

直流输电工程阀水冷系统缺陷分析

田 庆

(南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663)

摘要: 在直流输电工程中, 辅助系统包括阀水冷系统、消防系统、空调系统和工业生活水系统。阀水冷系统是用对直流输电核心元件可控硅阀进行冷却的系统, 该系统的运行情况直接影响直流输电系统的运行, 在所有辅助系统中只有阀水冷系统能够引起单双极阀闭锁, 由此可见阀水冷系统的重要性。笔者介绍了阀水冷系统的基本原理, 分析了系统运行中存在的问题, 如: CCP不能体现系统冗余性、软化单元再生的优先级低于系统补水的优先级、没有监视软化单元再生效果的功能、冷却塔喷淋管设计不合理、外冷水控制系统无喷淋泵出水监视信号、平衡水池水质较差等。相应的解决办法为: 完善CCP控制软件、调整软化单元再生的优先级高于系统补水的优先级、在再生回路中增加电导率表和流量表、将喷淋管的末端引至冷却塔外部, 并加装冲洗阀门、加装喷淋泵出水流量监视装置、更改排泄阀的控制程序。这对于今后新建直流输电工程有借鉴意义, 并能提高现有直流输电工程中阀水冷系统的稳定性和可靠性。

关键词: 高压直流输电; 阀水冷系统; 单双极阀闭锁

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)08-0080-06

Analysis of Existing Problems in the Valve Cooling System for HVDC Transmission Project

TIAN Qing

(Test and Maintenance Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In HVDC transmission project, valve cooling system is used to cool the thyristor valve, a core component in DC transmission system, its operation state influences the operation of DC transmission system directly. Valve cooling system can cause lock of monopolar or bipolar valve. The author introduces the basic principle of valve cooling system, and analyzes the existing problems during its operation, e.g. the cooling control and protection (CCP) cannot reflect system redundancy, the priority of softening unit recovery is lower than that of system water replenishing, the monitoring signal of spray pump in outside CCP is absent, the design of cooling tower shower is irrational, no monitor is equipped for the quality of softening unit recovery, and the water quality in equalizing reservoir is poor. Corresponding methods are provided, including modifying CCP control software, making priority of the softening unit recovery higher than that of the system water replenishing, setting gauges in the softening unit recovery loop to detect electric conductivity and flow rate, extending the shower terminal outside the cooling tower and adding flushing valve at the terminal, installing water flowmeter to monitor output of the spray pump, and recoding the control program of outlet valve. This study is expected to be helpful in enhancing stability and reliability of the valve cooling system in existing HVDC projects.

Key words: HVDC transmission; valve cooling system; monopolar or bipolar lock

0 引言

在直流输电工程中, 辅助系统包括阀水冷系统、消防系统、空调系统和工业生活水系统。阀水冷

系统是用对直流输电核心元件可控硅阀进行冷却的系统, 如果该系统出现问题, 直接影响直流输电系统的运行, 在所有辅助系统中只有阀水冷系统能够引起单双极阀闭锁, 所以阀水冷系统的正常运行非常重要。

