在分散的 PISA,完成 A/D 变换、测量信号的预处理,向总线发送和执行控制和保护命令等功能。另外,所有一次元件都通过串

行光纤总线接到间隔的控制箱, 从而提高了信号传输的可靠性。

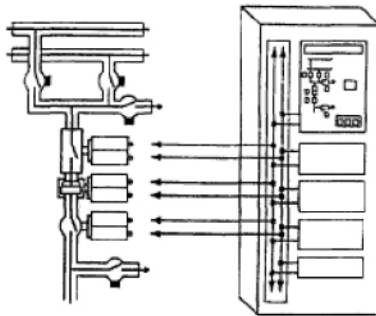
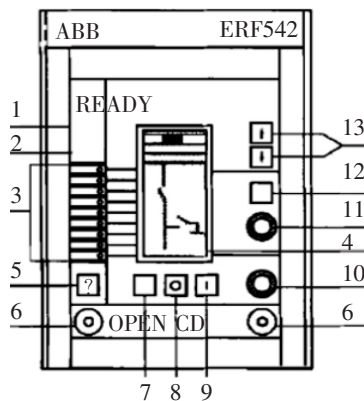


图2 EXK-01型GIS方案  
Fig.2 Plan of EXK-01 type GIS

### 1.3 智能高压开关柜

现代化的高压开关柜作为一种成套设备, 其智能化相较于高压断路器会更具有应用上的意义。目前在国际上处于领先地位的智能化高压开关柜产品均具有脱扣回路断线监测、动作时间检测、接触部件检测、弹簧的储能时间检测、温度/湿度检测和柜门的监视等功能。

ABB公司推出的智能高压开关柜 REF542, 其集中控制/保护单元具有限流、过电压和欠电压、过热以及接地故障等多种保护功能, 并能根据需要任意组合; 集中控制/保护单元还具有智能诊断能力, 能对其所监测到的数据进行分析和处理、进行故障预测、判断开关的剩余使用寿命和计算出维修期限, 见图3。该型开关柜的监视功能包括对电气方面的辅助回路、电动机操动开关装置的电源及跳闸线圈完好性的监视; 机械方面包括监视断路器储能弹簧状态监视和机械操作次数; 另外还包括对软件与时间和热相关参数等方面的监视<sup>[16]</sup>。



1—装置工作状态显示; 2—故障显示; 3—功能显示; 4—液晶显示; 5—查询按钮; 6—紧急分闸按钮; 7—操作设备选择按钮; 8—分闸按钮; 9—合闸按钮; 10—就地/远方切换开关; 11—运行/设定切换开关; 12—确认按钮; 13—参数显示按钮。

图3 智能化集中控制/保护单元

Fig.3 Intelligent centralization control/protection unit

SIEMENS公司的SIPROTECT4综合保护装置和中国西电集团公司的XGN46-40.5型充气柜(气体绝缘开关柜)等中压开关柜产品也较多的采用了智能化方案<sup>[17]</sup>。

### 1.4 智能熔断器

智能熔断器除了拥有传统熔断器限制大电流故障的功能以外, 还有自我监控及为整个电站的运行提供线路情报等功能。

美国GE公司已研制出了额定电压为5.5~26 kV、额定电流65~175 A的高压限流熔断器, 它的特点是尺寸小、额定电流大、分断能力强。内部的智能检测单元能对线路供电状况进行检测和判定, 再通过触发化学炸药包按要求动作, 从而实现熔断器时间-电流特性的智能控制<sup>[18-19]</sup>。图4(a)为智能化熔断器熔体部件布置示意图, 熔体的中部有一个过电流传感器, 数个化学炸药包沿着熔体长度方向布置。在正常工作情况下, 触发电路由空气间隙 $A_1$ 隔离。当主熔体在某种情况下任意一处熔断时, 断开处的电弧电压使间隙 $A_1$ 击穿, 引起电流流过触发电路, 从而在低过载电流下点燃化学炸药包, 在熔体上产生多个串联电弧来开断电流。大电流情况下的开断与一般限流熔断器相似。智能化熔断器的保护系统由多个智能化熔断器和一个保护控制中心(PCC)组成, 见图4(b)。

