

DOI: 10.7667/PSPC160223

天广直流换流阀异常导通 EMTDC 仿真分析

黄义隆, 陈欢, 国建宝, 王振

(中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

摘要: 自2014年7月以来, 天广直流发生了四次换流阀异常导通事件, 造成主设备过电流或过电压, 严重影响天广直流安全稳定运行。为查明换流阀异常导通原因, 从极控系统、VBE系统、换流阀及其组件、TE板等方面开展理论分析、现场排查、仿真分析、物理试验, 成功排除了极控系统、VBE系统、换流阀及其组件导致换流阀异常导通的可能性。通过TE板BTC回路分析以及加压试验, 发现了TE板在高污高湿条件下误触发晶闸管的情况。在BTC动作门槛值与TE板异常个数关系分析的基础上, 开展四次换流阀异常导通事件的EMTDC仿真分析, 模拟了部分TE板BTC动作门槛值降低的情况, 得到了与现场故障波形高度相似的仿真波形。结果表明即使部分阀片TE板表面较为清洁, 其余TE板表面积污严重, 在潮湿环境下也可以导致换流阀异常导通。

关键词: 天广直流; 换流阀异常导通; TE板; BTC动作门槛值; 仿真分析

Analysis on the abnormal breakover of the converter valve based on EMTDC simulation in Tian-Guang HVDC project

HUANG Yilong, CHEN Huan, GUO Jianbao, WANG Zhen

(China Southern Power Grid EHV Maintenance & Test Center, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Since July 2014, Tian-Guang HVDC project happened the events of the converter valve abnormal breakover four times, which caused the main equipment overcurrent or overvoltage and seriously influenced the safe and stable operation of Tian-Guang HVDC project. In order to identify the cause of the converter valve abnormal breakover, the theoretical analysis, field checking, simulation analysis and physical test are done from the aspects of the control system, the VBE system, the converter valve and its components and the TE boards, which successfully eliminates the possibility of the converter valve abnormal breakover by the control system, VBE system, converter valve and its components. Through the analysis and high voltage test of the BTC circuit of the TE boards, it is found that the TE boards will mis-trigger the thyristor under the high pollution and humidity condition. Based on the analysis of the relationship of the BTC acting threshold and the number of the abnormal TE boards, the decrease of the threshold of the partial BTC is set in the EMTDC simulation on the four events, and the simulation waves are highly similar to the field fault waves. The results show that even if part of TE boards are clean and the rest are polluted seriously, the TE boards also would lead to the abnormal breakover of the converter valve in the humid environment.

Key words: Tian-Guang HVDC; converter abnormal breakover; TE boards; BTC acting threshold; simulation analysis

0 引言

2014年7月14日, 天广直流发生了首次换流阀异常导通事件, 广州站极1在备用状态, 天生桥站极1由备用转闭锁时, 两站换流阀均异常导通; 事后天生桥站极1空载加压试验过程中有多块TE板烧毁。2015年5月天广直流接连发生了三次换流阀异常导通事件, 5月18日, 天生桥站极2在闭锁状态, 广州站极2由备用转闭锁时, 广州站换流阀

异常导通; 5月21日, 天生桥站极2在备用状态, 广州站极2由备用转闭锁时, 广州站换流阀异常导通; 5月27日, 广州站极1线路被隔离, 极1换流变充电时, 广州站换流阀异常导通。总结4次换流阀异常导通事件的共同特点如下: 1) 发生在直流由备用转闭锁的过程中; 2) 阀厅内开展检修工作, 阴雨天气, 室外空气湿度较高。

国内外对直流工程换流阀误导通的报道并不多^[1-11]。文献[1]报道了2002年岷泗直流工程调试期

间发生的换流阀误触发事件,分析认为故障现象集中表现为V3阀在V6阀开通振荡时误触发,检查发现VBE柜内光纤外皮接地不良,有轻微局部放电,阀换相振荡时,对同相阀的光纤产生干扰导致换流阀误触发。文献[2]指出随着换流阀运行时间增加,因老化晶闸管恢复电荷较小,引起晶闸管耐受能力降低。文献[3]针对2008年12月28日葛洲坝换流站极II换流阀故障情况进行了分析,认为换流阀故障主要是由于晶闸管老化,部分晶闸管耐压能力降低及漏电流增加是引起的。

