

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.08.030

基于缺陷记录的直流主设备主要运行缺陷统计与分析

陈 岳¹, 陈翔宇², 邓 军¹, 宋云海¹, 胡 军²

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663;

2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 笔者通过统计分析2000年1月到2013年7月间南方电网超高压公司记录的上万条缺陷记录, 介绍并分析了直流主设备的缺陷情况。针对各直流主设备, 通过缺陷数、百台设备缺陷数以及紧急缺陷数等统计指标, 给出了直流主设备中需重点关注的设备, 并通过分析主要设备常见缺陷的发生情况, 给出了换流站不同设备应重点关注的问题, 最终有针对性地给出相关的建议与意见。由于目前针对直流设备的统计与分析较少, 因此, 针对直流系统相关运维人员工作具有较强的指导作用。

关键词: 直流主设备; 缺陷统计; 缺陷分析; 油浸式换流变压器; 换流阀; 交直流滤波器电容器

Statistical Analysis of Basic Defects in Conventional DC Main Equipment Based on Defect Records

CHEN Yue¹, CHEN Xiangyu², DENG Jun¹, SONG Yunhai¹, HU Jun²

(1. M & T Center, EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The principal defects in conventional DC equipment are introduced and analyzed based on the statistics of about ten thousands of defect records from January 2000 to July 2013 in China Southern Power Grid EHV Company. According to the statistic indexes, such as defect number and emergent defect number, the equipments that need more attention are given. For different equipment, the symptoms of common defects are analyzed, hence different issues to which more attention should be paid are provided for corresponding equipments in a converter substation. Furthermore, some suggestions are offered for prevention and reduction of conventional DC main equipment's accidents.

Key words: DC main equipment; defect statistics; defect analysis; oil-immersed converter transformer; converter valve; AD/DC filter capacitor

0 引言

目前, 各个电网公司普遍建立起了相对完善的缺陷记录制度。缺陷记录建立的目的是通过对换流站设备的巡视, 及时发现缺陷, 及时消除缺陷, 不断提高设备健康运行水平, 确保设备的经济安全运行。目前而言, 学界尚欠缺对变电站、换流站主设备缺陷记录进行深入的统计分析, 尤其是对直流系统

主设备的研究开展得甚少, 文[1]中对湖北超高压公司几个自动化变电站几年的缺陷进行了记录统计, 文[2-3]中对滤波器电容器进行了较为深入的缺陷统计分析, 文[4-5]中对油浸式换流变压器做了较为详尽的换流变相关缺陷情况统计与分析。但目前为止, 缺乏对换流站内直流主设备的横向对比和多维度的缺陷统计分析工作, 因此, 通过对长时间、多设备、大规模缺陷记录统计分析, 尝试摸清设备缺陷的特点和规律迫在眉睫。

收稿日期: 2015-04-06; 修回日期: 2015-04-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050209)。

Project Supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (2012AA050209).

1 缺陷记录概况

通过对南网超高压公司下属各局的直流主设备主要故障缺陷记录的整理,得到了直流主设备运行缺陷故障的基本情况。缺陷记录的时间跨度从2000年1月到2013年7月,约13.5年。

统计分析的范围包括 ± 500 kV 宝安换流站、 ± 500 kV 安顺换流站、 ± 500 kV 广州换流站、 ± 500 kV 马窝换流站、 ± 500 kV 兴仁换流站、 ± 500 kV 肇庆换流站、 ± 800 kV 穗东换流站和 ± 800 kV 楚雄换流站的直流场部分以及南宁局 500 kV 玉林串补站。

文中所统计分析的缺陷记录,主要是针对大电网直流主设备,包括油浸式换流变压器、换流阀、干式平波电抗器、光 CT、交/直流滤波器电容器、直流耦合电容器、交流 PLC 耦合电容器、光 PT、金属回路转换断路器(MRTB)、直流接地极、直流系统用避雷器、串补用 MOV 等一次设备。

