

过电流导致的 HVDC 换流阀失效机制研究

解婷¹, 查鲲鹏², 汤广福², 郑健超², 李彬³

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 3. 大唐三门峡华阳发电有限责任公司, 河南省 三门峡市 472143)

Study on Failure Mechanism of HVDC Valves Caused by Overcurrent in UHVDC Power Transmission Devices

XIE Ting¹, ZHA Kunpeng², TANG Guangfu², ZHENG Jianchao², LI Bin³

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

3. Sanmenxia Huayang Datang Power Generation Co., Ltd., Sanmenxia 472143, Henan Province, China)

ABSTRACT: To ensure reliability of UHVDC power transmission devices research on equivalent mechanism, it is necessary to research the failure mechanism of HVDC converter valves caused by overcurrent. The structure of HVDC converter valve and the overcurrent caused by short circuit in bridge arm and converter's external components are analyzed. The expansion process of various failure conditions of different components of HVDC converter valve is analyzed, such as failures of thyristor firing and turn-off and so on, then the failure mechanism due to different faults of converter valve caused by overcurrent at different stages is determined.

KEY WORDS: HVDC valve; overcurrent; failure mechanism

摘要: 为保障特高压直流输电装置的可靠性, 有必要研究 HVDC 换流阀的失效机制。分析了 HVDC 换流阀的结构、桥臂及换流器外部短路引起过电流的情况, 讨论了 HVDC 换流阀部件各种失效情况(如晶闸管开通失效、晶闸管关断失效等)的发展过程, 确定了过电流引起故障导致换流阀失效的机制。

关键词: HVDC 换流阀; 过电流; 失效机制

0 引言

随着我国电网输电能力的扩大和特高压直流输电工程的实施^[1], 特高压直流输电能力得到了长足发展。由于±800 kV 特高压直流工程尚无实际运行经验, 因电压升高引起的过电流和过电压带来的损失和系统干扰问题将很严重^[2-5], 为此需研究特高压直流输电装置在各种运行条件尤其是故障条件

下的应力和失效机制^[6]。基于此, 本文将分析特高压直流换流站的核心装置换流阀因过电流导致失效的机制, 为特高压直流输电装置研制提供理论依据。

1 HVDC 换流阀结构

HVDC 换流阀单阀由若干个阀段组成, 每个阀段一般又由若干个串联晶闸管(PNP 型)层、阳极饱和电抗器和均压电容等组成, 而晶闸管层又由晶闸管元件、散热器和阻尼回路等组成, 如图 1 所示。阀段为能够代表单阀电气特性的最小单元, 在直流换流阀设计中通常将 2 个阀段组成一个阀组件。由于流经晶闸管的直流电流很大, 每个晶闸管两端均安装有散热器, 以强制冷却换流阀, 冷却方式一般为水冷, 内冷回路有并联、串联和串并联混合 3 种形式。晶闸管层两端的均压网络可使串联晶闸管的电压均匀分布, 为了保证阀内串联连接晶闸管开通的一致性, 所有晶闸管必须同时接收来自阀控的触发信号。晶闸管电子电路可将光信号转换成触发脉

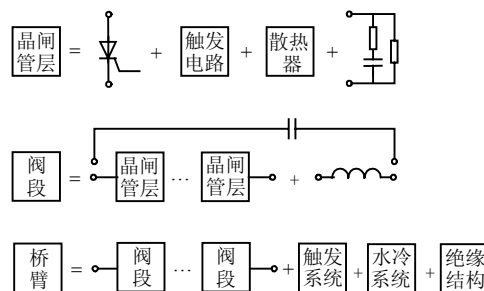


图 1 HVDC 换流阀电气结构

Fig. 1 Power configuration of HVDC valve

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677064)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677064).

冲,通常晶闸管电子电路还包含多种保护电路(如过电压保护、反向恢复保护等)。

串联晶闸管为换流阀核心元件,如图2所示。晶闸管导通时,正电压加于P₁区即阳极上,PN结J₁和J₃承受正向电压,J₂则承受反向电压。

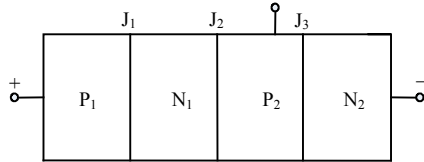


图2 晶闸管结构

Fig. 2 Configuration of thyristor

2 HVDC 换流阀过电流

因故障引起的 HVDC 换流阀过电流分为 2 种:

- 1) 短路电流幅值大,起始陡度较小,持续时间长;
- 2) 短路电流幅值较小,起始陡度大,持续时间长。

第 1 种过电流由桥臂短路故障引起,该故障由 HVDC 换流阀内部及外部的绝缘损坏或者短接引起,该故障时的过电流峰值主要取决于换相电抗的大小和发生故障时刻的相位。在导通-阻断瞬间发生内部短路时引起的故障电流最大,因此桥臂短路引起的故障电流被认为是最严重的过电流情况。故障电流因控制触发方式的不同可形成单次波与多次波故障电流。