本文从极控系统、VBE系统、换流阀、TE板等方面对天广直流换流阀异常导通的原因进行分析,并针对TE板在高污高湿环境下导通晶闸管的可能性,通过EMTDC仿真软件,研究部分TE板BTC动作门槛值降低后对换流阀导通情况的影响,最终确定了天广直流换流阀异常导通的原因。

1 天广直流故障原因分析

天广直流换流阀误导通故障为天广直流投运以来首次出现的故障类型,故障可能原因涉及换流阀系统、阀控系统、极控系统等多类设备;同时,相关设备针对该种非典型故障缺乏故障信息和故障录波,难以像常规设备故障依靠准确信息快速定位故障点,为故障分析带来极大困难。

1.1 极控系统可能性分析

针对极控系统导致天广直流换流阀异常导通的可能性,从极控系统逻辑、极控主机、VBE接口机箱及连接线三方面开展了分析和检查工作。主要情况如下所述。

在极控系统逻辑方面,梳理了极控系统备用转闭锁过程、解锁过程、极控系统站间通讯与解锁逻辑关联性^[12-13]。结合现场故障录波,发现故障过程中两站站间通信信息无异常,极控系统未产生用于触发换流阀的换流变充电信号(CB_ON)、解锁信号(DEBLOCK)和触发控制信号(CP),因此基本排除了极控系统逻辑导致换流阀异常导通的可能性。

在极控主机方面,分析了极控主机信号与顺序事件记录(SER)的关系,结合故障时极控主机的响应情况,发现极控主机未发出与解锁相关的SER事件,因此未发现极控主机异常导致换流阀异常导通的可能性。

在VBE接口机箱及连接线方面,分析了极控屏柜内VBE接口装置及连接线,发现VBE接口装置各类板卡均有隔离及抗干扰措施,极控系统屏柜内的VBE接口装置与VBE系统的连接为屏蔽层+双绞线结构,具有较强的抑制干扰的能力。

2014年11月,天生桥局对极控系统软件逻辑和极控屏柜内VBE接口装置开展了外观检查和现场试验,未发现异常情况。

综上所述,未发现极控系统导致天广直流换流阀四次异常导通的可能性。

1.2 VBE系统可能性分析

针对VBE系统导致天广直流换流阀异常导通的可能性,从极控系统送VBE系统的信号以及VBE系统内部信号监视两个方面开展了分析和检查工作。主要情况如下所述。

在极控系统送VBE系统的信号方面,分析了VBE系统对极控系统信号的响应情况,发现故障时VBE系统未产生与阀解锁相关SER事件,说明VBE系统未产生和接收到异常信号^[4]。2015年3月,天生桥局在极控系统程序中将阀解锁相关的信号进行置位,检查了VBE系统的响应情况,并对极控系统与VBE接口的信号电平进行了测试和抗干扰试验,未发现异常。

在VBE系统内部信号方面,广州局多次对直流备用转闭锁、闭锁转解锁期间的VBE系统内部信号进行监测,均未发现异常。在“5.21”换流阀异常导通事件过程中,广州局利用示波记录仪对误导通阀对应的信号通道进行实时监测,未发现极控系统送VBE系统的触发控制信号、解锁信号以及VBE系统送TE板触发脉冲。

综上所述,未发现VBE系统导致天广直流换流阀四次异常导通的可能性。

1.3 换流阀及其组件可能性分析

针对换流阀及其组件导致天广直流换流阀异常导通的可能性,从换流阀阀片、均压回路、避雷器三方面开展了分析和检查工作,主要情况如下所述。

在换流阀阀片方面,分析了换流阀异常导通时刻交流电压的大小和变化情况,发现故障时刻交流电压波形与正常电压波形基本相同,不足以使阀片击穿,且阀片损坏是不可逆的,一旦损坏无法继续正常工作,目前换流阀仍能正常运行,不存在阀片损坏的可能性。

