

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.008

特高压直流换流阀电抗器端子发热问题研究

张 雷, 刘 宁, 董妍波, 于 强, 王 康

(西安西电电力系统有限公司, 西安 710075)

摘要: 高压直流输电工程的直流电流已从 3 000 A 逐步增大到 5 000 A, 一些关键通流器件(如阀电抗器)的设计裕度变得越来越小, 甚至出现少量阀电抗器端子过热的情况。针对特高压大组件换流阀电抗器端子发热的问题, 理论分析了端子发热的主要原因, 并建立了 Ansys 热场仿真模型, 同时对增加 U 型母线后的电抗器端子及其连接母线进行了相关试验, 结果表明在电抗器端子处增加 U 型母线能够有效降低端子处的温度, 是一种值得推荐的解决大组件阀电抗器端子发热的有效方法。

关键词: 特高压直流; 阀电抗器; 发热; U 型母线

Study on Heating of Reactor Terminal of UHVDC Converter Valve

ZHANG Lei, LIU Ning, DONG Yanbo, YU Qiang, WANG Kang

(Xi'an XD Power Systems Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: With the direct current of HVDC transmission projects gradually increasing from 3 000 A to 5 000 A, the design margins of some key devices, such as valve reactor, become smaller and smaller, even overheating exists in some valve reactor terminals. In this study, the terminal overheating of UHVDC converter valve reactor was investigated. The main factors causing the terminal overheating were analyzed, and a thermal field simulation model was established with the software Ansys. Furthermore, some tests were conducted on the reactor terminal with a U-type bus added and its connecting bus. The results show that the addition of a U-type bus to reactor terminal can reduce the temperature of the terminal effectively.

Key words: UHVDC; reactor of valve; overheating; U-type bus

0 引言

随着中国国民经济建设需求的提高和电力建设事业的发展, 特高压直流输电技术变的越来越重要^[1-15]。目前, 国家电网公司已有 4 条特高压直流工程投运, 分别为向家坝—上海±800 kV/4 000 A、锦屏—苏南±800 kV/4 500 A、哈密—郑州±800 kV/5 000 A 和溪洛渡—浙江±800 kV/5 000 A 特高压直流输电工程, 其中特高压换流站复龙站、锦屏站、哈密站和金华站均安装了大组件技术换流阀。近两年来, 上述 4 个换流站的大组件阀电抗器端子数次出现发热现象, 尤其是金华极 1 换流阀(直流电流 5 000 A), 个别发热点的最高温度达到 110 ℃以上。鉴于端子发热问题会增加换流阀检修的频次, 严重

时甚至会引起电网临时停电, 需尽快开展特高压大组件换流阀电抗器端子发热问题研究, 尽早完成现场整改工作, 确保不因换流阀电抗器端子发热问题导致直流系统临时停运。

1 过热点的实物位置

通过工程现场监测, 发热点主要集中在与电抗器的两个端子及其连接母线处, 具体位置见图 1。

结合红外测温图片, 现场人员对发热点进行了跟踪监测, 并在停电后对图片中显示的发热为止进行了确认, 最终确定了发热处的实物位置, 具体见图 2。

2 端子过热的原因分析

根据现场监测和端子处接触电阻测试的结果, 同时结合相关分析^[16-17]可知, 导致母线发热的可能



图1 工程现场监测的发热位置

Fig. 1 The heating position of site monitoring



图2 发热位置的实物图

Fig. 2 The physical map of heating position

原因有:

- 1) 铜铝接触面局部氧化^[18-20], 接触面内部导电能力分布不均, 导致接头的连接部分形成过热点;
- 2) 接触脂涂抹不均匀或较厚, 在大电流的加热下, 接触面局部位置出现放电, 导致母排连接处的接触电阻^[21-28]增大, 从而加速接触面的发热;
- 3) 原阀电抗器端子处的接触面相对较小, 导致该处载流密度相对较大, 使得接触面可能出现过热现象。