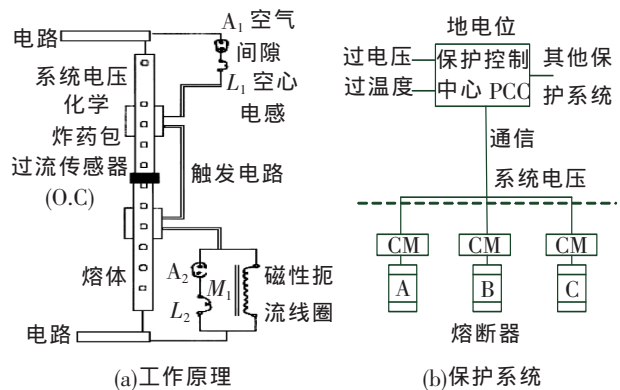
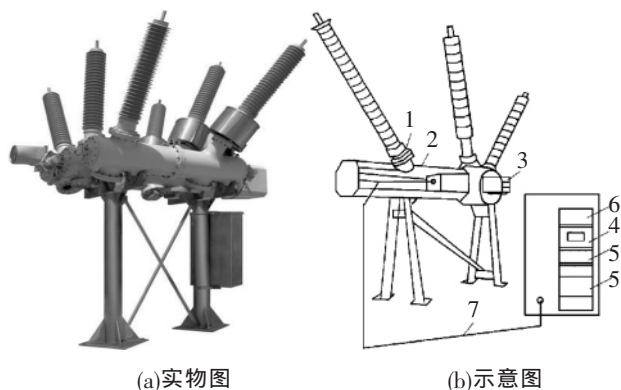


图4 智能化熔断器  
Fig.4 Smart fuse

### 1.5 其他智能型开关产品

瑞士ABB公司最近几年推出的插接式开关系统(plug and switch system, PASS), 是具有金属外壳的、气体绝缘的、内装有断路器、隔离开关、接地开关、电压/电流传感器的全封闭组合电器。PASS中使用的断路器、隔离开关、接地开关等均采用成熟的GIS技术, 绝缘子大部分采用新型复合绝缘材料, 环氧树脂浇注的玻璃纤维管确保了绝缘子的机械强度, 而采用硅橡胶浇注的绝缘子裙边则增加了爬距,

提高了抗电性能。PASS在充分考虑了满足不同的变电站主接线布置方案的前提下,选用了尽可能少的部件组合而成,见图5。这种新型智能化高压开关的结构上具有紧凑、小型化、少连接电缆和占地少的特点,它的设计思路体现了未来一次电气设备的发展方向<sup>[20-22]</sup>。



(a)实物图 (b)示意图  
1—组合式电压/电流传感器;2—断路器;  
3—组合式隔离开关/接地开关;4—间隔控制单元;  
5—主保护;6—后备保护;7—光纤母线。

图5 PASS系统的构成

Fig.5 Structure of PASS system

PASS的主要特点有:

1)采用了先进的组合式电压/电流传感器技术和组合式隔离开关/接地开关技术,使设备更加紧凑,体积更加小型化。

2)在测量、控制、保护系统中采用了计算机技术、数字化技术、光纤通讯技术,支持数字式继电器,继电保护系统引入了微机处理和分段监控保护。

3)采用了预安装技术,整套设备在出厂前安装调试完毕。设备运抵现场后,一个PASS间隔在数小时之内即可安装完毕,实现了“即插即用”功能。

4)每一间隔配置一台就地控制柜,内设控制及保护单元,即将二次技术集成化。

SIEMENS的HIS(highly integrated switchgear)采用类似ABB的PASS结构,但未采用电子式互感器<sup>[23]</sup>。在断路器智能化方面,采用了智能模块对断路器的相关参数进行监视,并通过高速现场总线传输到变电站层作进一步的分析。

日本三菱电机开发的550 kV智能化开关产品MITS(mitsubishi information technology switchgear)以无铁心电流互感器和分压式电压互感器取代常规的CT/PT,配合使用同步相位控制器和复合传感器,可以实现智能化变电站的全数字化要求<sup>[24]</sup>。其中,同步相位控制器可以抑制开关分合闸过程中产生的过电压,使系统的电压波动至最低,并且可以省略合闸电