在换流阀均压回路方面,换流阀均压回路异常会导致相应阀片电压分布不均,一旦部分阀片电压大于保护性触发动作电压时,可能所有阀片相继保护性触发,最终发展成换流阀异常导通。2015年9月,广州局对均压电容和阻尼回路进行外观检查及设备参数测试,未发现异常。

在换流阀避雷器方面,换流阀异常导通时,换流阀承受的电压为正常工作电压,远低于避雷器动作电压^[15],基本排除换流阀避雷器导致换流阀异常

导通的可能性。

综上所述, 未发现换流阀及其组件导致天广直流换流阀四次异常导通的可能性。

1.4 TE 板可能性分析

TE 板的 BTC 回路用于晶闸管两端电压过高时, 保护晶闸管免受过电压导致损坏, 当 TE 板检测到可控硅两端的电压超过 7200 V, TE 板将发送触发脉冲至晶闸管, 并发送该晶闸管保护性触发的信号至 VBE。

换流阀带电瞬间, 晶闸管两端电压处于额定电压附近, 如果 BTC 的触发电压电路异常, 使得 TE 板上 BTC 触发回路的电容低压端电压达到 7 V, TE 板发出触发脉冲, 将导致换流阀异常导通。

通过 TE 板加压试验, 发现了天广直流换流变充电过程中四次换流阀异常导通的原因为: 天广直流换流阀 TE 板未采取防污秽、防潮措施, 长时间运行后 TE 板表面污秽严重, 在高湿度环境下, BTC 触发回路电容两端绝缘电阻下降, 进而造成 BTC 回路(后备触发回路)动作电压降低, 导致换流变充电过程中换流阀异常导通。

图 1 为 TE 板在环境温度为 28 °C, 湿度 85% 环境下静置一段时间后开展的加压试验。当交流电压达到 669 V 时, TE 板 C57 电容低压端电压达到约 7 V, TE 板发出触发脉冲, 造成交流电压跌落至 0 V, 并维持了约 0.47 ms, 说明此时晶闸管处于导通状态; 随后交流电压再次达到约 669 V 时, TE 板第二次发出触发脉冲, 交流电压跌落至 0 V, 晶闸管再次导通约 0.35 ms; 紧接着交流电压第三次达到约 669 V 时, TE 板第三次发出触发脉冲, 交流电压跌落至 0 V, 此次晶闸管导通时间较长, 达 4.08 ms。

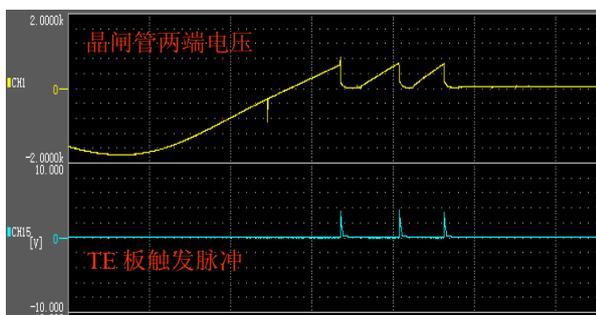


图 1 TE 板加压试验结果

Fig. 1 Result of high voltage test of TE board

2 天广直流换流阀异常导通仿真分析

由前文分析可知, 单个 TE 板存在高污高湿环境下误发触发脉冲导通晶闸管的可能性, 为了进一

步分析部分 TE 板异常对换流阀异常导通的影响, 结合 TE 板 BTC 动作门槛值降低程度, 开展换流阀异常导通 EMTDC 仿真分析。

2.1 TE 板 BTC 动作门槛值理论计算

假设换流变阀侧额定电压为 198.5 kV, 换流变交流进线开关合闸且换流阀未导通时, 每个单阀承受最大电压为相电压幅值为 $\sqrt{2} \times \frac{198.5 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 162 \text{ kV}$, 每个单阀由 78 个阀片组成, 每个阀片平均承受的最大电压为 $162 \text{ kV}/78 = 2.08 \text{ kV}$ 。