1 系统原理简介

龙政和江城直流输电工程均采用 Sweden Water 公司生产的阀水冷系统,该系统主要是用来对可控硅阀进行冷却,其原理见图 1^[1-4]。

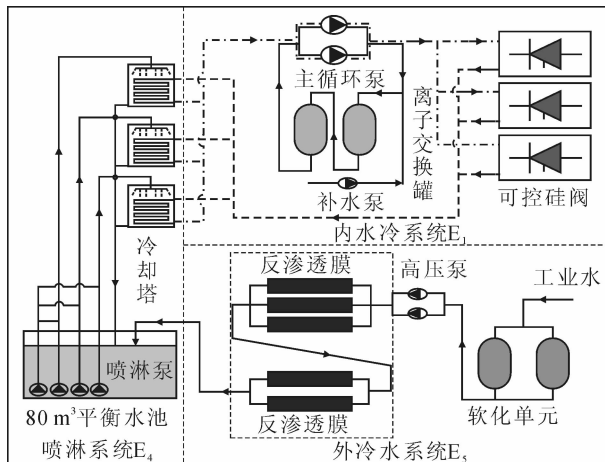


图 1 阀水冷系统原理图

Fig. 1 The principle figure of water-cooled valve system

阀水冷系统包括 3 套子系统:内水冷系统 E_1 、外冷水系统 E_5 和喷淋系统 E_4 。

1)内水冷系统 E_1 。 E_1 是一个闭环冷却系统,主要作用是通过流动的去离子水对可控硅阀进行冷却,它由 2 个部分组成,一是主循环回路(虚线和点划线回路),一是水处理回路(虚线框内回路)。主循环回路中流量的一小部分经过水处理回路,在这个回路中冷却水被持续进行去离子和过滤,通过水处理回路还可以在系统运行时向主循环回路补水^[5-8]。

2)外冷水系统 E_5 。 E_5 的主要作用是向喷淋系统提供合格的喷淋水,它由 2 个部分组成,一是软化单元,一是反渗透单元。水在进入反渗透单元之前,先在软化水单元进行预先处理。软化单元的作用是对反渗透单元提供合格的软化水。如果软化单元不能正常运行,未经软化的水将直接损坏反渗透膜。软化单元是通过树脂吸附水中的钙镁离子,来达到软化水的目的。树脂随着吸附钙镁离子的增多,它的吸附能力将会不断降低。因此需要定期对树脂再生。再生包括 3 个过程,第 1 个过程是反冲洗,第 2 个过程是加盐,最后是冲洗。

图 2 是软化单元的结构和运行原理图,以 Z_{51} 软化单元为例,反冲洗时,系统将打开 K_{53} 和 K_{54} ,反冲洗结束后,控制系统将切换到加盐模式,关闭 K_{53} 和 K_{54} ,然后打开 K_{55} 和 K_{56} ,加盐结束后,关闭 K_{55} ,然后打开 K_{51} ,启动冲洗。再生完成后,关闭阀门 K_{51} 和 K_{56} 。

3)喷淋系统 E_4 。 E_4 的主要作用是对内水冷系统

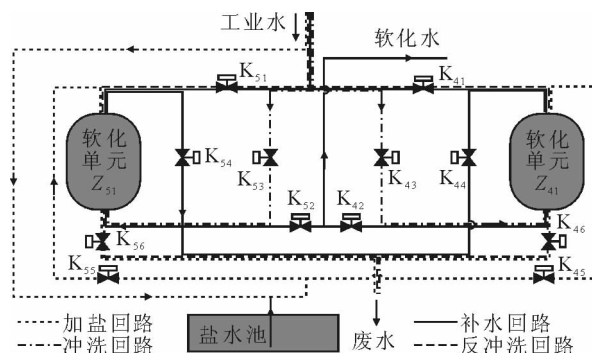


图 2 软化单元结构和运行原理图

Fig. 2 The structure and operation principle figure of the softening unit

中的水进行冷却,由冷却塔、平衡水池和喷淋泵 3 个部分组成。

4)冷却系统控制保护设备。阀水冷系统一般有 2 套控制保护系统 CCP(cooling control and protection),水冷系统控制功能实现对水冷系统的主泵、冷却塔、喷淋泵、阀门、加热器等的控制。水冷系统保护有水流量保护、水压力保护、阀进水温保护、水位保护及泄漏保护,这些保护都可以闭锁直流系统或降功率,还有电导率保护监视循环水的电导率,超过定值后出口^[9-14]。

