

LW15A-550型断路器爆炸事故原因分析

秦怡宁¹, 曾彦珩², 曹 鸿¹, 刘晋孝¹, 王电处¹, 樊友平²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司曲靖局, 云南 曲靖 655000; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 在高压输电系统中, 滤波器无论在抑制谐波还是无功补偿方面起着非常重要的作用, 因此分析总结滤波器故障原因, 对滤波器的安全稳定运行具有十分重要的意义。文中首先对常见的交流滤波器中断路器故障类型和故障特点进行了总结。然后对一次±500 kV直流换流站发生的高压断路器爆炸事故, 根据故障录波、现场试验及仿真、解体检查等情况, 进行了深入的原因分析。分析结果表明造成此次事故的原因是: 电容器本身存在绝缘缺陷, 且均压电容器与灭弧室静触头间存在较大的电位差, 导致静触头场强较高存在对电容器放电趋势, 最终致使电容器和灭弧室瓷套先后发生径向击穿, 致使瓷套爆裂。最后, 提出有效整改措施, 防止类似事件再次发生。

关键词: 高压断路器; 爆炸事故; 灭弧室; 径向击穿

Cause Analysis of an Explosion Accident of LW15A-550 Circuit Breaker

QIN Yining¹, ZENG Yanjun², CAO Hong¹, LIU Jinxiao¹, WANG Dianchu¹, FAN Youping²

(1. Qujing Branch of UHV Power Transmission Corporation of CSG, Yunnan Qujing 655000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In high voltage transmission system, filter plays a very important role on no matter suppress the harmonic, but reactive power compensation. Therefore, analyzing the causes of filter failure is of great importance for the safe and stable operation of filter in the future. First, the common fault type and its characteristics of AC filter circuit breakers are summarized. Then, based on an explosion accident of high-voltage circuit breaker in a DC converter station, the causes of the accident are analyzed, according to the fault record, field test and simulation, the disassembling inspection and so on. The result of the analysis shows that: the capacitor has insulation defects, a large potential difference exists between the grading capacitor and the static contact of arc chamber, which lead to the discharge trend to the capacitor because of the high field strength of static contact, eventually led to the occurrence of radial breakdown of the capacitor and the interrupting porcelain insulator, and then the explosion. Finally, some effective corrective measures are mentioned, which would prevent similar incidents from happening again.

Key words: high-voltage circuit breaker; explosion accident; arc chamber; radial breakdown

0 引言

在高压直流输电系统中, 直流滤波器和交流滤波器对限制交直流电流、电压谐波和无功补偿有重要作用。它们是高压直流输电系统重要组成部分, 其稳定可靠运行与否直接关系到整个高压直流系

统的安全稳定^[1]。

2014 年南方电网超高压输电公司所属的某变电站的无功补偿部分的用于开断交流滤波器的断路器发生爆炸。文中探讨了高压直流输电系统中交流滤波器常见的故障和特点, 通过针对这次断路器爆炸事故的录波、解体和现场试验结果的分析, 得出事故原因, 并提出一些解决措施, 可为其他

收稿日期: 2016-01-19; 修回日期: 2016-03-09

基金项目: 中国南方电网公司重点科技项目(K-GY2014-17)。

Project Supported by Important Science and Technology Program of CSG(K-GY2014-17).

类似故障提供指导与借鉴。

1 常见交流滤波器开关断路器故障类型和特点

换流站内交流滤波器开关断路器典型的故障类型或者原因可以划分为以下几类:

- 1)因遭受雷击和未采取适当限制雷电波入侵的措施,产生过电压而损坏设备^[2];
- 2)开关断路器因为设计、制造工艺不合格,致使断

路器内部部件存在质量问题,从而导致故障产生^[3-6];

3)因断路器分合次数过多,导致触头老化,致使故障的产生^[7-9];

