

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190799

## 直流输电换流阀晶闸管过电压保护研究

王振<sup>1</sup>, 任孟干<sup>2</sup>, 国建宝<sup>1</sup>, 张蕴馨<sup>2</sup>, 周亮<sup>2</sup>, 刘道民<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修中心, 广东 广州 510663; 2. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 晶闸管承受过电压的能力较弱, 瞬时过电压可导致晶闸管的击穿。首先研究了直流输电核心设备之一晶闸管换流阀发生晶闸管过电压击穿对直流输电系统的影响, 分析了直流输电换流阀晶闸管配置过电压保护的必要性。然后对 BTC 和 BOD 两种晶闸管过电压保护方式进行了理论计算与分析, 并采用 PSPICE 软件搭建了仿真模型进行仿真分析。最后在实验室搭建实验电路对两种过电压保护电路性能进行了验证。研究表明两种保护方式均可以实现晶闸管过电压保护的要求。

**关键词:** 晶闸管; 过电压保护; BOD; BTC; 仿真模型

### Research on overvoltage protection of a thyristor on DC converter valves

WANG Zhen<sup>1</sup>, REN Menggan<sup>2</sup>, GUO Jianbao<sup>1</sup>, ZHANG Yunxin<sup>2</sup>, ZHOU Liang<sup>2</sup>, LIU Daomin<sup>2</sup>

(1. Maintenance & Test Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China;  
2. C-EPRI Electrical Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** The ability of a thyristor to withstand overvoltage is weak, and transient overvoltage can cause the breakdown of the thyristor. The thyristor is one of the core devices of DC transmission. First, this paper analyzes the influence of thyristor overvoltage breakdown on the DC transmission system and the necessity of configuring thyristor overvoltage protection on the DC converter valve. Second, BTC and BOD thyristor overvoltage protection methods are calculated and analyzed theoretically, and a simulation model is built by PSPICE software for analysis. Finally, an experimental circuit is built in the laboratory to test the performance of two overvoltage protection circuits. Studies show that both protection methods can achieve the requirements of thyristor overvoltage protection.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. CGYKJXM 20160082).

**Key words:** thyristor; overvoltage protection; BOD; BTC; simulation model

## 0 引言

高压直流输电具有输送容量大、损耗低等优点, 是我国实现能源优化配置的重要途径之一, 也是实现全球能源互联的关键环节之一<sup>[1-7]</sup>。我国已建成的特高压直流工程有锦屏-苏南直流输电工程、哈密-郑州直流输电工程、酒泉-湖南直流输电工程等, 目前还有数条在建的特高压直流工程。

换流阀是特高压直流输电的核心装备之一, 对直流输电系统运行稳定性具有重要意义。现有特高压直流输电工程均采用晶闸管换流阀<sup>[8-13]</sup>。晶闸管本身过压和过流能力差, 尤其是过压能力, 瞬时过

电压可能会导致晶闸管的永久性损坏, 而且换流阀更换晶闸管需要直流输电系统断电, 成本极高, 因此有必要对换流阀晶闸管采取必要的过电压保护措施, 以提高直流输电系统的稳定性与可靠性。

目前晶闸管过电压保护方式有电子式和 BOD 式两种。电子式晶闸管过电压保护方式采用二极管、三极管等电子元件实现对晶闸管的保护, 该保护方式可以通过调节电阻值实现过电压保护值的调节<sup>[14-18]</sup>; BOD(Break Over Diode)式过电压保护采用 BOD 器件、二极管、稳压管等元件实现, 其保护电压水平由 BOD 器件决定。

文献[16]对电子式过电压保护电路 BTC (Backup Trigger Circuit)的原理和组成进行了分析, 并研究了 BTC 电路中高压电容积污对直流输电晶

基金项目: 南方电网公司科技项目资助 (CGYKJXM20160082)

闸管过电压保护电路的影响。但并未对 BTC 触发电路理论进行计算,也未对 BTC 保护电路触发特性进行研究。文献[17-18]对 BOD 器件主要参数和选型方法进行了介绍,给出了 BOD 动作时晶闸管电压和门极电流波形,但未对 BOD 电路进行理论计算,也没有给出直流输电晶闸管换流阀保护电路的设计方法。