2 系统运行中存在的问题、故障分析及解决方法

2.1 CCP 不能体现系统冗余性

2005 年 10 月 15 日 14 时 28 分,鹅城站极 I CCP A 系统发内冷水出水温度高和功率回降告警,检查发现 A 系统某温度传感器测量值为 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$,而 B 系统对应温度传感器测量值为 $46\text{ }^{\circ}\text{C}$,降功率设定值为 $63.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。水冷系统 CCP 控制保护设备在单一元件故障时对直流系统造成功率回降甚至停运的影响,不能体现系统冗余性,由此发现该软件设计存在缺陷。解决办法:工作系统传感器检测到故障后,保护不应立即出口,而应切换到另一个系统进行检测,若 2 个系统同时检测到故障,则保护立即出口,否则不应出口^[15-19]。

Sweden Water 公司在鹅城站 2006 年大修期间针对该缺陷对内水冷系统 CCP 控制软件进行了修改,确保今后不会再次发生类似缺陷。

2.2 外冷水系统备用软化单元不能从系统中隔离出来,没有起到备用作用

原有设计:外冷水系统有 2 套软化单元(Z_{41} 和 Z_{51}),假设 Z_{41} 在主用,当系统在补水过程中,软化单元 Z_{41} 软化水的流量逐渐达到 150 m^3 时,系统将自动切换到 Z_{51} 运行,直到系统停止补水后,再对 Z_{41}

进行再生。也就是说软化单元再生的优先级低于系统补水的优先级。

2004年6月24日,运行人员监盘发现极I外冷水系统发出高优先级报警,检修人员现场检查发现,软化单元 Z_{51} 再生过程中,启动加盐模式时, K_{56} 阀门不能打开,再生过程未完成。经检查发现用于 K_{56} 阀门控制电源接线头短路,控制系统无法操作 K_{56} 阀门,现场无阀门控制电源接线头备品。未经软化处理的水不能进入反渗透单元,但系统运行在自动方式下,仍会自动切换到 Z_{51} 运行,不能将故障软化单元从系统中隔离出来。当时要求运行人员在该缺陷处理之前,持续监视 Z_{41} 流量,当接近切换值 150 m^3 时,手动对 Z_{41} 再生,然后手动切回到 Z_{41} 运行。

针对这一事件,Sweden Water公司在原理设计上存在不足。解决办法:如果软化单元故障,应该能够将故障软化单元从系统中隔离出来,不影响系统的正常运行。另外,只有1个软化单元运行时,当软化单元软化水的量逐渐上升到 150 m^3 时,系统应该自动停止补水,启动软化单元再生,也就是软化单元再生的优先级必须高于系统补水的优先级。因为长期使用未经软化处理或者软化处理效果不佳的水会损坏反渗透膜。

2005年大修期间,Sweden Water公司修改了控制软件PLC程序,如今可以将软化单元手动退出运行进行检修,而不影响整个系统的运行。这一小的改动,既方便了运行人员不必要的麻烦,又提高了设备运行的可靠性。

2.3 外冷水系统没有监视软化单元再生效果的功能

外冷水系统PLC程序中没有监视软化单元再生效果的信号。如果软化单元再生效果不好或者完全失效,也同样会损坏反渗透膜。那么,软化单元再生是否有效?软件中已经设定了再生时间,要使得再生有效,就必须保证再生过程中加入的盐水是饱和的,并且盐水流量符合要求。但控制系统并没有监视这2个参数。因此Sweden Water公司在再生补盐水回路中增加电导率表和流量计,监视再生回路中的盐水饱和程度和盐水流量,并将这2个信号接入到控制系统中。

2005年大修期间,Sweden Water公司在再生回路上加装了电导率表BQ2和流量计BF61,修改了控制软件PLC程序,并在PLC程序中增加这2个监视信号。

2.4 冷却塔喷淋管设计不合理,容易堵塞

2.4.1 冷却塔结构介绍

冷却塔上部为风扇,中间为喷淋管和喷嘴,下

部为散热管,冷却塔的工作原理为:通过喷淋管和喷嘴将水喷洒在散热管上进行冷却,同时通过风扇加快空气对流,提高冷却效果,原理见图3(未画出风扇),冷却塔喷淋管实物见图4,每个冷却塔内部有1个集水箱和4条喷淋管,每条喷淋管上有18个喷嘴。喷淋泵将水抽入集水箱,然后通过4条喷淋管上的72个喷嘴对散热管进行喷淋。