4)因断路器本身的绝缘隐患,发生断口闪络、击穿故障^[10-14]。

基于这4种不同的故障类型文献的研究,可归纳和分析出在故障发生时的录波特征和器件解体特点,见表1。

表1 4种常见开关断路器故障类型和特点

Table 1 Four common failure types and features of circuit breaker

故障类型	录波特征	解体特点
因遭受雷电灾害	出现强大的短路电流数据	设备出现由于贯穿性放电产生的痕迹 ^[15-16] 。 灭弧室瓷质套管发生炸裂;动、静主触头有烧蚀痕迹;喷口无壁间击穿痕迹;套管内表面有开断过程中产生的白色分解物;故障后,测量断路器断口的直流电阻发现异常,通过检修孔检查发现绝缘拉杆传动拐臂断裂 ^[14] 。
器件本身存在缺陷	电流和电压波形存在较大畸变	断路器主触头和弧触头都有一定的烧蚀,弧触头比主触头低。
开关分合次数过多	断路器在开合时发生爆炸或者故障 ^[17-18]	灭弧室内的触头上,在电容器导管的表面和绝缘支撑瓷瓶的内外表面都有放电痕迹;灭弧室炸毁,瓷瓶碎片散落一地,断路器某相支柱瓷瓶法兰有放电点。
器件存在绝缘隐患	故障发生后,故障电流短时达到保护启动定值,但持续的时间很短后消失,返回保护 ^[19-21]	

2 事故过程

2014年10月27日01时35分,某直流依据调度令将该直流功率由4 000 MW降至3 700 MW的过程中,系统根据无功需求自动切除交流滤波器后,相应的开关炸裂,当时现场天气为阴雨天。发生事故的交流滤波器的接线图见图1,故障断路器已在图中标出^[22]。

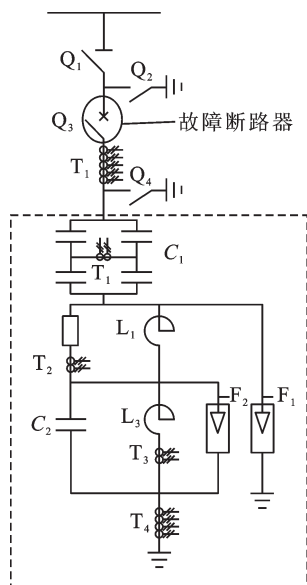


图1 事故交流滤波器接线图

Fig. 1 Connection diagram of AC filter

3 根据录波图对事故过程的描述

以换流站断路器爆炸,绝对时间01:35:08:481为此次事件的相对起始时间 $t_0=0$,故障时间序列描述如下:

- 1) $t=-82$ ms,换流站无功控制要求切除交流滤波器;
- 2) $t=-8$ ms,592开关三相跳相位出现;
- 3) $t=0$ s,592开关断路器母线侧灭弧室爆炸,B相出现峰值为约19 kA的电流;
- 4) $t=1.482$ s,监测的开关灭弧室内 SF_6 低气压异常出现;
- 5) $t=2.993$ s,592开关三相跳位消失;
- 6) $t=12.197$ s,零序过流I段启动,B相出现峰值为20 kA的电流;
- 7) $t=15.198$ s,经3 s延时,零序过流I段保护出口并启动失灵保护。

故障过程的时间列表见表2,表2中的相对时间均以01:35:08:481为零时刻。

经对录波进行分析,断路器开断电流后在12 s内发生了两次故障放电,两次放电波形分析如下:在592断路器断开8 ms,B相出现了峰值电流19 369 A的尖峰电流,然后迅速降为0,见图2。