综上,本文首先从晶闸管过电压对直流输电系统的影响入手,给出了晶闸管换流阀过电压导致阀短路时对直流输电的影响,然后对 BTC 和 BOD 两种晶闸管过电压保护方式进行理论计算和仿真分析,最后采用实验的方法对 BTC 和 BOD 两种保护方式触发性能进行验证和对比。

## 1 晶闸管过电压击穿对输电系统影响

由于晶闸管器件自身耐受过电压和过电流能力较弱,当晶闸管承受过电压时,晶闸管电压将被击穿,击穿后晶闸管正反向均丧失阻断能力。

在直流输电换流阀中,一个桥臂上的晶闸管采用串联方式连接,部分晶闸管过电压击穿后,将导致其余晶闸管耐受电压增高。当晶闸管击穿数量大于设计裕量后,将导致所有晶闸管均被过电压击穿,从而导致换流阀整个桥臂丧失正负压阻断能力,引起晶闸管的阀短路故障<sup>[19-22]</sup>。

阀短路故障是换流阀最严重的故障之一。为了研究阀短路故障对直流输电系统的影响,采用 PSCAD 搭建换如图 1 所示的 6 脉动流阀仿真模型,直流输电系统电压为 200 kV,电流为 4 500 A。

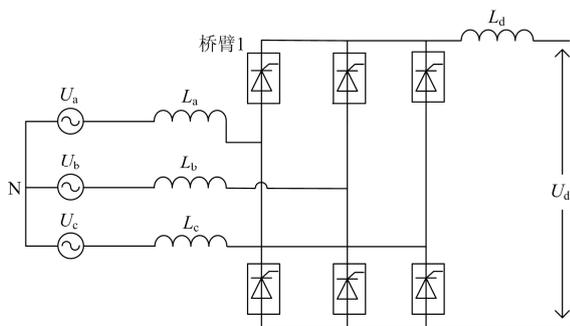
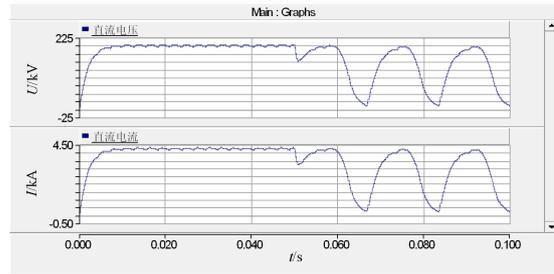


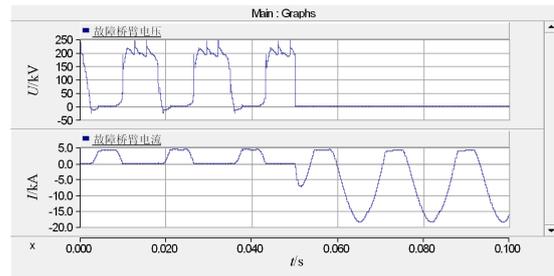
图 1 6 脉动换流阀仿真模型

Fig. 1 Simulation circuit of 6-pulse converter valve

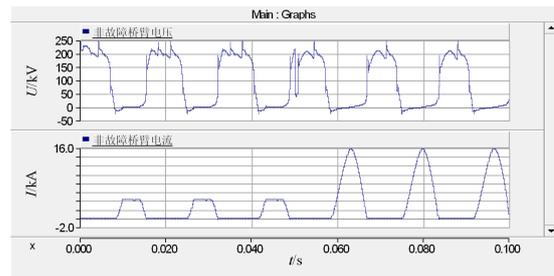
为了进一步对比换流阀短路故障对直流输电系统造成的影响,设置仿真条件为  $t=45$  ms 时,换流阀桥臂 1 发生桥臂短路,仿真得到故障前后直流系统电压电流、故障桥臂电压电流和非故障桥臂电压电流,如图 2 所示。



(a) 直流系统电压和电流



(b) 故障桥臂电压和电流



(c) 非故障桥臂电压和电流

图 2 换流阀仿真波形

Fig. 2 Simulation waves of converter valve

由仿真结果可知,换流阀一个桥臂发生短路故障时,直流系统电压和电流均发生故障,幅值在零到额定值间波动,非故障桥臂导通电流大幅度增加,约为正常触发时的 4 倍,将会造成非故障相桥臂晶闸管过流击穿,从而导致整个换流阀的损坏。因此,在晶闸管上施加过电压保护,对换流阀的可靠性具有重要意义。