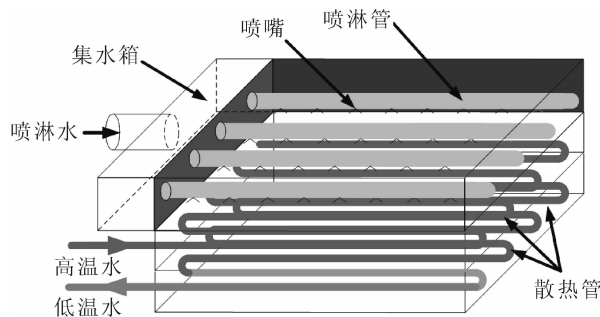


图3 冷却塔原理图

Fig. 3 The principle figure of the cooling tower

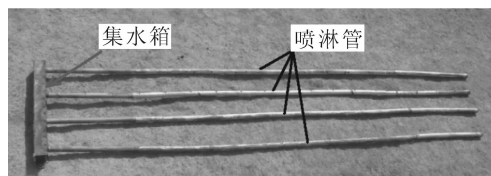


图4 冷却塔喷淋管实物图

Fig. 4 The material figure of the cooling tower shower

2.4.2 故障情况描述

2006年11月10日,鹅城站极I外冷水1号喷淋泵故障,更换后恢复正常,事后分析故障可能与冷却塔喷嘴堵塞有关。2006年11月13日,鹅城站极I外冷水1号冷却塔出水量不平衡,冷却塔尾部没有喷淋水,冷却塔前部大量喷水。检查发现由于喷淋管内部积累了大量淤泥使得尾部喷头堵塞,导致1根喷淋水管道受压弯曲脱离集水箱。湖北电力试验研究院已对黑色淤泥化验,确定成分为空气中的灰尘,不会结垢。图5为实物图,图6为原理图,图7为喷淋管中的淤泥。



图5 喷淋水管道受压弯曲实物图

Fig. 5 The material figure of the cooling tower shower crooked

2007年年度检修发现所有冷却塔尾部的喷淋水明显少于冷却塔中间,见图8。说明冷却塔尾部喷嘴堵塞。打开冷却塔检查,发现冷却塔喷淋管均有不同程度的堵塞,有2个喷嘴轻微堵塞,4~5个喷嘴

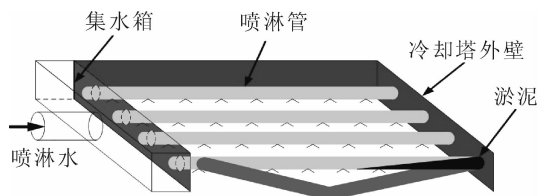


图 6 故障原理图

Fig. 6 The fault principle figure

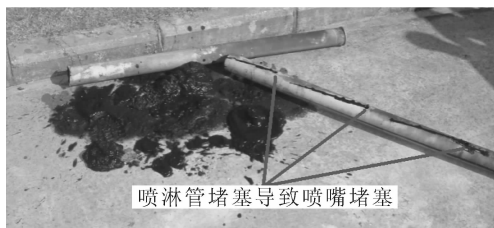


图 7 喷淋管中倒出的淤泥

Fig. 7 The mud poured out the shower

严重堵塞。发现冷却塔尾部内冷水散热管弯头处轻微结垢,见图 9。不锈钢防水栅栏上也有轻微结垢,见图 10。分析结垢原因是:冷却塔尾部喷淋水较少,喷淋水中的结垢物质没有及时被冲掉,水蒸发后,结垢物质附在散热管上形成垢。