假设单阀(78个阀片)中部分阀片出现 BTC 动作门槛值下降的情况, BTC 动作门槛值下降个数为 x , 相应的动作门槛值为 y , 其余阀片 BTC 动作门槛值均设计值 7200 V, 那么要使 78 个阀片同时导通, 须满足

$$y \times x + 7200 \times (78 - x) \leq 162000 \quad (1)$$

$$\text{即 } x \geq \frac{399600}{7200 - y} \quad (2)$$

假设有部分阀片的 BTC 动作门槛值下降至 669 V, 那么只要 78 个阀片中有 62 个阀片 BTC 动作门槛值下降至 669 V, 其余 16 个阀片即使 BTC 动作门槛值仍维持原来的 7200 V, 整个单阀也可以在承受换流变阀侧正向电压时导通。

2.2 天广直流换流阀异常导通波形仿真分析

针对 2015 年 5 月 18 日、21 日、27 日广州站以及 2014 年 7 月 14 日天生桥站换流阀异常导通波形开展 EMTDC 仿真, 并与现场故障波形进行对比分析。在 EMTDC 仿真模型中, 设置广州站单极 12 脉动阀组中每个单阀(共 78 个阀片)62 个阀片 BTC 动作电压门槛值为 669 V, 其余 16 个阀片 BTC 动作电压门槛值为 7200 V。同时设计了换流变进线开关选相合闸逻辑, 即直流由备用操作至闭锁状态时, 在 A 相电压峰值处合上 A 相开关, 5 ms(0.25 个周波)后再同时合上 B、C 相开关。广州站在 A 相合闸瞬间或者 B、C 相合闸瞬间都会发生换流阀异常导通的情况。

2.2.1 2015 年 5 月 18 日广州站故障波形 EMTDC 仿真

图 2 是模拟 2015 年 5 月 18 日广州站故障情况的仿真波形图, 当极 2 换流变网侧 B、C 两相合闸后(C 相在正半波、B 相在负半波), Y 桥和 D 桥换流阀均导通, 从阀侧电流可知, 极 2 换流阀 Y 桥的 5 号阀和 6 号阀同时导通, 而后 5 号阀向 1 号阀换相; D 桥的 2 号阀和 3 号阀同时导通, 而后 2 号阀向 4 号阀换相, 如图 3 所示。

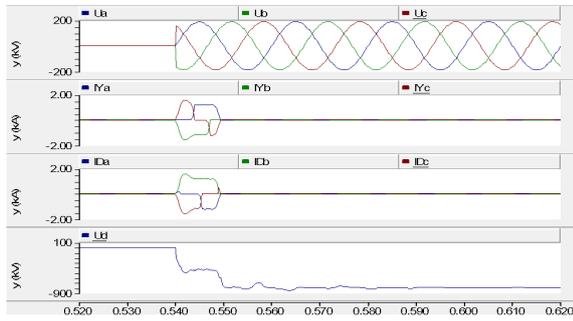


图 2 2015 年 5 月 18 日广州站 EMTDC 仿真波形
Fig. 2 EMTDC simulation wave of Guangzhou station on 18th May, 2015

与 2015 年 5 月 18 日广州站换流阀异常导通的波形(如图 4)对比可知,导通的换流阀和换相顺序是相同的,故障波形相似。

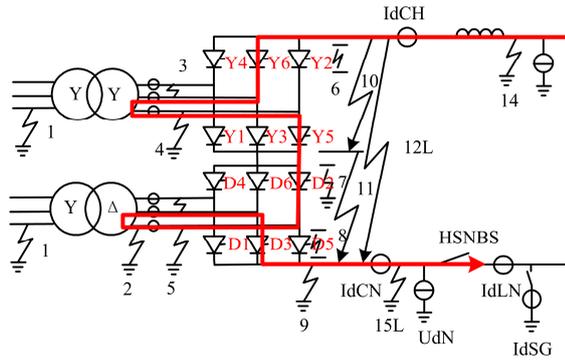


图 3 2015 年 5 月 18 日换流阀电流示意图
Fig. 3 Schematic diagram of converter current in on 18th May, 2015