## 2 BTC 保护

### 2.1 BTC 保护电路原理

BTC 回路由工作电源电路、触发电压电路、门极脉冲放大电路和光信号发射电路组成。BTC 保护电路原理框图及具体实现方法如图 3 所示。

BTC 保护各部分电路组成及功能如下:① 电源电路由  $C_{58}$ 、 $R_{120}$ 、 $R_{122}$ 、 $V_{84}$ 、 $V_{91}$  等元器件组成,用于产生 60 V 电压,该电压为门极脉冲放大电路、光信号发射电路提供所需的电能;② 触发电压电路

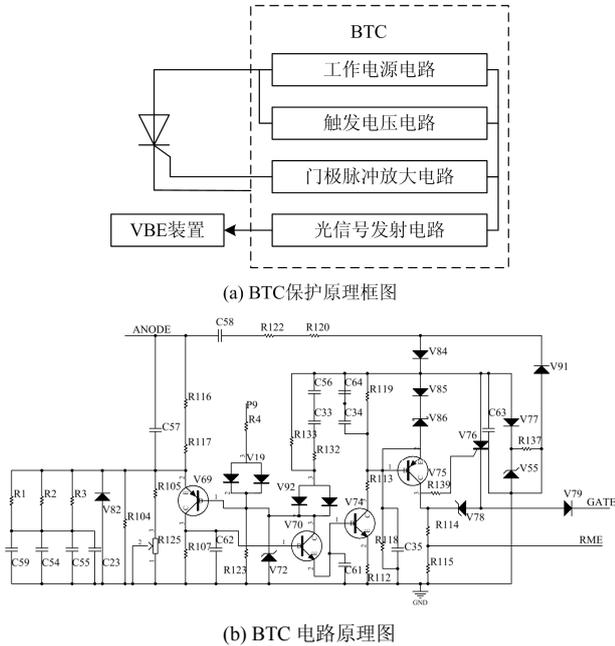


图 3 BTC 电路实现  
Fig. 3 Realization of BTC circuit

由  $C_{57}$ 、 $R_{116}$ 、 $R_{117}$ 、 $R_{105}$ 、 $R_{125}$ 、 $V_{72}$  等组成, 当晶闸管电压超过 BTC 保护水平时, 触发电压电路产生触发信号, 触发电压电路可以通过可调电阻  $R_{125}$  调节 BTC 保护的水平, 计算方法如式(1)所示; ③ 门极脉冲放大电路由  $V_{70}$ 、 $V_{74}$ 、 $V_{75}$ 、 $V_{76}$ 、 $V_{78}$ 、 $V_{79}$  等组成, 用于放大触发电压电路产生的触发信号并发送给晶闸管门极, BTC 保护动作时门极电流取决于晶闸管的门极电阻大小, 晶闸管门极电流约为触发电压与门极电阻的比值; ④ 光信号发射电路由  $R_{21}$ 、 $R_{27}$ 、 $R_{115}$  等组成, 用于产生 BTC 保护光回报信号, 并发送到阀基电子设备(VBE, Valve-Based Electronic)。

$$V = \frac{R_{116} + R_{117} + R_{105} + R_{125}}{R_{105} + R_{125}} (V_{69SE} + V_{72\text{稳压值}}) \quad (1)$$

BTC 保护电路电容  $C_{57}$  和  $C_{58}$  两端电压等于晶闸管两端电压,  $C_{57}$  和  $C_{58}$  为超高压电容, 为直插式封装, 且因电容两端电压较高, 会导致板卡及元件积污, 天广直流工程在 2014 年—2015 年因该原因导致 BTC 电路误导通<sup>[23-25]</sup>, 从而引起换流阀异常导通事件。  $R_{116}$ 、 $R_{117}$  两端电压约为晶闸管两端电压, 从而导致电阻温升较高, 不利于晶闸管触发监测板卡整体的稳定性和可靠性。

### 2.2 BTC 保护仿真

采用 PSPICE 对 BTC 保护电路搭建仿真电路, 为便于 BTC 保护和 BOD 保护性能对比, 仿真中设置 BTC 保护动作值为 6 kV, 此时可调电阻  $R$  为 185  $\Omega$ 。仿真得到晶闸管过电压时, BTC 电路工作