阻及延长寿命。复合型传感器则集气体压力传感器、温度传感器、分解气体传感器为一体,用其做气体状态在线检测,可减少维护和检查的成本。

## 2 分析探讨

智能型开关电器虽较传统电力开关设备有明显优越的性能,但也面临着许多问题和挑战。首先,由传统的机械化操动机构向电子操动机构的转变,使控制回路可靠性面临着强电磁干扰的考验,会使得开关的工作可靠性受到影响,而复杂电子设备使用寿命与一次设备使用寿命的不匹配也将严重影响其工作寿命。操动机构的根本性改变使得众多生产厂家在开发智能型开关电器产品时较为谨慎。其次,复杂的智能控制装置和一些附加的开关设备在线监测装置必将使智能型开关设备的生产成本大大提高,这也阻碍了该类产品的推广普及。再次,智能型开关电器对新技术有较高的要求,如新型传感器技术、全新的通信技术等,这些技术有的尚处于探索和验证的过程之中,其成熟应用离当前的工程实际还有较大距离。最后,随着建设绿色电网的呼声高涨,人们也对智能型开关电器提出了较高的环保要求,这也使得产品设计师们颇费周章。

值得一提的是,由于数字化变电站的快速发展,在未来变电站完全数字化成为可能。而智能型开关设备是数字化变电站的核心支撑技术之一。业内人士认为,数字化变电站一次设备中的智能型开关的实现是关键,其他一次设备如变压器、高抗、避雷器等则可通过与其配备的一系列智能终端来实现智能控制。目前中国在此方面的相关标准《高压开关设备和控制设备——基于IEC 61850的数字接口》、《高压开关设备和控制设备——电子及其相关技术在开关设备和控制设备的辅助设备中的应用》已经出台,针对具体智能型开关设备如智能变压器、智能断路器等标准尚在拟定中。然而,如何评价开关的智能化程度,智能化有无最优实现形式,过分强调智能化是否会影响开关设备本身的工作可靠性等问题,还存在较大争议,有待依据已开发产品在实际运行中反映的问题进行认定。

## 3 结语

智能型开关电器是一项创新性和综合性较强的研究工作,它涉及到很多领域的新技术和新发展,如传感器技术、计算机技术、微电子技术、信息技术和电磁兼容技术等。在上述新技术中,传感器技术与控制器技术是智能化的基础,通信技术、电磁兼容技术