针对上述原因, 对引起阀电抗器端子发热的因素(如接触电阻、接触面的载流密度等)进行了梳理, 提出了增加 U 型母线的解决方案, 即采用 U 型母线包住接触端头, 使原设计的铜铝材料单面接触变为双面接触, 电抗器端子接触面的载流密度有效减小, 有利于降低该处的发热温度。

该方案的另一优点在于阀厅现场安装相对简单, 具有很高的可行性。

3 U 型母线方案的热场仿真分析

3.1 无 U 型母线时的 Ansys 热场分布

如图 2 所示, 大组件换流阀电抗器的端子为铝材, 而与之相连接的母线均为铜材, 两者的接触面

积为 80 mm×80 mm。换流阀(以金华极 1 为例)额定运行时, 通过电抗器端子的为 5 000 A 方波电流(占空比 1/3)。根据运行工况, 对阀电抗器端子连接处的热场进行了仿真, 结果见图 3。

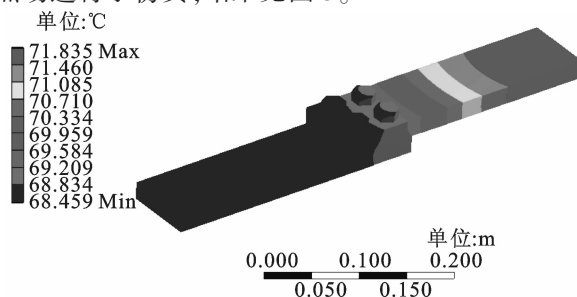


图3 端子连接处的热场仿真模型

Fig. 3 Thermal field simulation model of terminal connections

由图 3 可知, 在这种情况下, 接触面的温度约为 68~69 °C, 铝排的温度最高, 达到 71.8 °C。

3.2 增加 U 型母线后的 ANSYS 热场分布

当在阀电抗器端子增加了 U 型母线后, 采用相同的电流和散热条件对新模型进行仿真, 具体结果见图 4。

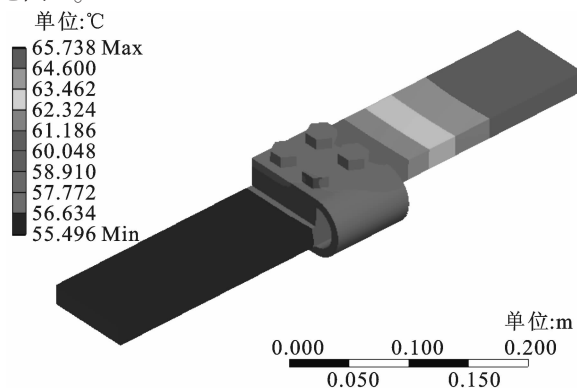


图4 增加 U 型母线后端子连接处的热场仿真模型

Fig. 4 Thermal field simulation model of terminal connection with U bus

由图 4 可知, 在这种情况下, 接触面的温度约为 57~58 °C, 比不加 U 型母线时降低了约 10 °C, 铝母线的整体温度降低, 最高温度为 65.7 °C。

3.3 仿真结果分析

对比两组仿真结果可知, 在相同电流下, 在有 U 型母线和无 U 型母线时, 接触面及母线表面的温度并不相同, 当增加了 U 型母线后: ①接触位置的温度降低; ②电抗器端子及其连接母线整体温度降低, 其中铜母线的温度最低, 其次是接触面的温度, 而铝母线的温度最高。

另外, 当电流的流经方向分别为铝—铜和铜—铝时, 仿真结果安全相同, 这说明电流的流向对仿真结果无影响。

4 U型母线方案的通流试验

4.1 试验回路的设计

试验的目的主要是为了获得在增加U型母线和无U型母线时,电抗器端子及其连接母线的温度,并对两者的结果进行对比。

由于阀电抗器的左右两个端子处分别临近进水口和出水口,因此两个端子处的冷却条件并不相同。在设计验证试验时为了避免冷却条件带来的影响,采用两台电抗器电路串联、水路并联的方案。第1台电抗器的端子(1号和2号)及连接母线与工程相同(无U型母线),第2台电抗器的端子(3号和4号)均加装有U型母线,即1号和3号端子的冷却条件(近进水口)相同,而2号和4号端子冷却条件(近出水口)相同,流过4个端子的电流完全相同。通流试验回路见图5。