特性, 图 4 为晶闸管过电压时, 晶闸管门极电流。

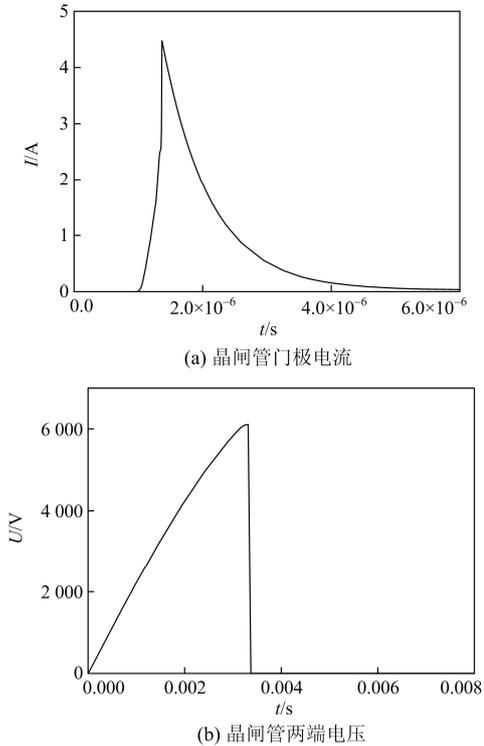


图 4 晶闸管门极电流与晶闸管电压

Fig. 4 Thyristor gate current and thyristor voltage

由仿真结果可知, 晶闸管门极电流峰值约为 4.5 A, 脉宽为 2  $\mu\text{s}$ 。

## 3 BOD 保护

### 3.1 BOD 器件原理介绍

BOD 又称为转折二极管, 是一种具有四层结构的晶闸管, 其结构图和伏安特性如图 5 所示。

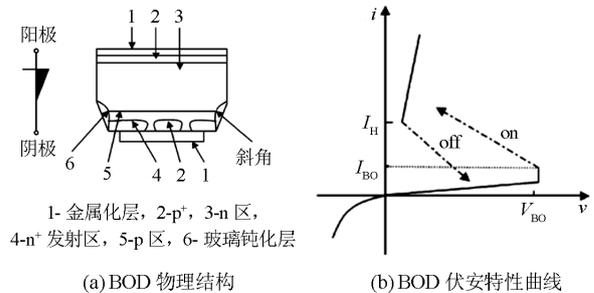


图 5 BOD 结构及特性曲线

Fig. 5 Physical structure and characteristic waves of BOD

BOD 从击穿到完全导通约需要 3~5  $\mu\text{s}$ , 由于 BOD 阴极采用了  $p^+$ 短路扩散的发射极结构, 因而获得了很高的  $dv/dt$ , 由于其结构的非对称性, 导致其反向耐压低(一般低于 10 V), 因此需要串联二极管以承受反向电压。根据 BOD 伏安特性曲线可知,

当 BOD 器件两端电压大于  $V_{BO}$  时, BOD 被击穿导通,  $V_{BO}$  即为 BOD 的保护电压。  $I_{BO}$  为 BOD 器件的转折电流,  $I_H$  为维持电流, 当流过 BOD 的电流低于  $I_H$  时, BOD 器件关断。

### 3.2 BOD 保护电路原理

设计直流输电晶闸管 BOD 保护电路如图 6 所示, BOD 器件采用 IXBOD1-30RD, 该器件转折电压  $V_{BO}$  为 3 kV, 转折电流  $I_{BO}$  为 15 mA, 维持电流为 30 mA。 IXBOD1-30RD 器件内置一个快恢复二极管承受反向电压, 因此无需外部再接承受反向电压的二极管。

BOD 保护电路动作时晶闸管门极电流取决于限流电阻  $R_{210}$ 、 $R_{211}$ 、 $R_{212}$ 、 $R_{213}$  和晶闸管门极电阻大小, 可以通过调节电阻大小改变晶闸管门极电流。理论上晶闸管门极导通电流幅值计算如式(2)。