2 缺陷统计总体情况

在南方电网超高压公司所统计的上万条缺陷记录中,通过深入的数据挖掘,共得到近 2 500 条有效的大电网直流主设备典型缺陷记录。

南网超高压公司直流主设备典型缺陷情况见图 1,从图 1 可以看到,对于直流主设备,南网超高压公司所辖所有换流站及串补站的缺陷记录中,记录最多的设备是换流变,占比 45%。排名第 2 的设备为交流滤波器电容器,其占比 32%。换流阀位列第 3 位,占比超过 16%。换流变和换流阀作为直流系统中最昂贵的两种设备,应引起换流站运行维护人员的重点关注。接下来记录次数较多的设备有直流滤波器电容器、平波电抗器等,均占比 3%。

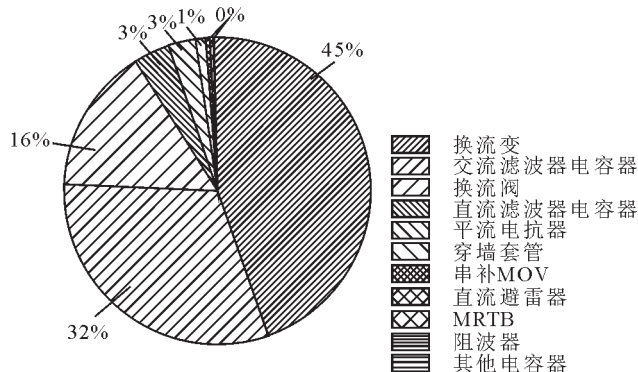


图 1 南网超高压公司直流主设备典型缺陷情况

Fig. 1 Typical defects of main equipment for DC transmission of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid

按照设备缺陷管理的相关规定,一般按缺陷严

重程度分为紧急缺陷、重大缺陷和一般缺陷 3 类^[6],紧急缺陷指线路或设备发生了直接威胁安全运行并需立即处理的缺陷,否则随时可能造成设备损坏、人身伤亡、大面积停电或火灾事故;重大缺陷指对人身或设备有严重威胁,暂时尚能坚持运行但需尽快处理的缺陷;一般缺陷指紧急缺陷、重大缺陷以外的性质一般,情况较轻,对安全运行影响不大的缺陷,多以铭牌脱落、数字表无显示、呼吸器硅胶变色、轻微渗漏油、计数器损坏等缺陷最为常见。

其中,对于对直接威胁设备安全运行紧急缺陷统计情况见图 2。由图 2 可知,交流滤波器电容器引起的紧急缺陷占比最大,达到了 39%,紧随其后的是换流阀和换流变,分别占 35%和 10%。

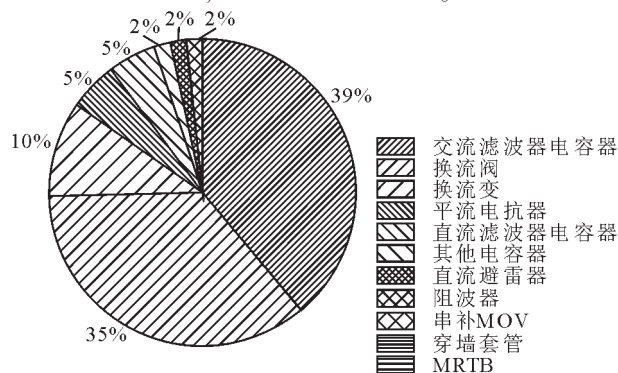


图 2 南网超高压公司直流主设备紧急缺陷情况

Fig. 2 Emergency defects of main equipment for DC transmission of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid

由上述分析应该看到,由于各种设备在电网中的数量并不相同甚至差距很大,因此,单纯地了解缺陷记录数量,可能对文中的分析帮助有限,应结合各设备的数量进行进一步分析。通过了解上述主要设备的统计年份间的大致平均数量,得到了表 1。

表 1 文中涉及的几种主要直流设备的数量统计

Table 1 The statistical number of main DC equipment in this paper

设备名称	数量(约数)
MRTB	65
油浸式换流变压器	225
直流避雷器	300
电容器	450
换流阀	40
串补 MOV	300

各设备的缺陷记录数量除以平均设备台数,再考虑统计时长 13.5 年的因素,而计算出来的平均每年记录下来的缺陷数,即可得到归一化的设备缺陷数,可以定义其为单台设备年化缺陷数,同理可得