断路器跳开时(相对时刻为-8 ms)三相电流值

表 2 故障过程的事件

Table 2 The events of failure process

序号	开始时刻或相对时间	发生事件
1	-82 ms	无功控制要求切除交流滤波器
2	-8 ms	592开关 A/B/C 三相跳相位出现
3	01:35:08:481(零时刻)	最小滤波器控制允许切除交流滤波器信号消失
4	1.482 s	出现 SF ₆ 低气压异常
5	2.993 s	592开关 A/B/C 三相跳相位消失
6	12.197 s	零序过流 I 段启动, B 相出现峰值为 20 kA 的电流
7	12.257 s	开始出现持续的负荷电流
8	15.198 s	零序过流 I 段保护动作并启动失灵保护
9	15.324 s	失灵保护经 0.13 s 延时跳 592 开关
10	15.412 s	失灵保护经 0.2 s 延时启动母线失灵保护
11	15.441 s	母线失灵保护经 0.03 s 延时动作跳进线开关及小组所有开关
12	15.467 s	第 4 大组母线波保护动作将 5052 和 5053 开关跳开

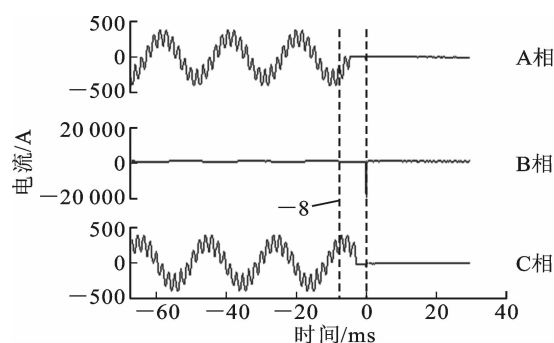


图 2 第 1 次放电故障波形图

Fig. 2 The fault record of first discharge

分别为:A 相-165 A,B 相 6 A,C 相 141 A;“零时刻”(0 ms) 三相电流值分别为:A 相-58 A,B 相-19 369 A,C 相-68 A。

根据图 2 可知,三相电流对应的熄弧时刻(相对时间)分别是:A 相-4.6 ms;B 相-8 ms;C 相-2.9 ms。

592 断路器断开后 12 205 ms 时刻,断路器 B 相出现峰值达 20 kA 的间断脉冲电流,60 ms 后电流变为 183 A 的额定负荷电流,见图 3。

4 现场检查和设备试验情况

4.1 现场检查情况

现场检查发现,此断路器三相均在分闸位置,并且发现故障断路器的靠母线侧灭弧室瓷瓶炸裂,瓷瓶碎片散落在周围,并且母线侧断口均压环上部有小孔,见图 4、5。

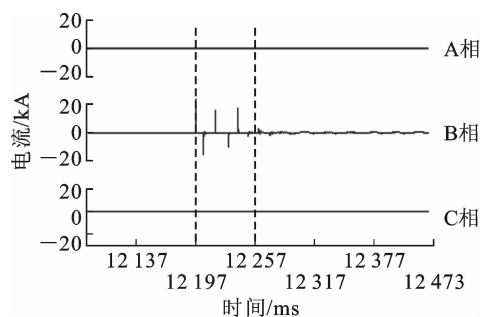


图 3 第 2 次放电故障波形图

Fig. 3 The fault record of second discharge



图 4 爆炸后的断路器

Fig. 4 The breaker after the explosion



图 5 断路器母线侧断口的均压环

Fig. 5 The grading ring of circuit breaker near the bus

之后,对该断路器的灭弧气室进行开盖检查,发现动触头与静触头上均有明显的放电痕迹。

4.2 现场试验情况

事故发生后当天,检修人员对故障断路器三相两侧均压电容的绝缘电阻、电容量及介质损耗进行测试,数据见表 3。

之后,对发生爆炸的 592B 相断路器支柱及靠滤波器侧灭弧气室进行了气密性试验,对上述组件充入 0.1 MPa 的 N₂,每半小时观察 SF₆ 表计,3 h 后, SF₆ 表计降低了 0.01 MPa。初步判断上述组件不存在造成断路器炸裂的漏点,说明母线侧灭弧气室发生了较严重漏气缺陷。