等是对智能化的完善。国内外研究人员和生产厂商虽然在此方面已开展了大量工作,但随着中国和国际上智能电网的建设向纵深推进,还需要更多的投入和开发。

### 参考文献:

- [1] 王章启, 邹积岩, 何俊佳, 等. 电力开关技术 [M]. 第 1 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.  
WANG Zhang-qi, ZOU Ji-yan, HE Jun-jia, et al. Electric power switch technology [M]. The First Edition. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2003.
- [2] HASSAN Y B, DINAZZAM M. The development of smart switch system for the automation system in power utilities [C]//The Eleventh International Middle East Power System Conference, MEPCON:[s.n.], 2006: 221-224.
- [3] 邹积岩, 王毅. 开关智能化的概念与相关的理论问题 [J]. 高压电器, 2000, 36(6): 43-46.  
ZOU Ji-yan, WANG Yi. The concept of intelligentized switch and related theory problems [J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(6): 43-46.
- [4] 陈振生. 成套 HV/MV 开关设备的发展趋势 (二)——智能化、紧凑型及采用新型传感器 [J]. 江苏电器, 2005(2): 1-4.  
CHEN Zhen-sheng. The development trends of HV/MV switchgear equipment assemblies (二)—Intellectualization, compact type and with adaption of new type sensors [J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2005(2): 1-4.
- [5] 彭晓, 黄绍平. 智能化: 开关电器的发展趋势 [J]. 电气时代, 2003 (3): 18-19.  
PENG Xiao, HUANG Shao-ping. Intelligentization: The development trend of switch [J]. Electric Age, 2003(3): 18-19.
- [6] 罗超, 李凡, 韩晨曦, 等. 智能断路器的特点及其应用 [J]. 电气时代, 2010(1): 78-79.  
LUO Chao, LI Fan, HAN Chen-xi, et al. The characteristics and application of intelligent circuit breaker [J]. Electric Age, 2010(1): 78-79.
- [7] 段明江. 高压智能开关柜的前景 [J]. 广东科技, 2001(8): 44-45.  
DUAN Ming-jiang. Foreground of high voltage intelligent switchgear [J]. Guangdong Science & Technology, 2001(8): 44-45.
- [8] 李建基. 高压开关设备的智能化 [J]. 电气时代, 2005(4): 66-69.  
LI Jian-ji. Intelligentization of high voltage switch [J]. Electric Age, 2005(4): 66-69.
- [9] 刘宝忠, 王永清. 智能断路器的现状与发展 [J]. 中国电力教育, 2010(10): 258-259.  
LIU Bao-zhong, WANG Yong-qing. Status and development of intelligent circuit breaker [J]. China Electric Power Education, 2010(10): 258-259.
- [10] 吕东, 吴永正, 罗春凌, 等. 智能型低压断路器的市场发展与应用 [J]. 低压电器, 2007(17): 40-42.  
LÜ Dong, WU Yong-zheng, LUO Chun-ling, et al. Market development and application of intelligent low voltage circuit breaker [J]. Low Voltage Apparatus, 2007(17): 40-42.
- [11] GUAN Yong-gang, HUANG Yu-long, LIU Wei-dong, et al. Development and implementation of intelligent system for gas insulated switchgear [C]//Power and Energy Engineering Conference, APPEEC:[s.n.], 2009: 1-4.
- [12] 王宁, 张可畏, 段雄英, 等. 智能 GIS 及其发展现状 [J]. 高压电器, 2004, 40(2): 139-141.  
WANG Ning, ZHANG Ke-wei, DUAN Xiong-ying, et al. Smart GIS and its state-of-the art [J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 139-141.
- [13] 张东东. 智能 GIS 中新型电流/电压传感器测量系统的设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.  
ZHANG Dong-dong. Design of novel current and voltage measurement system for smart GIS [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [14] 陈振生. 智能化高压电器 (上) [J]. 电气开关, 1998(5): 1-7.  
CHEN Zhen-sheng. Intelligent high voltage apparatus [J]. Electric Switchgear, 1998(5): 1-7.
- [15] 王宁. GIS 智能检测系统理论与实践研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
WANG Ning. The theory and practice research of GIS intelligent measurement system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [16] ABB 公司. 智能型控制/保护单元技术说明书 [K]. 2000. ABB Co., Ltd.. The technology instruction book of intelligent control/protection unit [K]. 2000.
- [17] 高翔. 数字化变电站应用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
GAO Xiang. Application technologies of digital substations [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [18] RADHAKRISHNAN R, KALKSTEIN E W. Design, development and application of smart fuses [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994(1): 164-169.
- [19] 金立军, 刘卫东, 钱家骊. 高压开关设备智能化发展综述 [J]. 电网技术, 2002, 26(1): 55-58.  
JIN Li-jun, LIU Wei-dong, QIAN Jia-li. A summary of development of intelligent control of high voltage electrical apparatus [J]. Power System Technology, 2002, 26 (1): 55-58.
- [20] ABB 公司. PASS (General broch.)-plug and switch system -PASS MOO, PASS MO, PASS MOS 手册 [K]. ABB Co., Ltd.. User guide of PASS (General broch.)-plug and switch system-PASS MOO, PASS MO, PASS MOS [K].
- [21] 张文生, 刘跃年. GIS 智能化及 PASS 技术 [J]. 电力建设, 2000(9): 26-28.  
ZHANG Wen-sheng, LIU Yue-nian. GIS intelligence and PASS technique [J]. Electric Power Construction, 2000(9): 26-28.

(下转第 11 页)

度合上,保护又会将断路器跳开,发生断路器跳跃现象,这就需要在控制回路中将这种情况闭锁。

常规变电站中控制回路是经过断路器端子箱,再去到断路器机构箱,它的每一条回路都清晰可查,一目了然,而 GIS 变电站中,从断路器本体到汇控柜是用电缆和航空插头连接,航空插头是整块封闭连接的,一旦拔出来就同时切断了许多回路,这样查线就很不直观了。一般来说,断路器机构箱里的接点,已经由厂家按照设备的订货要求,全部通过电缆和航空插头接回到了汇控柜,外部的控制电缆只要按设计图纸接入汇控柜的相关端子,就可以实现对断路器的控制。

## 5 智能 GIS 传感器接入和设计技术

传感器植入或接入应符合以下若干要求。

1)一般性要求:涉及高压设备本体,可内置亦可外置的传感器,推荐外置;涉及高压设备本体,内置传感器尽量采用无源型,可能的话,仅内置无源部分;内置传感器宜由高压设备制造商在制造时植入。