到百台设备年化紧急缺陷数,结果见图3。

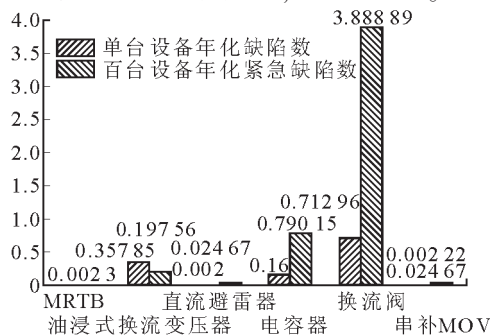


图3 归一化缺陷记录数情况

Fig. 3 Normalized defect record number

单台设备缺陷数前两名的设备为换流阀和油浸式换流变压器,对于百台设备缺陷数,换流阀、电容器以及油浸式换流变压器分别为前3名。综合缺陷记录数统计情况和紧急缺陷数统计情况,可见换流阀和换流变由于其结构异常复杂,状态量众多,因此单台设备缺陷数较多。除此之外,换流变和换流阀所处的电磁环境较为复杂,文[7]中对换流站的主要电磁骚扰源进行了分析。包含交、直流电场、交直流复合场等^[8],因此,也较容易出现缺陷甚至是紧急缺陷。

通过考察某个设备的紧急缺陷占全部缺陷数的比例,定义为紧急缺陷率,各个设备的紧急缺陷率见图4。直流系统用避雷器紧急缺陷率最高,金属氧化物避雷器较易发生绝缘击穿,而一旦发生绝缘方面缺陷,其有更大的可能是紧急缺陷,但应注意到,直流系统用避雷器一共仅有9条缺陷记录,因此,此结果可能存在较大误差。另外,换流阀以及电容器的紧急缺陷概率较高,因此,也应加强对该设备的关注。

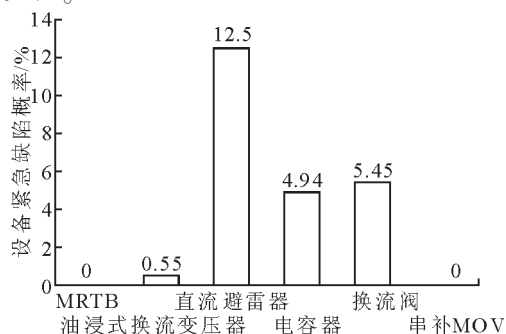


图4 设备紧急缺陷概率

Fig. 4 Emergency defect probability of equipment

3 主要设备缺陷情况分析

3.1 油浸式换流变压器

油浸式换流变压器设备在缺陷记录中共有记录1 087条,占直流设备典型缺陷记录的45%,位列

第1位(见图1),但其中紧急缺陷仅6条,重大缺陷为16条。

油浸式换流变压器设备缺陷记录统计情况见图2,可见占比较多的缺陷有呼吸器硅胶受潮、渗漏油、冷却器风扇故障等,分别占18%、15%和9%,这与油浸式交流变压器相似,并和文[3]中统计的结果基本吻合。

综合图3、4的结果来看,对于换流变来说,其单台设备缺陷数和百台设备紧急缺陷数并不是非常高,与交流变压器的统计结果相当,这说明,虽然换流变压器处在较为复杂的电磁环境中,但造成其缺陷较多的仍然是一些机械损伤或密封性问题。而这类问题相对来说难以形成紧急缺陷或在其发展初期便可被控制或消缺。考察其紧急缺陷及重大缺陷记录可见,紧急缺陷共有6例,分别涉及其他缺陷2起、红外测温异常2起、渗漏油1起,其他继电器故障1起。重大缺陷共16例,其中其他缺陷6例,渗漏油5起,红外测温异常3例,绝缘项目测试不合格1例,非电量保护系统异常1例。其中渗漏油等记录较多的缺陷,其引起的严重缺陷并不是很多。

换流变属于大型充油设备,每台换流变充油近百吨,经过数年的运行及迎峰度夏高温满负荷的考验^[9],其密封部件不可避免会存在一定的劣化,导致渗漏油缺陷的出现。具体分析原因可以发现,换流变运行过程中,由于换流过程有大量谐波的存在,容易产生较大振动,并导致套管等部位螺丝松动,最终造成套管渗漏油。对于巡检人员,应对此予以重视,通过紧固渗漏部位螺丝,可以解决套管漏油等故障^[9]。