$$I = \frac{V_{BO}}{R + R_G} \quad (2)$$

式中:  $V_{BO}$  为 BOD 器件保护电压;  $R$  为与 BOD 器件串联的电阻;  $R_G$  为晶闸管门极电阻。

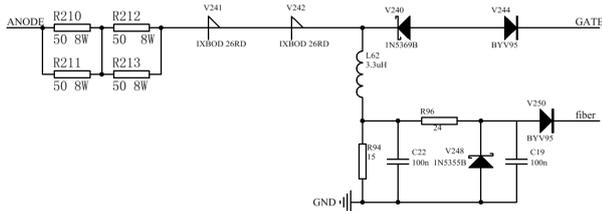


图 6 BOD 电路原理图

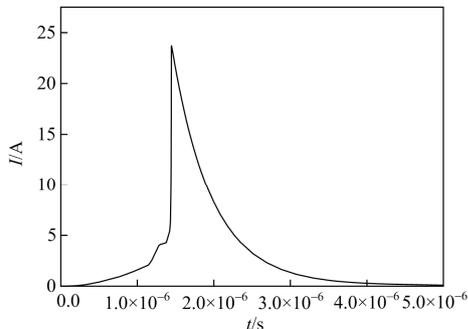
Fig. 6 Schematic of BOD circuit

图 6 所示电路, 当晶闸管门极电阻为  $10 \Omega$  时, 理论上晶闸管门极电流  $I$  为 100 A。

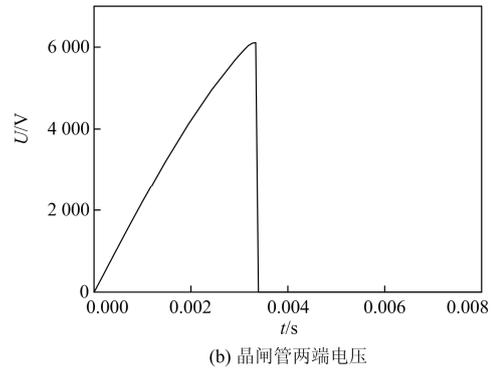
### 3.3 BOD 保护仿真

采用 PSPICE 搭建 BOD 保护仿真电路, 仿真得到 BOD 保护动作时晶闸管门极电流如图 7 所示。

由仿真结果可知, 晶闸管门极电流最大值为 24.7 A, 导通时间为  $1.8 \mu s$ , 仿真结果远小于理论计算结果, 是因为晶闸管导通时间  $1.8 \mu s$  小于 BOD 器



(a) 晶闸管门极电流



(b) 晶闸管两端电压

图 7 晶闸管门极电流与晶闸管电压

Fig. 7 Thyristor gate current and thyristor voltage

件完全导通需要的  $3 \sim 5 \mu s$ , 因此晶闸管导通时, BOD 器件未完全导通, BOD 器件仍承受部分电压, 驱动电阻和晶闸管门极电阻上承受的电压小于  $V_{BO}$ , 因此晶闸管门极电流要小于理论计算值。

## 4 实验

### 4.1 实验原理

为了进一步验证 BTC 保护和 BOD 保护对晶闸管的保护性能, 设计如图 8 所示的实验进行验证。

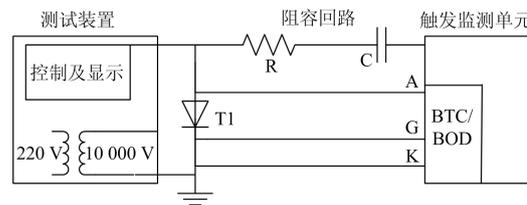


图 8 实验线路图

Fig. 8 Experimental circuit diagram

测试使用的晶闸管 T1 参数为 7.2 kV/4 500 A, 门极电阻为  $10 \Omega$ 。参考现有直流工程阻容回路参数, 试验中选取阻容回路参数为: 电阻  $45 \Omega$ , 电容  $1.6 \mu F$ 。测试装置可以通过控制器调节输出电压的幅值及上升沿, 试验中设置输出电压最大值为 7 kV, 电压上升时间为  $100 \mu s$ , 试验中测试 BTC 及 BOD 保护动作时晶闸管两端电压及门极电流。

### 4.2 试验结果

BTC 回路测试结果如图 9 所示, 示波器 CH1 为晶闸管两端电压, CH3 为晶闸管门极电流。由测试结果可知, 晶闸管导通电压为 6.1 kV, 门极电流峰值约 3 A, 导通时间约为  $2.2 \mu s$ , 即晶闸管出现过电压后  $2.2 \mu s$  左右开通晶闸管得到保护。

BOD 回路测试结果如图 10 所示, 示波器 CH1 为晶闸管两端电压, CH3 为晶闸管门极电流。由测试结果可知, 晶闸管导通电压为 6.1 kV, 门极电流