2)对内置型传感器的要求:宜采用无源型,或将有源部分外置(如可行);高压设备的所有出厂试验应在安装了内置传感器之后进行;内置传感器与外部自检测单元的联络通道应符合高压设备的密封要求;内置传感器的使用寿命应不小于10年。

3)对外置型传感器的要求:新设备留有外置传感器的安装位置,外观要求整洁、易维护、不降低高压设备外绝缘水平;一般安装在地电位处,除非必须,不推荐安装于高压部位;与高压设备内部绝缘介质相通的外置传感器,其密封性能、机械杂质含量等应符合或高于高压设备的相应要求;有良好的电磁屏蔽措施。

## 6 结语

笔者对智能 GIS 设备研制和原理进行了深入研究,提出了智能化 GIS 的发展趋势和典型方案。目前的智能 GIS 为各功能 IED 加上内嵌的智能综合组件和外置的一个或多个智能综合组件组成;而最终的智能 GIS 由电力功能元件加上内嵌的智能综合组

件组成,即在一定条件成熟时由一次设备供应商能提供较实用的智能机构产品。笔者提出的智能 GIS 设计方案为今后智能 GIS 的设计提供了重要的参考价值 and 一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] DL/T 617—2010 气体绝缘金属封闭开关设备技术条件[S].  
DL/T 617—2010 The technical conditions of gas insulated metal enclosed switchgear[S].
- [2] SHIRATORI N,ATIQUZAMAN M. Recent advance in communication and internet technology [J]. Telecommunication Systems,2006,25(3-4):169-172.
- [3] TAVANI H T. Recent works in information and communication technology (ICT) ethics [J]. Ethics and Information Technology,2007,4(2):169-175.
- [4] 陈振生. 智能化高压电器[J]. 电气开关,1998(5):1-7.  
CHEN Zhen-sheng. Intelligent high voltage apparatus[J]. Electric Switchgear,1998(5):1-7.
- [5] ERIKSSON A,PETTERSSON K G, KDERNICKY A, et al. Experience with gas insulated substations in the USA [J]. IEEE Transactions on Power Deliveyr,1995,10(1):210-218.
- [6] 张文亮,汤广福,查鲤鹏,等.先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,4(2):56-59.  
ZHANG Wen-liang,TANG Guang-fu,ZHA Li-peng,et al. The application of advanced electric power and electronic technology in smart grid [J]. Proceedings of China Society for Electric Engineering,2010,4(2):56-59.
- [7] IEC 61850-5-2003-07 Communication networks and systems in substations——Part 5: Communication requirements for functions and device models[S].
- [8] IEC 61850-7 Cmunication networks and systems in substations——Part 7: Basic communication structure for substations and feeder equipment[S].
- [9] IEC 60044-8:2002 电子式电流互感器[S].  
IEC 60044-8:2002 Electronic Current Transformer[S].
- [10] IEC 60044-7:1999 电子式电压互感器[S].  
IEC 60044-7:1999 Electronic Voltage Transformer[S].

张 猛(1963—),男,正高工,主要从事高压开关设备的研发。

(上接第 5 页)

- [22] 邹建明. PASS 开关设备技术及其应用[J]. 华中电力,2002,15(3):20-22.  
ZOU Jian-ming. The technology and application of PASS [J]. Central China Electric Power, 2002, 15(3):20-22.
- [23] SIEMENS. HIS (highly integrated switchgear) 8DN8 up to 145 kV[EB/OL]. [2010-08-01]. [http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/high-voltage-substations/compact-solutions/his-highly-integrated-switchgear-8dn8-](http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/high-voltage-substations/compact-solutions/his-highly-integrated-switchgear-8dn8-up-to-145-kV.htm)

up-to-145-kV. htm.

- [24] 三菱电机输变电及交通系统中心. MITS (三菱信息化技术开关)[J]. 电力设备,2001,1(2):78-79.  
The Power Transmission and Transformation & Traffic System Centre of Mitsubishi Electric Co., Ltd.. MITS[J]. Electrical Equipment, 2001,1(2):78-79.

藏春艳(1978—),女,湖北宜昌市人,博士后,讲师,主要从事电弧电接触、在线监测、数字图像处理等方面的研究。