冷却器故障,尤其是冷却器风扇电机故障所占比重较大,其他文献也有相应的情况记录^[9-11]。直流输电负荷一直较大,风机运行时间长,风机部件容易损耗,容易导致轴承磨损或绝缘降低,风机故障。除此之外,风机本身的质量也参差不齐,较易发生缺陷。对于运检人员,建议记录各组冷却器各个电机的运行时间,并根据运行时间的长短,制定了定期切换制度,保证每个电机每年运行时间基本相等。在开展例行的检修工作期间,加强对电机的绝缘情况的检查,并对电机的轴承和其他部件进行仔细的检查和维护。

3.2 换流阀

换流阀设备在缺陷记录中共有记录385条,占直流设备典型缺陷记录的16%,位列第3位(见图1),但其中紧急缺陷却有21条,重大缺陷为5条。换流变典型缺陷类型统计图见图5。

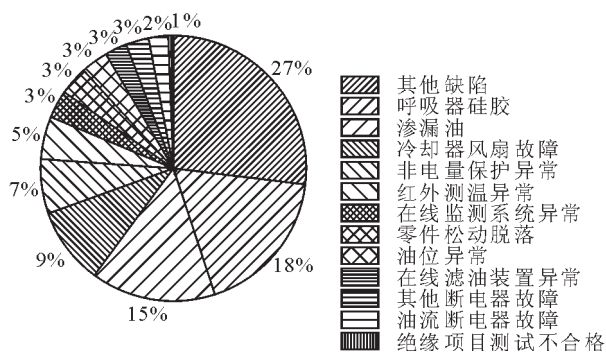


图5 换流变典型缺陷类型统计图

Fig. 5 Statistical chart for typical defect types of converter transformer

换流阀设备缺陷记录统计情况见图6, 可见占比较多的缺陷有漏水、空调故障、阀控系统异常等, 分别占16%、16%和13%。由图3, 换流阀设备的单台设备缺陷数以及百台设备紧急缺陷数均位列所统计分析设备的第1名。

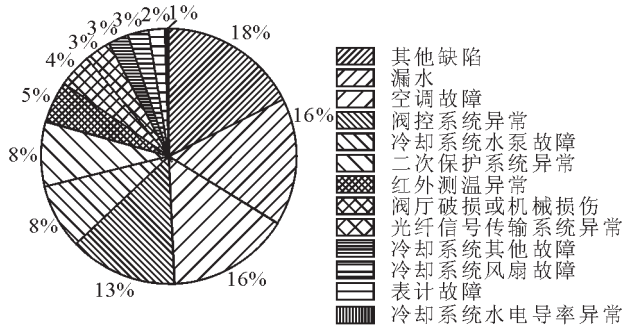


图6 换流阀典型缺陷类型统计图

Fig. 6 Statistical chart for typical defect types of converttervalve

由图3、4可以看到, 换流阀相对比较容易出现缺陷尤其是紧急缺陷^[12], 分析其具体的紧急缺陷和重大缺陷, 紧急缺陷共有21例, 分别涉及漏水9起、阀控系统异常4起、光纤信号传输系统异常3起、冷却系统水泵故障1起、冷却系统其他故障1起、二次保护系统异常1起。

由上可见, 漏水是最多引起紧急缺陷的原因。漏水缺陷主要发生在阀门、法兰及喷淋泵轴封处, 风扇故障主要是由于电机或轴承损坏对于其冷却系统漏水的问题^[13-15], 建议一方面应加强对冷却系统的巡视尤其是其冷却水管的巡视和维护, 并与厂家共同改进其设计, 降低其破损造成漏水的概率。对喷淋塔、喷淋泵、三次冷凝装置等外冷水回路设备, 应加强维护, 出现设备老化现象时及时进行更换, 停电时, 紧固松动的端子、螺丝; 对诸如内冷水主泵等设备, 利用年度检修时间, 检查轴封, 并检查同心度是否满足要求^[3]。另一方面, 也应加强对漏水的监

测, 力争在漏水初期尽早发现其漏点, 防止事态情况扩大酿成更严重的事故。同时, 在采取状态评估和检修的工程中, 应适当加大对冷却系统尤其是冷却系统漏水相关状态参量的权重, 以突出漏水缺陷对换流阀正常安全运行的影响。