峰值约为 22.7 A，导通时间约为 1.6 μs，即晶闸管出现过压后 1.6 μs 左右开通得到保护。

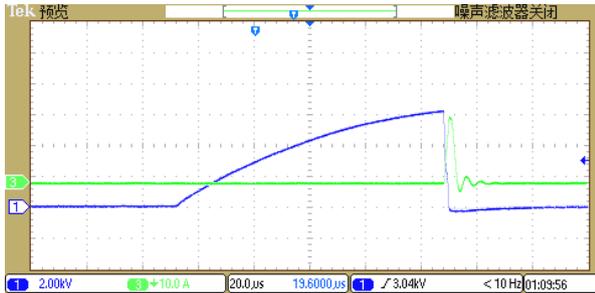


图 9 BTC 保护动作电压和电流

Fig. 9 Voltage and current of BTC protection action



图 10 BOD 保护动作电压和电流

Fig. 10 Voltage and current of BOD protection action

### 4.3 实验分析

根据实验结果及理论分析：

- 1) BTC 保护电路和 BOD 保护电路动作值均符合晶闸管过电压保护的要求；
- 2) BTC 和 BOD 试验测试结果和仿真结果一致；
- 3) BOD 保护动作速度略快于 BTC 动作速度，BOD 保护动作速度比 BTC 动作速度快约 0.6 μs；
- 4) BOD 保护动作时晶闸管门极电流大于 BTC 保护动作时晶闸管门极电流。

### 5 结论

本文采用理论计算、仿真分析和实验验证的方法，对两种晶闸管过电压保护电路进行了研究。研究表明，BTC 和 BOD 两种过电压保护电路均能满足晶闸管过电压保护的要求，但两者工作特性略有区别：

BTC 电路晶闸管电压保护水平可调节，可以在不改变硬件电路前提下，实现晶闸管不同保护电压间的切换。但 BTC 电路晶闸管门极触发电流取决于晶闸管门极电阻大小，BTC 电路本身无法实现对门极触发电流幅值的调节。

BOD 电路动作速度略快于 BTC 电路。BOD 电路在不改变 BOD 器件型号时，晶闸管过电压保护

水平不可调节，但可以通过在 BOD 回路中串入电阻方法来调节晶闸管门极触发电流大小。

### 参考文献

- [1] 董希建, 罗剑波, 李雪明, 等. 交直流混联受端电网频率紧急协调控制技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 59-66.  
DONG Xijian, LUO Jianbo, LI Xueming, et al. Research and application of frequency emergency coordination and control technology in hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 59-66.
- [2] 齐国强, 王增平, 裘愉涛, 等. 基于信号复杂度衰减的特高压直流输电线路雷电暂态识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 1-8.  
QI Guoqiang, WANG Zengping, QIU Yutao, et al. Transient identification method of lightning strokes based on the attenuation of signal complexity for UHVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 1-8.
- [3] 谭阳琛, 刘畅, 李程昊, 等. 基于ADPSS 的特高压直流输电控制保护系统开放式建模[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 99-108.  
TAN Yangchen, LIU Chang, LI Chenghao, et al. Transient identification method of lightning strokes based on the attenuation of signal complexity for UHVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 99-108.
- [4] 刘振亚. 特高压直流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [5] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点和工程应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 5-6.  
LI Licheng. Technical characteristics and engineering application of HVDC power transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 5-6.
- [7] 朱韬析, 汲广, 毛海鹏. 天广直流输电系统2007年运行情况总结分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 129-133, 145.  
ZHU Taoxi, JI Guang, MAO Haipeng. Summary on operation of Tian-Guang HVDC transmission system in 2007[J]. Electric Power, 2009, 37(22): 129-133, 145.
- [8] 王维庆, 刘俊勇, 王海云, 等. HVDC 换流阀故障特性分析及直流侧100 Hz谐波波计算方法研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 33-38.  
WANG Weiqing, LIU Junyong, WANG Haiyun, et al. Analysis of HVDC valve fault characteristics and study of DC-side 100 Hz harmonic calculation method[J]. High