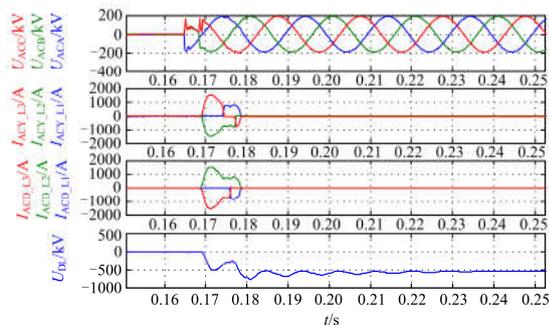


图 4 2015 年 5 月 18 日广州站故障波形
Fig. 4 Fault wave of Guangzhou station on 18th May, 2015

2.2.2 2015 年 5 月 21 日广州站故障波形 EMTDC 仿真
图 5 是模拟 2015 年 5 月 21 日广州站故障情况的仿真波形图,当极 2 换流变网侧 B、C 两相合闸后(C 相在负半波、B 相在正半波),Y 桥和 D 桥换流阀均导通,从阀侧电流可知,极 2 换流阀 Y 桥的 2 号阀和 3 号阀同时导通,而后 2 号阀向 4 号阀换

相,3 号向 5 号阀换相;D 桥的 5 号阀和 6 号阀同时导通,而后 5 号阀向 1 号阀换相,如图 6 所示。

与 2015 年 5 月 21 日广州站换流阀异常导通的波形(如图 7)对比可知,故障前期导通的换流阀和换相顺序是相同的,故障波形基本相似。

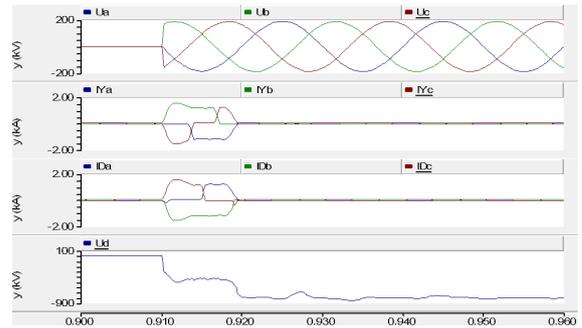


图 5 2015 年 5 月 21 日广州站 EMTDC 仿真波形
Fig. 5 EMTDC simulation wave of Guangzhou station on 21th May, 2015

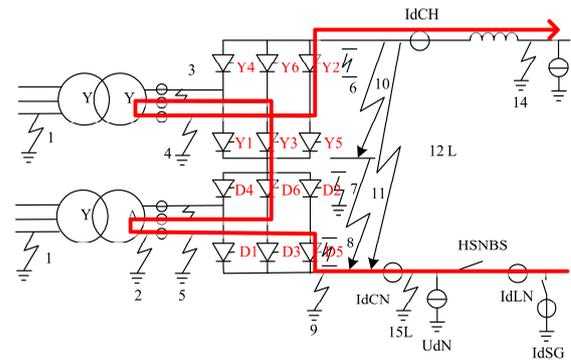


图 6 2015 年 5 月 21 日换流阀电流示意图
Fig. 6 Schematic diagram of converter current on 21th May, 2015