3.3 交直流滤波器电容器

直流换流站交、直流滤波器的基本原理是通过电抗器、电容器和电阻器的不同组合致使某次谐波流经它时所呈现的阻抗很小, 从而将谐波电流导出系统, 达到滤除谐波的功能, 同时对于交流滤波器而言, 由于电容器、电抗的存在, 电流流经时能够产生一定的无功功率, 达到提供无功的功能。目前, 交流滤波器电容器运行情况不理想, 故障率偏高, 大大超过工程设计时提出的故障率小于0.2%的目标^[2,16]。

交/直流滤波器电容器设备在缺陷记录中共有记录867条, 其中交流滤波器电容器788条, 直流滤波器电容器79条, 分别占直流设备典型缺陷记录的32%(位列第1)和3%(见图1)。其中紧急缺陷分别为23条和3条。

交直流滤波器电容器的缺陷记录统计情况见图7, 占比较多的缺陷有渗漏油、接头温升异常以及保护系统异常。

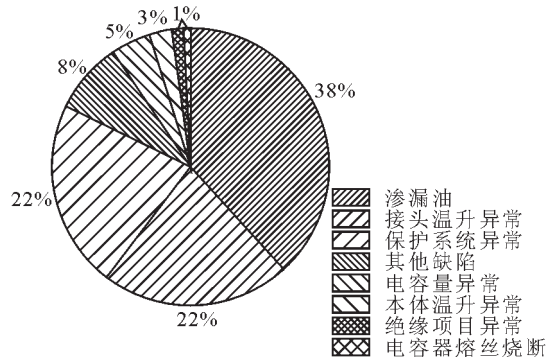


图7 交直流滤波器电容器典型缺陷统计图

Fig. 7 Statistical chart for typical defect types of AC and DC filter capacitor

由图3、4可知, 滤波器电容器不仅有较高的紧急缺陷概率, 同时百台设备缺陷数也较高。分析其具体的紧急缺陷记录, 共有26例, 分别涉及滤波器电容器接头温升异常8起, 滤波器电容器电容量异常7起, 滤波器电容器渗漏油6起, 滤波器电容器其他缺陷3起, 滤波器电容器保护系统异常1起, 滤波器电容器电容器熔丝烧断1起。

可见接头发热是最为影响滤波器电容器正常运行的缺陷。一般来说, 大部分接头发热由于接头结构不合理、螺丝松动所致, 其中, 电容器接头设计不合理是导致电容器接头过热的重要原因, 而电容

器接头过热可能导致电容器漏油,内部绝缘性能下降,电容元件被击穿,电容器发生故障。对于这种情况,应加强红外测温或夜间巡视来进行及时的缺陷发现和消缺,停电时对发热部位进行适当的打磨。当灼烧较为严重甚至出现断股时,应进行整段导线的更换^[17-20]。

而渗漏油缺陷,主要发生在电容器接线头部位以及瓷瓶根部。其中接线头部位的渗漏油尤为严重,多为接头连接线选型及线夹设计不合理有关^[2,21-22],应引起生产厂家的重视。除此之外,在安装搬运的时候,如果方法不当,也容易造成隐形的损伤,在夏季高温季节时就这种损伤便会形成明显缺陷暴露出来。

4 措施与建议

1)加强巡视,对百台设备紧急缺陷数高的设备重点关注。百台设备紧急缺陷数高的设备种类往往更容易发生紧急缺陷,而一旦发生紧急缺陷,将会严重威胁电网安全运行。因此,加强对重点设备、尤其是有多次过往缺陷记录的设备以及有家族缺陷的设备的监视与维护,将会有效减少紧急缺陷的发生。

2)对各设备发生频次高,并且影响较大的缺陷进行原因分析,以及消缺经验总结。通过对各设备发生频次高、影响较大的缺陷进行总结,可以使巡检人员的巡检工作更有针对性,大大提高巡检准确度和效率。并通过总结缺陷原因和消缺经验,可以使缺陷原因的定位更加迅速,并更及时、高效、科学、准确地进行消缺工作,进一步确保电网设备的安全、稳定、经济的运行。