- Voltage Engineering, 2016, 42(1): 33-38.
- [9] LAWATSCH H M, VITINS J. Protection of thyristor against over voltage with break over diode[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 24: 444-448.
- [10] MILLERET T J E. Reactive power control in electric power system[M]. New York: John Wiley and Sons, 1982.
- [11] 袁云清. HVDC换流阀及其触发与在线监测系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [12] JAECKLIN A, LAWATSCH H. A high speed thyristor with optimum turn-on behavior[J]. Brown Boveri Rev, 1979, 66: 11-16.
- [13] 郑涛, 祁欢欢, 范莹. 基于阀短路保护的HVDC换流器区内故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 99-104.  
ZHENG Tao, QI Huanhuan, FAN Ying. A new valve short-circuit protection based method for identifying fault locations in HVDC converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 99-104.
- [14] 查鲲鹏, 汤广福, 温家良, 等. 晶闸管阀运行试验的过电压保护策略研究[J]. 电力电子技术, 2006, 40(3): 107-109.  
ZHA Kunpeng, TANG Guangfu, WEN Jialiang, et al. Study of overvoltage protection strategy of the thyristor valve operational test[J]. Power Electronics, 2006, 40(3): 107-109.
- [15] 贺之渊, 邓占锋, 查鲲鹏, 等. 采用击穿二极管触发晶闸管阀的过电流试验装置的新型过电压保护方式[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 5-9, 36.  
HE Zhiyuan, DENG Zhanfeng, ZHA Kunpeng, et al. Anovel overvoltage protection approach using thyristor valve triggered by breakdown diode for overcurrent test equipment[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 5-9, 36.
- [16] 王振, 钱海, 周尚礼, 等. 天广直流工程换流阀异常导通原因分析及对策[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2154-2160.  
WANG Zhen, QIAN Hai, ZHOU Shangli, et al. Cause analysis and countermeasures for the abnormal conduction of converter valve in Tian-Guang HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2154-2160.
- [17] 邢金伟, 王瑞舰, 王国强. TCR型SVC中BOD在晶闸管过电压保护的应用. 变频器世界, 2010, 32(8): 63-65.  
XING Jinwei, WANG Ruijian, WANG Guoqiang. Application of BOD for the TCR type SVC in thyristor overvoltage protection[J]. The World of Inverters, 2010, 32(8): 63-65.
- [18] 蓝元良, 汤广福, 张皎, 等. BOD在晶闸管过电压保护中的应用研究[J]. 电工电能新技术, 2000, 29(3): 51-54.  
LAN Yuanliang, TANG Guangfu, ZHANG Jiao, et al. Study of BOD's application in thyristor protection against overvoltage[J]. Technology of Electrical Engineering and Energy, 2000, 29(3): 51-54.
- [19] 刘琦, 刘飞超, 王潇, 等. 晶闸管换流阀TCU取能电路工作特性分析[J]. 电力电子技术, 2018, 52(7): 79-81, 87.  
LIU Qi, LIU Feichao, WANG Xiao, et al. Characteristic analysis on TCU energy storage circuit of thyristor converter valves[J]. Power Electronics, 2018, 52(7): 71-81, 87.
- [20] 孙文革. IGBT与晶闸管在大功率斩波电路中的性能比[J]. 微处理机, 2014, 35(4): 26-29.  
SUN Wenge. Performance comparison of IGBT and SCR used in large scale chopper circuit[J]. Microprocessors, 2014, 35(4): 26-29.
- [21] 王兆安. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [22] 刘春雅. 电力电子器件仿真模型设计及测试研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015, 26(5): 65-67.  
LIU Chunya. The research of simulation model and test for the power electronic device[J]. Automation & Instrumentation, 2015, 26(5): 65-67.
- [23] ABB Switzerland Ltd. Gate drive recommendation for phase control and bi-directionally controlled thyristors[R]. Ludvika, Sweden: ABB Power System, 2013.
- [24] 王振, 刘坤, 鞠伟. 高压直流输电工程电触发换流阀TE板烧毁机理研究[J/OL]. 中国电力: 1-10[2020-01-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20190705.1340.016.html>.  
WANG Zhen, LIU Kun, JU Wei. Study on burnout mechanism of TE board for HVDC transmission project electric triggered converter valve[J]. Electric Power: 1-10 [2020-01-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20190705.1340.016.html>.
- [25] 周亮, 张蕴馨, 林志光, 等. 交流系统故障下高压直流输电晶闸管触发监测单元储能方式[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 160-165.  
ZHOU Liang, ZHANG Yunxin, LIN Zhiguang, et al. Energy storage method of thyristor triggering and monitoring unit for HVDC transmission system with fault of AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 160-165.

收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2020-01-08

作者简介:

王 振(1979—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为高压直流输电技术. E-mail: wangzhen7910@163.com

(编辑 葛艳娜)