六脉动桥如图 3 所示。

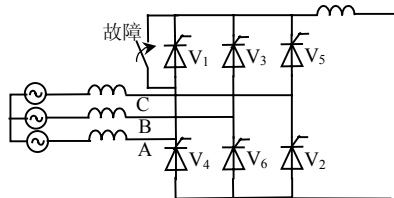
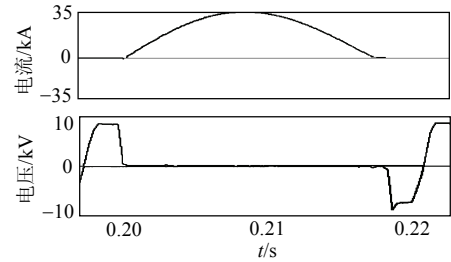


图3 六脉动桥

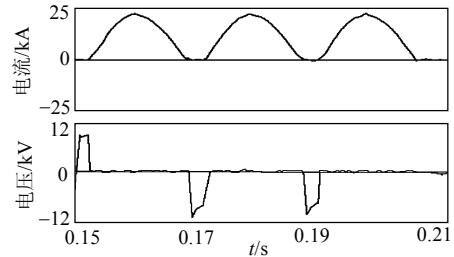
Fig. 3 Six-pulse bridge

由图 3 可知,单次波故障电流发展过程为:V₁ 向 V₃ 换向完成后,由于 V₁ 阀短路,A、B 两相短路继续存在,当 $\omega t = 90^\circ$ 时(以 V₃ 阀同步过零点为计时起点),V₄ 开始承受正向电压而导通,即由 V₂ 向 V₄ 换向,此时 V₁、V₂、V₃、V₄ 阀的导通形成了三相短路。当 V₂ 向 V₄ 换向完成后,闭锁触发脉冲,V₅、V₆ 不再导通,而 V₁、V₄ 阀形成了旁通对,并流过直流侧电流。交流侧继续 A、B 两相短路过程,当 V₃ 阀的短路电流过零时,V₃ 开始承受系统的交流电压。单次波故障电流如图 4(a)所示。

多波次故障电流的第 1 次波与单波次故障电流的发展过程一致。当 V₃ 阀承受正向电压时,其被触发导通,形成 A、B 两相短路,两相短路电流即



(a) 单波次故障



(b) 多波次故障

图4 单波次故障及多波次故障电压和电流

Fig. 4 Voltage and current in one-loop fault and multi-loop fault

第 2 个波次的故障电流。当 V₃ 电流过零后,V₃ 承受逐渐增大的负压,但电压正向过零时,V₃ 阀再次导通,流过第 3 个波次的故障电流。多波次故障电压、电流如图 4(b)所示。

第 2 种过电流由换流器外部短路(即直流电抗器阀侧短路或线路短路)引起,外部短路过程中 6 个阀均保持单向导电性,由于公共阻抗和分支阻抗的不同,形成的短路电流差异也较大。

3 换流阀失效分析

3.1 晶闸管开通失效

如图 3 所示,设 V₁ 发生短路故障,令 V₁ 电压过零点时刻为 $\omega t = 0$,六脉动桥中交流电势 $e_{ab} = \sqrt{2}E \sin \omega t$,E 为线电势有效值。

在 ωt 自某角度 α 变至 90° 期间,V₃ 阀开始导通,形成 A、B 相短路。电流变化率为

$$\frac{di}{dt} = \frac{\sqrt{2}E \sin \omega t}{2L_t}$$

式中 L_t 为图 3 中交流系统每相(从电源到六脉动桥的交流端)等值电感。

故障时电流上升率主要取决于触发角和系统电压,特高压工程中系统电压上升幅度很大,因此电流变化率会升高,在开通阶段的失效概率会增加。

晶闸管触发瞬间,门级电流接通后发射极电流会出现分布不均匀的情况,随着与发射极边界距离的增大,发射极电流急剧减少。因此开始时晶闸管

只在十分之几 mm 宽的很窄边界范围内触发,紧接着电流导通范围扩大到整个阴极。触发过程的扩展是由离子的扩散与漂移相互作用而成,扩散过程中载流子沿着最大梯度方向移动,漂移过程是由开通部分电场强度高于其他部分电场强度而引起的载流子的移动。

在触发扩展期间,晶闸管通过电流相当于稳定的通态电流,即通过电流很大,但扩散过程较慢,这会导致晶闸管中电流密度过高^[7],产生的损耗功率在晶闸管的 2 个基区中转化为热量。由于硅的比热和热传导率都很小,因此只有少量热量传出去,从而晶闸管温度会迅速上升,进而导致晶闸管损坏。