3)根据缺陷记录分析,相对交流设备,考虑是否对直流设备采取有差异的巡视策略。通过上述统计分析,可见各个设备发生缺陷的特点、部位有较大区别,同时通过对比交流系统中的类似设备,确定是否有必要采取有差异的巡视策略,如变压器和换流变的主要缺陷分布情况相似,因此可以参考交流变压器制定换流变的相关策略。

4)采用更为规范的缺陷记录模式。文中在统计过程中,面对海量质量较差的缺陷记录,投入了大量时间、人力和精力进行整理、统计与分析,但仍存在准确度的问题。因此,电网公司应关注基础数据如缺陷记录等的规范化、信息化问题,可有效减轻一线运维人员的工作强度,并为后续更有效地分析打好基础。

5 结语

通过对上述长时间尺度、多设备、大规模缺陷

记录的统计分析,得到了上述多个主要直流关键设备的缺陷分析情况。文中所统计的结果虽具有较强的可信性和参考性,但因较为规范性的缺陷记录仍然欠缺,难免存在部分结果不够十分精准,如MRTB、阻波器设备的缺陷记录数量,由于缺陷记录本身以及海量数据提取误差,可能淹没了部分可用缺陷记录。因此,该文的意义更多在于提出了一种相对先进的缺陷记录利用方法以及分析手段和思路,给出了参考性较强的缺陷原因统计分析结果,并对于较为主要的缺陷,给出了科学合理的分析和有针对性的措施。电网企业可参考上述分析结果,加深对直流工程主设备缺陷规律的认识^[8-9],调整相应运维制度和方式,以更好地确保大电网安全、可靠、经济的运行。

参考文献:

- [1] 李红兵,杨书文. 500 kV 综合自动化变电站设备缺陷统计分析[J]. 湖北电力,2009,33(2):12-13.
LI Hongbing, YANG Shuwen. Statistical analysis of equipment defects in 500 kV comprehensive automation substation[J]. Hubei Electric Power, 2009, 33(2): 12-13.
- [2] 曾喜闻. 直流换流站滤波器电容器运行情况分析及改进措施[J]. 湖北电力, 2012, 36(4): 39-40.
ZENG Xiwen. Analysis and treatment of filter capacitor fault in converter station[J]. Hubei Electric Power, 2012, 36(4): 39-40.
- [3] 杨光亮, 邹能灵, 郑晓冬. 换流站阀水冷系统导致直流停运隐患分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010(18): 199-203.
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong. Analysis of potential dangers leading to HVDC outage in valve cooling system[J]. Power System Protection and Control, 2010(18): 199-203.
- [4] 张海燕, 常 勇, 陕华平. 超高压直流输电系统换流变压器运行维护总结[J]. 电网技术, 2009(19): 186-189.
ZHANG Haiyan, CHANG Yong, SHAN Huaping. Summarization of converter transformer operation and maintenance of EHVDC power transmission systems[J]. Power System Technology, 2009(19): 186-189.
- [5] 刘天作, 王 喆. 换流变压器运行分析及改进措施[J]. 华中电力, 2011, 24(4): 57-59.
LIU Tianzuo, WANG Zhe. Operation analysis and improvement measures of converter[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(4): 57-59.
- [6] 陈志军. 苏州地区 500 kV 变电站设备运行缺陷分析[J]. 江苏电机工程, 2006(3): 53-55.
CHEN Zhijun. Analysis of operational defects of Suzhou 500 kV substations[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006(3): 53-55.