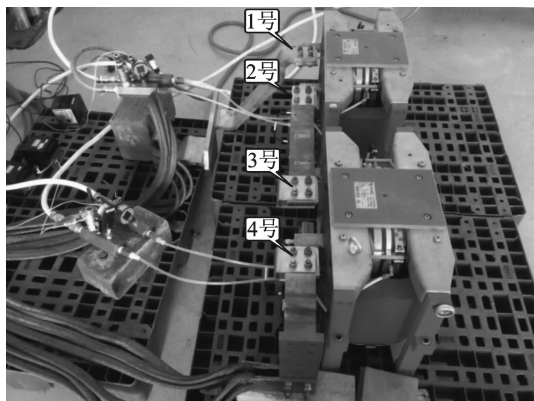


图5 通流试验回路

Fig. 5 Test circuit of temperature rising

4.2 试验要求

1)按照工程中安装母线的工艺进行母线连接;

2)同时给两台电抗器分别通水(单台流量为 (8.5 ± 0.2) L/min),进水温度为 (45 ± 1) °C。通以与工程相同的等效直流电流,直至母线温度稳定(半小时内变化不超过1 °C),测量电抗器铝排、接触面和铜排表面温度。

4.3 试验结果及分析

按照试验方案,对有、无U型母线时的电抗器端子及其连接母线进行了通流试验,结果见表1。

表1 通流试验结果

Table 1 The result of temperature rising

端子位置	进水温度 $T_{in}/^{\circ}\text{C}$	出水温度 $T_{out}/^{\circ}\text{C}$	稳定温度 $T_{steady}/^{\circ}\text{C}$
1号	45	—	71
2号	—	53	79
3号	45	—	64
4号	—	53	71

因为进、出水温差会对接触面温度结果产生较大影响,因此选择冷却条件相同的位置进行对比分析。由结果可知:

1)1号和2号端子处的温度并不高,分别为71 °C和79 °C,试验条件与工程现场的实际情况基本相同,这说明目前的电抗器端子及其连接母线的设计是合理的,但是该设计对端子、母线的平整度及安装工艺提出了过高的要求。

2)对比1号与3号端子、2号与4号端子的温度,后者均比前者低7~8 °C。可见增加了U型母线后,端子处的温度比不加U型母线时明显降低。

5 结论

针对特高压换流站大组件换流阀饱和电抗器端子发热问题,进行了热场仿真,并对增加U型母线后的电抗器端子及其连接母线进行了相关试验,结论如下:

1)文中提及的U型母线方案是在分析了端子发热的原因及其影响因素后提出的,同时考虑了现场施工的便利性,具有较高的可行性;

2)尽管热场仿真模型并不完全与阀厅现场的实际情况相同,但该方法对研究电抗器端子发热具有一定的指导意义;

3)采用增加U型母线的方案,可以有效降低端子处的温度,同时降低临近连接母线的整体温度;

4)在实际应用时,应逐步完善U型母线的制造和安装工艺,以便在出现发热问题的特高压大组件换流阀中推广和实施该方案;

5)大组件换流阀电抗器端子发热问题的分析与研究,为后续6 250 A特高压换流阀的研发积累了宝贵的经验。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
LIU Zhenya. Special of the research results of UHVDC transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [2] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7.
- [3] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary

- nary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [4] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- ZHAO Wanjun. HVDC transmission project technologies[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] 孙昭英, 李庆峰, 宿志一, 等. ± 800 kV 直流输电空气间隙外绝缘特性研究[J]. 中国电力, 2006, 39(10): 47-51.
- SUN Zhaoying, LI Qingfeng, SU Zhiyi, et al. Study on the external insulation characteristics of air gaps of ± 800 kV UHVDC projects[J]. China Electric Power, 2006, 39(10): 47-51.
- [6] 聂定珍, 袁智勇. 特高压直流换流站外绝缘海拔修正方法的选择[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 1-4.
- NIE Dingzhen, YUAN Zhiyong. Selection of altitude correction methods for external insulation of UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 1-4.
- [7] 张小勇, 李博, 李侠, 等. 基于模拟负载法 ± 800 kV 换流阀多重阀绝缘试验技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 20-25.
- ZHANG Xiaoyong, LI Bo, LI Xia, et al. Study on the dielectric test techniques for MVU of ± 800 kV thyristor valves based on simulation load method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 20-25.
- [8] 田方, 黎小林, 黄莹, 等. 云广直流输电工程换流阀多重阀单元型式试验研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(6): 40-43.
- TIAN Fang, LI Xiaolin, HUANG Ying, et al. Study on the multiple valve unit test of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(6): 40-43.
- [9] 曹均正, 汤广福, 王高勇, 等. $\pm 1\ 100$ kV 特高压直流输电换流阀研制及型式试验[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 67-71.
- CAO Junzheng, TANG Guangfu, WANG Gaoyong, et al. Design and type testing for the converter valve for 1 100 kV UHVDC power transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 67-71.
- [10] GB/T 20989—2007 高压直流换流站损耗的确定[S]. 2007.
- GB/T 20989—2007 HVDC transmission converter station determination of loss[S]. 2007.
- [11] 国家电网公司. 1100 kV 特高压直流输电工程设备研制技术规范——换流阀[R]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- SGCC. Equipment development technical specification of 1 100 kV UHVDC projects—converter valve[R]. Beijing: SGCC, 2011.
- [12] 李侠, SACHS G, UDER M. ± 800 kV 特高压直流输电用 6 英寸大功率晶闸管换流阀[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 1-5.
- LI Xia, SACHS G, UDER M. 6 inch high power thyristor valves for ± 800 kV UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.
- [13] 马为民, 聂定珍, 曹燕明. 向家坝—上海 ± 800 kV 特高压直流工程中的关键技术[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 1-5.
- MA Weimin, NIE Dingzhen, CAO Yanming. Key technical schemes for ± 800 kV UHVDC project from xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 1-5.
- [14] 王丽君, 刘卓. 特高压干式空心电抗器电场仿真及均压装置设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2): 56-60.
- WANG Lijun, LIU Zhuo. Electric field simulation and potential grading device design of UHV dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 56-60.
- [15] 刘海锋, 邸世辉. 电抗器无线测温研究与完善措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(1): 51-54.
- LIU Haifeng, DI Shihui. Study and improvement of wireless temperature measurement on reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(1): 51-54.
- [16] 柴诚敬, 张国亮. 化工流体流动与传热[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- CHAI Chengjing, ZHANG Guoliang. Chemical fluid flow and heat transfer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [17] 张宝宏, 丛文博, 杨萍. 金属电化学腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- ZHANG Baohong, CONG Wenbo, YANG Ping. Metal electrochemical corrosion and protection[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [18] 石延辉, 谢超, 张志浩. 电气设备接头发热原因统计分析及预防措施[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 126-129.
- SHI Yanhui, XIE Chao, ZHANG Zhihao. The statistical analysis on overheat causes of electrical equipment connectors and related preventive measures[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(2): 126-129.
- [19] 何家成, 张强. 铜铝连接接触发热原因分析与防治[J]. 攀钢技术, 1998(5): 41-43.
- HE Jiacheng, ZHANG Qiang. Copper aluminum connecting contact analysis and prevention of the causes of fever[J]. Panzhihua Technology, 1998(5): 41-43.
- [20] 王炼兵, 郭伟华, 陈腾彪, 等. 高压电力电缆事故回流线接地端子发热缺陷分析[J]. 广东电力, 2013, 26(12): 120-123.
- WANG Lianbing, GUO Weihua, CHEN Tengbiao, et al. Analysis on calorification defect of grounding terminal of accident return cable of high voltage power cable[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(12): 120-123.
- [21] 贺卫星, 刘顺新. 矩形母线接触电阻测试系统的设计及试验分析[J]. 电气制造, 2012(11): 71-73.