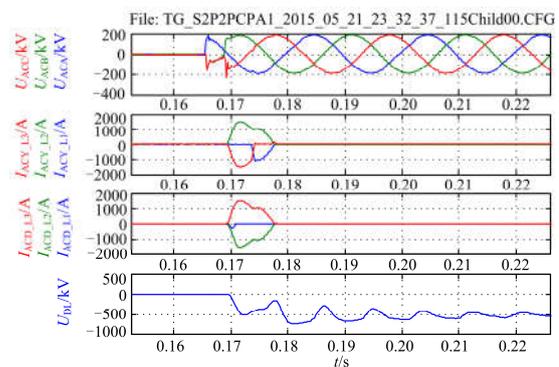


图 7 2015 年 5 月 21 日广州站故障波形
Fig. 7 Fault wave of Guangzhou station on 21th May, 2015

2.2.3 2015 年 5 月 27 日广州站故障波形 EMTDC 仿真
图 8 为 2015 年 5 月 27 日广州站故障情况的仿真波形图,当极 2 换流变网侧 A 相(正半波有峰值

合闸后, Y 桥和 D 桥换流阀均导通, 从阀侧电流可知, 极 2 换流阀 Y 桥的 1 号阀、2 号阀和 6 号阀同时导通, D 桥的 3 号阀和 4 号阀同时导通, 如图 9 所示。

与 2015 年 5 月 27 日广州站换流阀异常导通的波形(如图 10)对比可知, 导通的换流阀和换相顺序是相同的, 故障波形相似。

2.2.4 2014 年 7 月 14 日天生桥站故障波形 EMTDC 仿真

利用 EMTDC 模拟广州站处于备用状态, 天生桥站由备用转闭锁的过程, 仿真结果如图 11 所示。天生桥站直流电压振荡增大后缓慢减小, 直流电流逐渐增大, 换流阀 Y 桥和 D 桥均出现类似正常换相的波形。

与 2014 年 7 月 14 日天生桥站换流阀异常导通(如图 12)对比可知, 现场故障波形交流电压、阀侧交流电流均含有大量谐波, 直流电压衰减较快, 仿真波形与故障波形较为相似。

综上所述, 2015 年 5 月 18 日、21 日、27 日广州站以及 2014 年 7 月 14 日天生桥站换流阀异常导通事件 EMTDC 仿真结果表明, EMTDC 仿真波形与 4 次换流阀异常导通现场故障波形相似, 换流阀及其换相顺序相同, 说明即使只有部分 TE 板 BTC 回路动作门槛值下降, 也可以使换流阀异常导通。

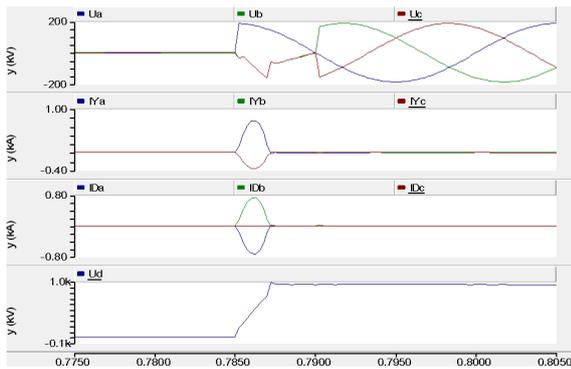


图 8 2015 年 5 月 27 日广州站 EMTDC 仿真波形
Fig. 8 EMTDC simulation wave of Guangzhou station on 27th May, 2015

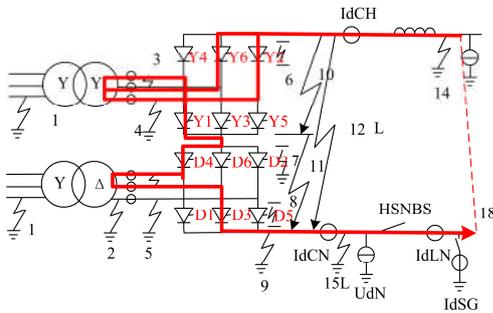


图 9 2015 年 5 月 27 日换流阀电流示意图
Fig. 9 Schematic diagram of converter current on 27th May, 2015