为了印证故障断路器单断口爆裂后密度计表压变化情况,采用 FLUENT 软件对路器单断口爆裂后气体泄漏速率进行仿真模拟计算。仿真计算结果

表3 故障断路器三相均压电容器测试数据

Table 3 The test data of three-phase grading capacitor of fault circuit breaker

相别	位置	绝缘电阻/ $G\Omega$	电容值			介质损耗/%
			铭牌值/ μF	实测值/ μF	误差/%	
A	母线侧	99.8	2 000	2 018	0.90	0.060
	滤波器侧	50.8	2 000	2 027	1.35	0.085
B	母线侧	82.4	2 000	1 980	1.00	0.207
	滤波器侧	21.3	2 000	1 992	0.40	0.014
C	母线侧	41.6	2 000	2 041	2.05	0.096
	滤波器侧	63.9	2 000	2 031	1.55	0.049

注:标准要求对瓷式断路器,测得的电容值偏差应在初始值的 $\pm 5\%$ 范围内,介质损耗值一般不大于0.5%。

见图6和表4。

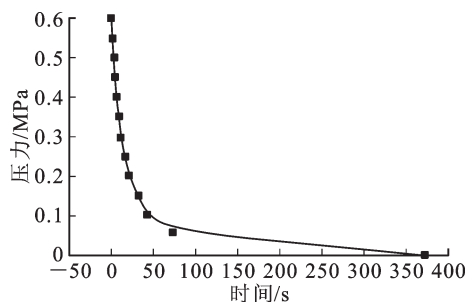


图6 压力变化曲线

Fig. 6 The curves of pressure

表4 气压变化和时间的关系

Table 4 The relationship between pressure and time

序号	气压降/MPa	时间/s
1	0.60→0.55	0.0~1.5
2	0.55→0.50	1.5~3.0
3	0.50→0.45	3.0~4.5
4	0.45→0.40	4.5~6.0
5	0.40→0.35	6.0~9.0
6	0.35→0.30	9.0~12.0
7	0.30→0.25	12.0~16.5
8	0.25→0.20	16.5~21.0
9	0.20→0.15	21.0~31.5
10	0.15→0.10	31.5~43.5
11	0.10→0.05	43.5~72.0
12	0.05→0.00	72.0~372.0

根据计算仿真,当表压变化从0.60 MPa变化到0.55 MPa,时间约为1.5 s,当表压变化从0.55 MPa变化到0.50 MPa,时间约为1.5 s,和实际时间基本一致,在12 s时密度计显示压力为0.30 MPa,灭弧室内压力约为0.05 MPa。仿真结果验证了母线侧灭弧气室发生了较严重漏气缺陷。

5 故障开关解体

为深入了解故障发生的原因,该站将故障避雷器送回生产厂家进行解体检查,具体情况有以下两点:①故障断路器靠滤波器侧断口动触头与静触头上均有明显烧蚀现象,见图7、8,对应的瓷套内壁存在放电灼伤痕迹见图9;②对故障断路器母线侧电容器进行了解体,在电容器上发现两处放电点,见图10、11。