- HE Weixing, LIU Shunxin. Design and experimental analysis of rectangular bus bar contact resistance test system[J]. Electrical Manufacturing, 2012(11):71-73.
- [22] 吕启深. 不同接触电阻在负荷电流增大情况下发热的预测方法[J]. 黑龙江电力, 2014, 36(3):249-253.
- LYU Qishen. Heating prediction with different contact resistance under the condition of increasing load current[J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(3):249-253.
- [23] 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, 42(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, 42(16):71-75.
- [24] 陈仕龙, 张 杰, 毕贵红, 等. 一种基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10):77-83.
- CHEN Shilong, ZHANG Jie, BI Guihong, et al. A fault location method based on high frequency attenuation characteristic of UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10):77-83.
- [25] 罗 兵. 基于 ANSYS 的空心并联电抗器抗震性能计算分析[J]. 变压器, 2015, 52(2):6-10.
- LUO Bing. Analysis and calculation of seismic performance for air core parallel reactor based on ANSYS[J]. Transformer, 2015, 52(2):6-10.
- [26] 朱岸明, 李润秋, 郑 楠, 等. 超高压磁控式并联电抗器励磁特性分析[J]. 变压器, 2014, 51(11):29-32.
- ZHU Anming, LI Runqiu, ZHENG Nan, et al. Analysis of excitation characteristic for EHV magnetically controlled shunt reactor[J]. Transformer, 2014, 51(11):29-32.
- [27] 栾铸德, 曹克涛, 郑 欢. 干式空心电抗器直流电阻判定标准探析[J]. 变压器, 2014, 51(7):28-30.
- LUAN Zhude, CAO Ketao, ZHENG Huan. Analysis of judgement standard for DC resistance of dry-type air-core reactor[J]. Transformer, 2014, 51(7):28-30.
- [28] 王丽君, 刘 卓. 特高压干式空心电抗器电场仿真及均压装置设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2):56-60.
- WANG Lijun, LIU Zhuo. Electric field simulation and potential grading device design of UHV dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2):56-60.
- 张 雷(1984—), 男, 工程师, 主要从事高压直流输电系统研究和换流阀设计。

(上接第 49 页)

- mountain 750 kV substation project of 800 kV long GIS main loop resistance testing technology[J]. Qinghai Electric Power, 2011(s1):42-44.
- [11] 李 楠, 郭云峰. 回路电阻测试仪的使用与维护[J]. 仪器仪表用户, 2013(6):99-100.
- LI Nan, GUO Yunfeng. Use and maintenance of circuit resistance tester[J]. Instrumentation Customer, 2013(6):99-100.
- [12] 牛文静. 断路器导电回路电阻智能测试的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- NIU Wenjing. Study on conductive loop resistance test of the intelligent circuit breaker[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [13] 肖建涛. 新型断路器回路电阻测试方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- XIAO Jiantao. Study on a new type of circuit breaker loop resistance test method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [14] 夏小飞. 基于冲击大电流测量断路器回路电阻的方法研究[J]. 电气技术, 2013(10):28-33.
- XIA Xiaofei. Study on the method of impact current measuring circuit breaker based on electric resistance[J]. Electrical Engineering, 2013(10):28-33.
- [15] 周沛洪, 戴 敏, 娄 颖, 等. 1 000 kV 交流断路器开断电流的直流分量时间常数和零偏现象[J]. 高电压技术, 2009, 35(4):722-730.
- ZHOU Peihong, DAI Min, LOU Ying, et al. The DC component of the time constant of 1 000 kV AC circuit breaker current and zero offset phenomena[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4):722-730.
- [16] 张 华. 高压断路器回路电阻超标原因分析及处理[J]. 湖南电力, 2012(5):49-50.
- ZHANG Hua. Cause analysis and treatment of exceed the standard of high voltage circuit breakers[J]. Hunan Electric Power, 2012(5):49-50.
- [17] 袁小娟, 苗本建. 高压隔离开关主回路电阻测量结果不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2010(2):69-70.
- YUAN Xiaoxian, MIAO Benjian. The main loop resistance evaluation of uncertainty in measurement of high voltage isolation switch[J]. Metrology & Measurement Technique, 2010(2):69-70.
- 李 洋(1987—), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向高压技术, 主要从事变电检修工作。