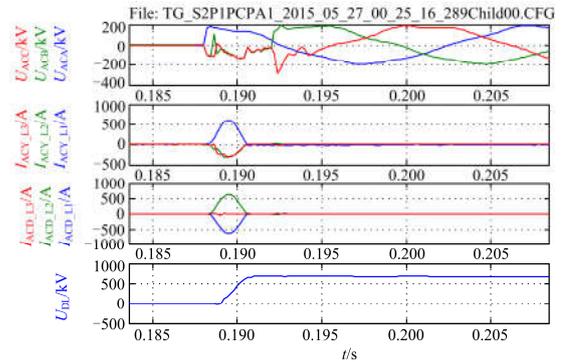


图 10 2015 年 5 月 27 日广州站故障波形
Fig. 10 Fault wave of Guangzhou station on 21th May, 2015

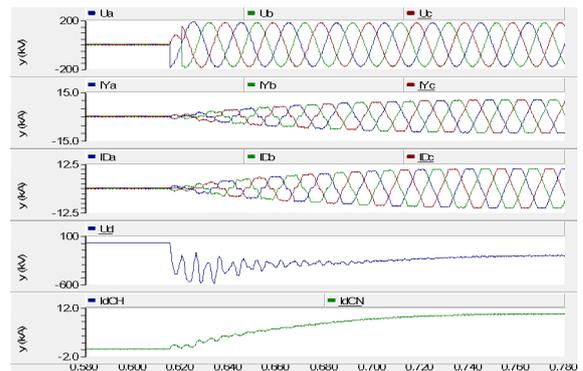


图 11 2014 年 7 月 14 日天生桥站 EMTDC 仿真波形
Fig. 11 EMTDC simulation wave of Tianshengqiao station on 14th July, 2014

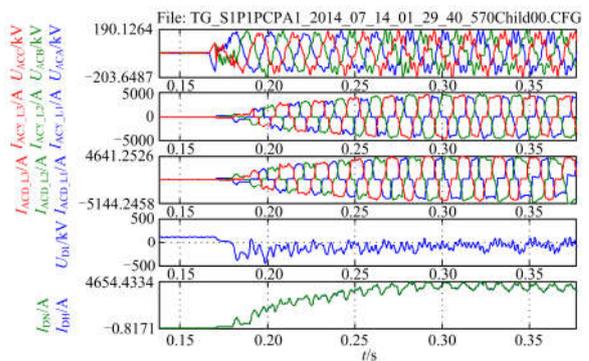


图 12 2014 年 7 月 14 日天生桥站故障波形
Fig. 12 Fault wave of Tianshengqiao station on 14th July, 2014

3 结语

本文从极控系统、VBE 系统、换流阀及其组件、等方面对天广直流换流阀异常导通问题进行分析和设备排查, 排除了极控系统、VBE 系统、换流阀及其组件导致换流阀异常导通的可能性, 通过 TE 板原理分析和加压试验, 发现了 TE 板 BTC 回路误发脉冲导致晶闸管导通的根本原因。

针对部分 TE 板异常是否可能导致整个换流阀异常导通的问题,进行 TE 板 BTC 回路动作门槛值理论计算,论证了 TE 板 BTC 回路动作门槛值、TE 板异常个数、交流电压与单个换流阀(78 个晶闸管)导通之间的关系,通过 EMTDC 仿真软件模拟部分 TE 板 BTC 动作门槛值下降的情况,得到了天广直流四次换流阀异常导通中不同故障特征的波形,与现场波形较为相似。仿真结果表明,即使部分阀片 TE 板表面较为清洁,其余 TE 板表面积污严重,在潮湿环境下也可以导致换流阀异常导通。