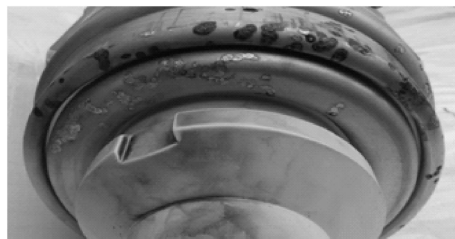


图7 灭弧气室动触头

Fig. 7 Moving contact of interrupter



图8 灭弧气室静触头

Fig. 8 Static contact of interrupter

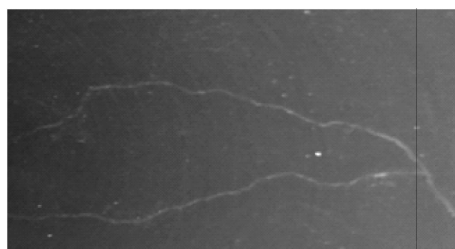


图9 故障灭弧气室内壁放电痕迹

Fig. 9 The discharge trace inside interrupter

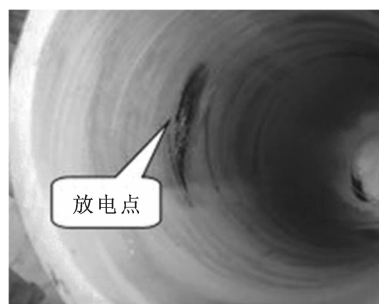


图10 电容器套管内部放电点1

Fig. 10 The No.1 discharge point inside capacitor cylinder

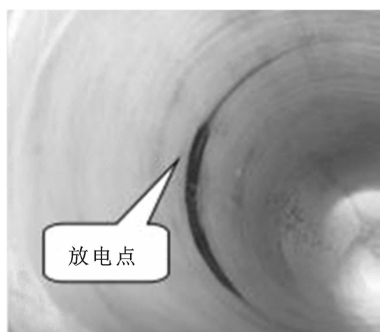


图 11 电容器套管内部放电点 2

Fig. 11 The NO.1 discharge point inside capacitor cylinder

6 事故原因分析

根据前文所分析的常见交流滤波器开关断路器故障类型和特点, 导致断路器故障的因素有: ①遭受雷电灾害; ②器件本身存在缺陷; ③开关分合次数过多; ④器件存在绝缘隐患。

从录波图显示的情况来看, 在断路器断开 8 ms 时, 出现了一次尖峰电流, 然后迅速降为 0; 之后在断路器断开大约 12.2 s 时出现了幅值约为 20 kA 的脉冲电流, 持续 60 ms 左右后变为 183 A 的持续电流, 并没有出现持续强大的短路电流数据, 故可以排除原因①遭受雷电灾害。此外, 根据故障后现场检查、试验和器件解体的情况来看: 第一, 故障断路器靠滤波器侧断口动触头与静触头上均有明显烧蚀现象, 对应的瓷套内壁存在放电灼伤痕迹; 第二, 对故障断路器母线侧电容器进行了解体, 在电容器上发现两处放电点, 并没有发现设备由于贯穿性放电产生的痕迹, 也没有发现绝缘拉杆传动拐臂断裂, 也没有发现弧触头比主触头低, 现场试验结果符合规定要求, 数据正常。根据上文分析的特点, 可知原因②③也可以排除。经过对不同断路器故障情况特点的分析, 结合故障现场特点及录波分析可得④是最有可能导致这次事故的原因。

可根据事故录波显示及器件解体分析的情况, 推断事故发生了两次放电过程并分析事故原因如下: 当系统根据无功需求自动切除 592 交流滤波器后, 在 0 时刻(01:35:08.473), 592 开关跳相位出现。8 ms 后, 录波显示 B 相出现峰值约为 19 kA 的尖峰电流。此后约 1.5 s 后, 出现 SF₆ 低气压报警, 根据对断路器单断口爆裂后气体泄漏速率进行仿真模拟的结果可知: 表压从 0.60 MPa 变化到 0.55 MPa 的时间约为 1.5 s。因此可推断在灭弧室爆裂发生在断路器断开电流后 8 ms 时, 此时形成了第 1 次的放电通道, 根据母线侧静触头悬挂在空中和故障断路器

返厂检查相应的放电痕迹, 并分析由于均压电容表面电阻由于污秽及本身工艺影响, 绝缘筒壁电位差已大于其击穿电压, 此时是容易发生筒壁径向击穿。故推测断路器均压电容器与灭弧室之间发生径向击穿, 引发静触头对灭弧室瓷套内壁放电, 灭弧室瓷套发生击穿, 导致瓷套爆裂, 形成了第 1 次放电通道。