图 8 改造前冷却塔喷水情况

Fig. 8 The water spraying of cooling tower before modification

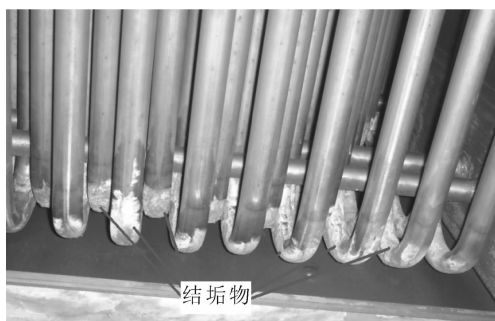


图 9 散热管弯头处轻微结垢

Fig. 9 The slight scaling in the knee of the cooling tube

由于喷淋管与冷却塔外壁之间的空隙太小,而喷淋管又是一个整体,无法拆卸,因此不能对冷却塔喷淋管进行清理。如果冷却塔喷淋管长期不清理,喷淋水中的淤泥慢慢沉积在喷淋管的末端,将引起喷淋水管堵塞,使得喷嘴堵塞(详见图 7),最终



图 10 不锈钢防水栅栏轻微结垢

Fig. 10 The slight scaling in the stainless watertight fence

导致喷淋水不均匀。这样不仅降低了冷却效果,影响喷淋泵的正常运行,散热管还容易结垢。

2.4.3 解决措施

将喷淋管的末端引至冷却塔外部,并加装冲洗阀门,这样在正常运行时可以冲洗喷淋管,确保喷淋管不堵塞,详见图 11、12。



图 11 改造后实物图

Fig. 11 The material figure after modification

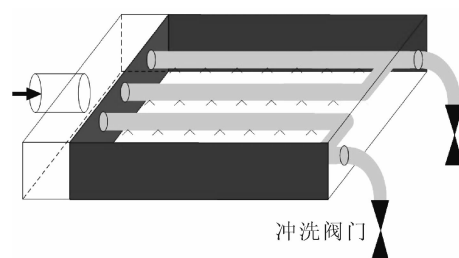


图 12 改造原理图

Fig. 12 The modification principle figure

2.4.4 改造后的效果

改造后,启动喷淋泵,检查喷水情况,冷却塔的前部、中部和尾部喷淋水量完全一样,详见图 13 改造后的喷水情况。

2.5 外冷水控制系统无喷淋泵出水监视信号

2005 年 11 月 20 日,极 II 外冷水系统 1 号喷淋泵空转,检查发现喷淋泵水封泄漏,使得喷淋泵进气,导致喷淋泵空转,无喷淋水。如果在满负荷运行



图 13 改造后的喷水情况

Fig. 13 The water spraying condition after modification

时,1台喷淋泵空转,可能不会影响直流系统运行(因为冷却塔风机频率可以调节)。但是如果2台同时空转,冷却容量将急剧下降,待运行人员发现水温高报警时,也就只能眼看着直流系统降功率了。

针对这一隐患,经同 Sweden Water 公司协商,加装喷淋泵出水流量监视装置或者出水压力监视装置,并将该信号接入控制系统,进行实时监控。

2.6 平衡水池水质较差

技术监督单位对平衡水池中的水进行化验,发现部分换流站平衡水池中的水质较差,喷淋过程中容易结垢。针对这一问题,技术监督单位建议定期手动排放平衡水池的水,每月排放 80、160 m³ 或者更多,直到水质合格为止。

因此,需对外冷水系统进行技术改造,使得外冷水系统具备定期自动更换平衡水池中水的功能。从外冷水系统 PLC 软件中可以看出,当注入平衡水池的流量 E5.BF1 达到 9 m³ 时,系统将会自动打开 E4.K1 排泄阀 600 s,排泄平衡水池中的水,如果 1 号喷淋泵或者 E4.K1 故障,系统将自动打开 E4.K2;如果 1、2 号喷淋泵均故障或者 E4.K1、E4.K2 均故障,系统将自动打开 E4.K3,结构图见图 14。但设计时没有考虑到补入平衡水池的水质问题。因为各个地区的水质不同,那么每月平衡水池的排水量也就不同。水质较好的地方,每月平衡水池的排水量可以小一点,水质较差的区域,排水量就要增大一点。