参考文献

- [1] 尚金城, 苟锐锋, 李宾宾, 等. 岷泗直流工程调试中的特殊技术问题及解决方法[J]. 高压电器, 2003, 39(1): 1-3.
SHANG Jincheng, GOU Ruifeng, LI Binbin, et al. Special technical problems in commissioning of Shengsi HVDC Project and their solutions[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1): 1-3.
- [2] CEPEK M, KRISHNAYYA C P. Thyristor aging[C] // International Conference on Power System Technology, 1998, 1: 649-653.
- [3] 凌云, 郭焕. 葛洲坝换流站极 II 换流阀故障分析[J]. 华中电力, 2010, 23(6): 57-60.
LING Yun, GUO Huan. Fault analysis of pole II thyristor valves in Gezhouba converter station[J]. Central China Electric Power, 2010, 23(6): 57-60.
- [4] 郭启伟, 赵建国, 牛林, 等. 银东±660 kV 直流系统故障的动态特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 133-139.
GUO Qiwei, ZHAO Jianguo, NIU Lin, et al. Fault simulation of dynamic characteristics about ±660 kV Yindong HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 133-139.
- [5] 张俊, 李跃婷. 直流输电工程换流阀控制系统对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 146-149.
ZHANG Jun, LI Yueting. Relative analysis for valve control system in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 146-149.
- [6] 姚其新, 张侃君, 韩情涛, 等. 龙泉换流站直流控制保护系统运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 142-147.
YAO Qixin, ZHANG Kanjun, HAN Qingtao, et al. Operation analysis of Longquan converter station HVDC control and protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 142-147.
- [7] 高冲, 温家良, 于坤山. 反向恢复电荷分散性对直流换流阀的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 1-5.
GAO Chong, WEN Jialiang, YU Kunshan. Influence of thyristor reverse recovery charge dispersity on HVDC valves[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 1-5.
- [8] 张俊, 李跃婷. 直流输电工程换流阀控制系统对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 146-149.
ZHANG Jun, LI Yueting. Relative analysis for valve control system in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 146-149.
- [9] 贺之渊, 汤广福, 邓占锋, 等. TSC 高压晶闸管阀过电流失效机理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 23-28.
HE Zhiyuan, TANG Guangfu, DENG Zhanfeng, et al. Study on the failure mechanism of TSC high voltage thyristor valve over-current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 23-28.
- [10] 郭焕, 汤广福, 于海玉, 等. 高压直流输电晶闸管阀开通的电流应力分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 1-7.
GUO Huan, TANG Guangfu, YU Haiyu, et al. Analysis of the turn-on current stress on HVDC thyristor valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 1-7.
- [10] 郭焕, 温家良, 汤广福, 等. 高压直流输电晶闸管阀关断的电压应力分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 1-6.
GUO Huan, WEN Jialiang, TANG Guangfu, et al. Analysis of the turn-off voltage stress on HVDC thyristor valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 1-6.
- [11] 杨鹏, 杨景, 王亮. 宁东-山东±660 kV 直流输电工程解锁逻辑研究[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 90-93.
YANG Peng, YANG Jing, WANG Liang. Deblock logic for ±660 kV DC power transmission project from Ningdong to Shandong[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 90-93.
- [12] 金鑫. 高压直流输电系统极控信号通信网络可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 110-116.
JIN Xin. Reliability analysis on HVDC pole control signal transmission network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 110-116.
- [13] 张朝辉, 余海翔, 梁秉岗, 等. 高压直流输电换流阀阀基电子设备薄弱环节分析及改进措施研究[J]. 电工技术, 2015(6): 61-63.
- [14] 赵冬一, 胡淑慧, 王坤, 等. 800 kV 特高压直流换流阀避雷器的工况分析及其关键技术的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 103-109.
ZHAO Dongyi, HU Shuhui, WANG Kun, et al. Operating condition analysis of ±800 kV UHVDC converter valve surge arrester and its key technology study[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 103-109.

收稿日期: 2016-02-25; 修回日期: 2016-06-23

作者简介:

黄义隆(1989-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电控制保护; E-mail: sw.hyl@163.com

陈欢(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压直流输电控制保护; E-mail: chcsq@139.com

国建宝(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电控制保护。E-mail: gjb104@163.com

(编辑 姜新丽)