- [7] 余占清, 何金良, 曾 嵘, 等. 高压换流站的主要电磁骚扰源特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 898-902.
YU Zhanqing, HE Jinliang, ZENG Rong, et al. Characteristics of major EMD sources in HVDC converter stations[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 898-902.
- [8] 谢 超, 刘红太, 盛 康, 等. 换流变压器阀侧套管故障分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 95-98.
XIE Chao, LIU Hongtai, SHENG Kang, et al. Analysis of valve-side bushing failures in converter transformers[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 95-98.
- [9] 李锋锋, 邵能灵. 国家电网直流输电系统换流变运行情况[J]. 华东电力, 2007, 35(1): 58-60.
LI Fengfeng, TAI Nengling. Operational analysis of converter transformers of DC transmission systems of SGCC[J]. East China Electric Power, 2007, 35(1): 58-60.
- [10] 李 勇. ± 500 kV 天广直流换流变总体运行情况[J]. 电网技术, 2008(S2): 75-77.
LI Yong. Analysis of converter transformer general operation for ± 500 kV tianguang HVDC[J]. Power System Technology, 2008(S2): 75-77.
- [11] 周海峰, 郭树永. 高压直流换流站一次设备运行分析及故障预防[J]. 华电技术, 2014(1): 49-51.
ZHOU Haifeng, GUO Shuyong. Analysis on operation of primary equipments of high voltage DC convertor station and fault prevention[J]. Huadian Technology, 2014(1): 49-51.
- [12] 李国尧, 刘 盛, 徐 峰, 等. 柔性直流换流站阀厅设备温度监测[J]. 电力建设, 2013(6): 92-94.
LI Guoyao, LIU Sheng, XU Feng, et al. Temperature monitoring of valve hall equipment in flexible DC converter station[J]. Electric Power Construction, 2013(6): 92-94.
- [13] 姚其新, 饶洪林. 换流站阀水冷系统隐患分析及治理[J]. 华中电力, 2010, 23(5): 56-58.
YAO Qixin, RAO Honglin. Valve cooling system pitfall analysis and treatment in yidu converter station[J]. Central China Electric Power, 2010, 23(5): 56-58.
- [14] 许根富, 尚立新. 高压晶闸管换流阀外水冷系统分析[J]. 中国电力, 2009, 42(12): 42-44.
XU Genfu, SHANG Lixin. Research on outside cooling system for high voltage thyristor valves[J]. Electric Power, 2009, 42(12): 42-44.
- [15] 田 庆. 直流输电工程阀水冷系统缺陷分析[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 80-85.
TIAN Qing. Analysis of existing problems in the valve cooling system for HVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 80-85.
- [16] 曹 涛, 汲胜昌, 吴 鹏, 等. 高压直流换流站电容器的振动与噪声特性[J]. 电工技术报, 2010, 25(10): 87-93.
CAO Tao, JI Shengchang, WU Peng, et al. Vibration and noise characteristics for capacitor in HVDC converter station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 87-93.
- [17] 徐玲玲, 张国威, 王世民, 等. 直流输电换流站电容器运行情况分析及改进措施[J]. 电力电容器, 2007, 28(1): 1-4.
XU Lingling, ZHANG Guowei, WANG Shimin, et al. Operation analysis and improvement suggestion for HVDC converter station power capacitors[J]. Power Capacitor, 2007, 28(1): 1-4.
- [18] 吴述超, 周绍元, 乔记阳, 等. 直流输电控制系统硬件平台的测试系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, V42(15): 123-127.
WU Shuchao, ZHOU Shaoyuan, QIAO Jiyang, et al. Design of hardware platform test system of HVDC control system[J]. Power System Protection and Control, 2014, V42(15): 123-127.
- [19] 魏 琰, 刘天琪, 晏小彬, 等. 高压直流输电系统直流偏磁下的谐波不稳定判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, V42(17): 139-144.
WEI Yue, LIU Tianqi, YAN Xiaobin, et al. Study of harmonic instability criterion under DC magnetic bias in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, V42(17): 139-144.
- [20] 李 豹, 马业林, 熊双成, 等. ± 800 kV 特高压直流保护优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, V42(16): 71-75.
LI Bao, MA Yelin, XIONG Shuangcheng, et al. Research on optimization of ± 800 kV UHVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, V42(16): 71-75.
- [21] 郝江涛, 黄 葵. 天生桥换流站直流滤波电容器近年来频繁损坏的原因分析及改造措施[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 94-98.
HAO Jiangtao, HUANG Kui. Damage analysis of the DC filter capacitors in tianshengqiao converter station with countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 94-98.
- [22] 朱革兰, 魏春枝, 王 钢. 三调谐直流滤波器高压电容故障分析与保护[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 78-81.
ZHU Gelan, WEI Chunzhi, WANG Gang. Failure analysis and protection of high voltage capacitor in three tuned DC filter[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 78-81.
- 陈 岳(1970—), 男, 工程师, 主要从事电力系统保护与控制方面的工作。
陈翔宇(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事电网交/直流输变电设备状态监测、电网大数据方面的工作。
- (编辑 吴俊丽)