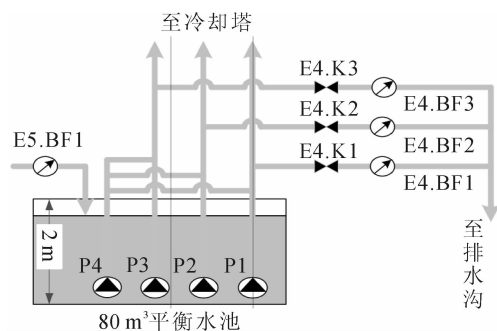


图 14 平衡水池排水原理图

Fig. 14 The draining principle figure of equalizing reservoir

直流系统满负荷运行时,外冷水系统每天补入平衡水池的水量大约为 80 m³,每个排放阀的排水速度大约为 0.4 L/s。那么可以计算出每月从平衡水池中排泄的水量大约为 $(80 \div 9) \times 600 \times 0.4 \times 30 \times 10^{-3} = 64 \text{ m}^3$ 。当平衡水池水位为 1 600 mm 时,平衡水池的水量为 64 m³,也就是说系统每月自动更换一次平衡水池中的水。

综上所述,为了确保平衡水池中水质合格,从以下 2 个方面更改排泄阀的控制程序。一是改变排泄阀打开时间,将 600 s 改成 1 200 s 或者 1 800 s;二是改变排泄阀打开的个数,同时打开 2 个或者 3 个排泄阀。

3 结语

笔者提出的阀水冷系统运行时经常出现的几个问题,同样在三常、三广工程中反复出现过,已经引起了广泛的重视。针对这些问题,文中给出了解决措施,并已经对相关系统进行了改造,取得了良好的效果,同时这些解决方法已经在其他正在运行的直流工程中得到了推广。特别是对于今后新建直流输电工程,应在冷却系统设计初期将上述问题考虑进去。通过对以上问题的考虑和解决,大大提高了直流输电工程中阀水冷系统的稳定性和可靠性,为直流系统的正常运行提供了保障。

参考文献:

- [1] 赵碗君.高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
ZHAO Wan-jun.HVDC transmission technology[M]. Beijing: Chinese Electric Power Press,2004.
- [2] ABB Company.Main circuit parameters, Three Gorges-Shanghai $\pm 500 \text{ kV}$ DC transmission project[K]. Switzerland:ABB,2004.
- [3] 刘振亚.特高压直流输电技术研究成果专辑(2005 年)[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
LIU Zhen-ya.Study special for UHVDC technology(2005)[M]. Beijing:Chinese Electric Power Press,2006.
- [4] 浙江大学发电教研组直流输电科研组.直流输电[M]. 北京:电力工业出版社,1982.
DC Transmission Search Team of Power Teaching Group in Zhejiang University.DC transmission[M]. Beijing:Power Electric Industry Press,1982.
- [5] 田庆,原敏宏,王志平,等.高压直流极母线差动保护不平衡电流分析[J]. 高电压技术,2009,35(4):926-930.
TIAN Qing,YUAN Min-hong,WANG Zhi-ping,et al. Analysis on the unbalance current of HVDC pole bus differential protection[J]. High Voltage Engineering,2009,