据零时刻约 3 s 后, 592 开关跳位信号消失, 根据对断路器单断口爆裂后气体泄漏速率进行仿真模拟的结果可知 SF₆ 压力下降至 0.50 MPa 的时间约为 3 s, 此时引起合闸控制回路断线。约 12 s 后, 录波图显示出现间歇性电流 (峰值最大约为 6 kA), 经过 60 ms 出现 180 A 的持续电流; 此时由于 592B 相母线侧静触头裸露在空气中, 动触头和均压电容器硅橡胶外套紧密接触, 形成了断路器爆裂后第 2 次的放电通道。断路器两端的电压为母线电压和滤波器电容器上的电压叠加, 当母线电压峰值为 450 kV, 滤波器侧电压为 -450 kV 时, 动静弧触头间最大场强远大于 8 kV/mm, 触头间出现电弧击穿, 发生五次击穿产生脉冲放电, 在形成稳定的导电通道后, 断路器持续导电, 通过稳定电流 183 A。此后经过 3 s 延时, 滤波器零序过流保护 I 段动作, 再经 230 ms 母线失灵保护动作, 跳开大组交流滤波器进线开关和所有小组交流滤波器开关。

综合以上分析, 认为此次故障的原因为: 均压电容器与灭弧室静触头间存在较大的电位差, 电容器径向绝缘强度不够, 导致静触头场强较高存在对电容器放电趋势, 最终导致电容器和灭弧室瓷套先后发生径向击穿, 致使瓷套爆裂。

7 结语

根据统计资料显示, 该换流站复合绝缘均压电容器已发生三次径向击穿故障。在交直流运行工况下, 断路器的安全的工作对整个换流站系统的正常运行稳定运行十分关键。针对此次断路器均压电容器及断路器灭弧气室故障现象, 结合故障原因分析, 提出以下建议和措施:

1) 由于交直流运行工况下环氧筒壁容易由于电位差导致击穿, 对断路器的安全运行造成威胁。可将复合外套均压电容更换为瓷外套均压电容, 并在躯壳侧加装均压环改善电场分布^[23];

2) 由于增加灭弧室内气体压力能够提高灭弧室内的绝缘性能, 因此可适当增加断路器 SF₆ 额定气体压力, 但增加气体压力对瓷套要求更高, 需对断路器瓷套的耐受能力进行相关试验验证;

3)可对断路器支柱和灭弧室瓷套喷涂 RTV 防污闪涂料,提高设备外绝缘防污闪能力;

4)加强对开关断路器设备的巡检工作,对器件的试验和监测严格要求,严把质量关,提高断路器运行的可靠性。

参考文献:

- [1] 陈灿旭. 一起交直流混联系统事故原因分析及整改措施[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1328-1333.
CHEN Canxu. Analysis on cause of an accident in AC/DC hybrid system and rectification measures[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1328-1333.
- [2] 杨利彬, 司马文霞, 杨庆, 等. 一起 220 kV SF₆ 断路器爆炸事故的原因分析及仿真计算[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 89-92.
YANG Libin, SIMA Wenxia, YANG Qing, et al. Simulation calculation and analysis of an explosion accident of 220 kV SF₆ breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 89-92.
- [3] 许杨, 陈小军, 李锋锋, 等. 550 kV 断路器典型故障分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 80-87.
XU Yang, CHEN Xiaojun, LI Fengfeng, et al. Typical faults analysis for 550 kV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 80-87.
- [4] 马虎涛, 黄章强. LW6-220 型断路器绝缘拉杆脱落故障分析[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 128-132.
MA Hutao, HUANG Zhangqiang. Falling-off failure analysis on insulation lever of LW6-220 circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 128-132.
- [5] 杨洋, 黄文龙, 郭锐, 等. 某开合串联电抗器用的 40.5 kV 断路器爆炸的事故分析[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 107-109.
YANG Yang, HUANG Wenlong, GUO Rui, et al. Analysis on explosion of a 40.5 kV circuit breaker for switching series reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 107-109.
- [6] 郭树永. 一起 500 kV SF₆ 断路器爆炸事故分析[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 135-138.
GUO Shuyong. Analysis of an explosion accident of 500 kV SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 135-138.
- [7] LINDQUIST T M, BERTLING L, ERIKSSON R. Circuit breaker failure data and reliability modelling[J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2008, 2(6): 813-820.
- [8] 王朗珠, 蒋燕. 一起热备用中 500 kV SF₆ 断路器爆炸原因探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(7): 99-104.
WANG Langzhu, JIANG Yan. Analysis of an explosion occurred in a warm stand-by 500 kV SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(7): 99-104.
- [9] 唐跃林, 伍平, 谢林涛, 等. 一台 252 kV SF₆ 断路器合闸故障分析及处理[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 72-75.
TANG Yuelin, WU Ping, XIE Lintao, et al. Analysis and treatment of a closing fault of a 252 kV SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 72-75.
- [10] 岳彦峰, 黄兴泉. 一起 SF₆ 断路器灭弧室爆炸的原因分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 189-190.
YUE Yanfeng, HUANG Xingquan. Analysis of an explosion accident of arc chamber of SF₆ circuit breaker[J]. Power System Technology, 2007, 33(6): 189-190.
- [11] 徐党国, 李雨, 孙云生, 等. 500 kV 断路器断口击穿故障与防护措施分析[J]. 高压电器, 2013, 49(3): 59-63.
XU Dangguo, LI Yu, SUN Yunsheng, et al. Research on breaker breakdown and protecting measures of 500 kV circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(3): 59-63.
- [12] 唐世宇, 孙渝江. 500 kV 开关均压电容爆炸事故分析[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 231-233.
TANG Shiyu, SUN Yujiang. Accident analysis of grading capacitance explosion in 500 kV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(3): 231-233.
- [13] 周莉, 童雪芳, 文习山, 等. 断路器均压电容爆炸原因的仿真分析与研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 34-37.
ZHOU Li, TONG Xuefang, WEN Xishan, et al. Simulation analysis of the reason for the explosion of the breaker grading capacitor[J]. Power System Technology, 2005, 31(9): 34-37.
- [14] 陈西庚. 断路器切合并联电抗器爆炸原因分析[J]. 电力建设, 2003, 24(5): 10-11.
CHEN Xigeng. Analysis on explosion causes of circuit breakers during cutting on/off reactors in parallel[J]. Electric Power Construction, 2003, 24(5): 10-11.
- [15] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.
ZHANG Ailing. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 72-76.
- [16] 魏旭, 周志成, 谢天喜, 等. 真空断路器投入并联电容器的过电压分析及防护[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3193-3198.
WEI Xu, ZHOU Zhicheng, XIE Tianxi, et al. Analysis and protection against overvoltages caused by vacuum circuit breakers switching on shunt capacitors[J]. Power System Technology, 2014, 40(10): 3193-3198.
- [17] 李劲彬, 全江涛, 陈隽, 等. 基于分合闸线圈电流的某换流站开关故障分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 141-145.
LI Jinbin, QUAN Jiangtao, CHEN Jun, et al. Fault analysis of circuit breaker in a converter station based on switching coil currents[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 141-145.
- [18] 库晓斐, 蔡泽祥, 徐敏. 高压直流输电系统交流滤波器

(下转第 191 页)