- 35(4):926-930.
- [6] 田庆.政平换流站最后断路器保护逻辑分析[J].水电能源科学,2009,27(1):177-179.
TIAN Qing.Analysis on the protection logistic of last breaker trip in Zhengping converter station[J]. Water Resources and Power,2009,27(1):177-179.
- [7] 田庆,原敏宏,王志平.葛南直流线路高阻接地故障保护分析[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(6):60-63.
TIAN Qing,YUAN Min-hong,WANG Zhi-ping.Analysis on the Ge-Nang HVDC line protection against high-impedance ground fault[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2008,20(6):60-63.
- [8] 田庆,王晓希.高压直流控制与保护系统配合不当分析[J].高压电器,2008,44(5):432-434.
TIAN Qing,WANG Xiao-xi.Analysis of the mismatch of HVDC control and protection system[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(5):432-434.
- [9] 田庆,王晓希.换流阀三角形侧零序环流对阀短路保护的影响[J].高压电器,2008,44(6):509-512.
TIAN Qing,WANG Xiao-xi.Influence of converter transformer D-bridge zero sequence circulating current on valve short circuit protection[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(6):509-512.
- [10] 田庆.葛洲坝换流站交流滤波器过负荷保护误动作分析[J].高电压技术,2009,35(5):1225-1230.
TIAN Qing.Analysis on the fault trip of AC filter overload protection in Gezhouba converter station[J]. High Voltage Engineering,2009,35(5):1225-1230.
- [11] 田庆.龙政直流开路试验分析[J].高压电器,2009,45(6):55-57.
TIAN Qing.Analysis of Longzheng HVDC open line test[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(6):55-57.
- [12] 田庆,原敏宏,成小胜.高压交、直流滤波器不平衡保护技术[J].电工技术,2008(11):40-42.
TIAN Qing,YUAN Min-hong,CHENG Xiao-sheng.Analysis on the bird related HVDC AC and DC filter unbalance protection[J]. Electric Engineering,2008(11):40-42.
- [13] 田庆,韩继东,吴卫.高压直流线路两种类型接地故障分析[J].电力系统自动化,2007,31(增刊):382-386.
TIAN Qing,HAN Ji-dong,WU Wei.Analysis of the two kinds of HVDC line ground faults[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(Supplement):382-386.
- [14] 田庆,林湘宁.组合无功电流下垂补偿和线路压降补偿提高电压稳定性[J].高压电器,2009,45(4):5-11.
TIAN Qing,LIN Xiang-ning.Combination of reactive current droop compensation and line drop compensation for improving voltage stability[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(4):5-11.
- [15] 田庆.特高压交流试验示范工程单相人工接地短路实测恢复电压分析[J].高压电器,2010,46(2):1-4.
TIAN Qing.Analysis on the measured recovery voltage in artificial single-phase grounding test for UHV AC pilot project[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(2):1-4.
- [16] 田庆,原敏宏,王志平.交流特高压试验示范工程电容器保护配置、整定及应用原则探讨[J].高压电器,2010,46(3):68-71.
TIAN Qing,YUAN Min-hong,WANG Zhi-ping.Configuration, setting and application of capacitor protection in UHV pilot project[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(3):68-71.
- [17] 田庆.特高压交流试验示范工程主变保护误动作分析[J].高压电器,2011,47(2):7-11.
TIAN Qing.Analysis on the primary transformer protection misoperation in UHV pilot project[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(2):7-11.
- [18] 田庆.超高压直流运行经验及分析[J].高压电器,2011,47(4):91-95.
TIAN Qing.The analysis on the EHVDC operation experience[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(4):91-95.
- [19] 田庆.云广特高压直流工程系统调试无通讯运行问题分析及策略[J].高压电器,2011,47(5):16-21.
TIAN Qing.Operation analysis on Yunguang UHVDC project without communication during commissioning period[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(5):16-21.

田庆(1976—),男,汉族,博士,高级工程师,研究方向为(特)高压直、交流输电运行检修技术。

(上接第79页)

- 特性分析[J].高电压技术,2011,37(3):706-710.
DING Deng-wei,GAO Wen-sheng,LIU Wei-dong.Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering,2011,37(3):706-710.
- [15] TANG Ju,ZHU Wei,SUN Cai-xin.Analysis of UHF method used in partial discharge detection in GIS[J]. High Voltage Engineering,2003,29(12):22-23.
[16] MEIJER S,SMIT J J.UHF defect evaluation in gas insulated equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(2):285-296.
- 卢启付(1974—),男,工学硕士,电力工程师,从事高压电气设备试验及绝缘诊断技术研究工作。
- 李兴旺(1985—),男,工学硕士,从事高压开关设备试验及绝缘诊断技术研究工作。