- 50-51.
- [16] 佟智勇,甄利,张远超. SF₆ 开关设备检漏及漏点处理现场实践[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 92-94.
- TONG Zhiyong, ZHEN Li, ZHANG Yuanchao. On-site practice on SF₆ switchgear leak detection and the leaking point treatment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 92-94.
- [17] 袁仕奇,代洲,陈芳. 高压电气设备 SF₆ 气体泄漏检测方法比较[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 54-58.
- YUAN Shiqi, DAI Zhou, CHEN Fang. Comparison of SF₆ leakage detection methods for high-voltage electrical equipments[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(2): 54-58.
- [18] 高树国,郑爱全,耿江海,等. 应用激光成像技术检测 SF₆ 电气设备气体泄漏[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 103-105.
- GAO Shuguo, ZHENG Aiquan, GENG Jianghai, et al. Application of laser imaging technology to detection of SF₆ leakage in electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 103-105.
- [19] 田勇,阎春生,孙立时. 利用激光成像技术定位检测 SF₆ 设备气体泄漏[J]. 东北电力技术, 2005, 26(12): 35-37.
- TIAN Yong, YAN Chunsheng, SUN Lishi. On locating and check-up on the leakage of SF₆ devices by the technique of laser imaging[J]. Northeast Electric Power Technology, 2005, 26(12): 35-37.
- [20] 张力,卢昌华,江建国,等. 激光可视检漏仪中激光能量对灵敏度的影响[J]. 激光与红外, 2010, 40(3): 246-248.
- ZHANG Li, LU Changhua, JIANG Jianguo, et al. Influence of power of laser on sensitivity of leaking laser imaging system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(3): 246-248.
- [21] 郭小凯,郑炎. 基于光声光谱技术的 SF₆ 泄露检测技术[J]. 高压电器, 2010(6): 89-92.
- GUO Xiaokai, ZHENG Yan. Leakage detection of SF₆ based on photo-acoustic spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus, 2010(6): 89-92.
- [22] 何杰,李栋. 盆式绝缘子 SF₆ 气体泄漏分析及治理[J]. 山西电力, 2014(3): 27-30.
- HE Jie, LI Dong. Analysis and treatment for SF₆ gas leakage of basin-type insulators[J]. Shanxi Electric Power, 2014(3): 27-30.
- [23] Q/GDW 11062—2013 六氟化硫气体泄漏成像测试技术现场应用导则[S]. 2013.
- 2013 Q/GDW 11062—2013 Field application guide for the test technology of SF₆ gas leak imaging[S]. 2013.

李永祥(1983—),男,工程师,研究方向为输变电设备状态评价技术、电力设备带电检测技术。

李艳鹏(1982—),男,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术、电力设备带电检测技术。

杨冬冬(1983—),男,高级工程师,研究方向为电力设备带电检测技术。

齐振忠(1984—),男,工程师,研究方向为电气设备试验技术。

(上接第 184 页)

- 故障与保护分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 150-155.
- KU Xiaofei, CAI Zexiang, XU Min. Fault and protection analysis of AC filter for HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 150-155.
- [19] ABBASGHORBANI M, MASHHADI H R, DAMCHI Y. Reliability-centred maintenance for circuit breakers in transmission networks[J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2014, 8(9): 1583-1590.
- [20] 张星海. 换流站关键电气设备过电压分析及绝缘故障检测方法的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
- ZHANG Xinghai. Study on overvoltage analysis and insulation fault detection of critical electric equipment in converter station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [21] 罗敬华. 高压直流输电系统滤波器故障分析及对策研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- LUO Jinghua. Research on filter failure analysis and treatments in HVDC transmission systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [22] 张弛. 高压直流断路器及其关键技术[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- ZHANG Chi. High-voltage DC circuit breaker and its crucial technologies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [23] LIU Jun, HUANG G M, MA Zhiying, et al. A novel smart high-voltage circuit breaker for smart grid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 254-264.
- 秦怡宁(1971—),男,工程师,研究方向为直流输电运维技术。
- 樊友平(1970—),男,博士,教授,博士生导师,从事复杂电力系统运行调控机制与系统稳定机理及其动态调控理论、新型输变电设备系统建模与信息综合集成及其服役安全运行的管控理论方面的教学和研究工作(通讯作者)。