3.2 晶闸管温升失效

晶闸管导通过程中,通过的大电流会在晶闸管内部产生很高的热量,晶闸管结温会上升,结温过高会导致晶闸管元件的正常工作状况被破坏。

整个通态过程中的功率损耗为

$$P_d = v_d(t)i(t)$$

式中: $v_d(t)$ 为晶闸管导通过程中的通态压降; $i(t)$ 为故障电流,在单波次以及多波次故障电流中,可近似看作正弦电流。

晶闸管元件传热是导热、对流、辐射 3 种不同热传递方式的综合。图 5 为晶闸管的热传递简化模型,其中 R 为热阻, C 为热容^[8]。

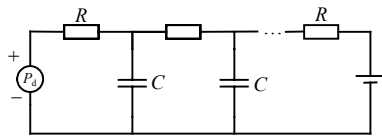


图 5 晶闸管热传递模型

Fig. 5 Heat transfer model of thyristor

稳态散热可忽略热容的影响,散热电路可简化为由纯热阻构成。由于故障电流存在时间很短(仅为 18 ms),不能用通常的稳态热阻来分析结温升高情况,因此采用瞬态热阻来计算晶闸管结温^[9]。

$$\Delta T(t) = \int_0^t \frac{d[S(\tau)R_{th}(\tau)]}{d\tau} \frac{P_d(t-\tau)}{S(t-\tau)} d\tau$$

$$R_{th}(t) = \frac{2\sqrt{t}}{S(t)\sqrt{\pi\rho Kc}}$$

式中: $\Delta T(t)$ 为温度变化值(换流阀晶闸管的初始温度由外界条件决定); $S(t)$ 为开通区域的面积; $R_{th}(t)$ 为瞬态热阻; c 为硅的比热容; ρ 为硅的密度; K 为硅的热导率。

在过电流情况下,晶闸管在短时间内通过一个

幅值为正常通态电流十几倍的大电流将产生大量的损耗,温度迅速上升。当温度达到临界值时,因热产生的载流子将超过注入载流子,进而会产生热反馈,即某处流过的电流越多该处就越热,热阻也就越低,从而会承担更多的电流,温度也将进一步升高,最终损坏晶闸管。

3.3 阻尼回路损耗失效

阻尼电容充放电电流以及反向恢复过程中的电流会流经晶闸管并联的阻尼电阻,从而在阻尼电阻上产生能量损耗。换流阀关断过程中,电流下降为 0 时,晶闸管以及阻尼回路中还存在剩余载流子。由于换流阀两端存在反相电压,很短时间内换流阀内将存在一个相当大的反向恢复电流。换流阀由晶闸管串联形成,各元件的剩余载流子数量有所差别,因而会产生反向恢复电荷形成的电压增量 ΔU 。过电流时,由于电流变化率 di/dt 和结温的升高, ΔU 和通过阻尼电阻的电流会增加,阻尼电阻的瞬时功率会增大^[10],易造成阻尼电阻损坏,从而导致换流阀失效。

3.4 换流阀关断失效

反向过冲时,电压变化率 du/dt 很高,这可能造成正向晶闸管的误导通。晶闸管正向阻断时 J_2 结反偏置,空间电荷层形成结电容 C_d 。反向过冲时,由于 J_2 结中有位移电流流过,这使晶闸管 2 个等效晶体管的放大系数增大,最终可能导致晶闸管误导通。同时,阳极电压过高时,漏电流雪崩效应会导致晶闸管导通,此时其导通区域往往不在门极结构的限制范围内,很容易在局部形成过热点而最终造成器件失效^[11]。

3.5 单次波故障电流出现后换流阀加正向电压失效

当换流阀通过单次波故障电流后,换流阀承受正向电压,每个晶闸管均可看做门级开路、阳极加正向电压,此时图 2 中的 J_1 、 J_3 结正偏, J_2 结反偏,与普通 PN 结反向特性相似,流过很小的电流。但故障状态下,换流阀随后承受系统的交流电压,当电压升高超过“正向转折电压”(即 J_2 结的雪崩击穿电压)后, J_2 结发生雪崩倍增效应,在 J_2 的 PN 结区产生大量的电子和空穴,电子进入 N_1 区,空穴进入 P_2 区。进入 N_1 区的电子与由 P_1 区通过 J_1 结注入 N_1 区的空穴复合。同样,进入 P_2 区的空穴与由 N_2 区通过 J_3 结注入 P_2 区的电子复合。雪崩击穿后,进入 N_1 区的电子与进入 P_2 区的空穴各自不能全部

复合掉。因此 N_1 区有电子积累, P_2 区有空穴积累, 则 P_2 区的电位升高, N_1 区的电位下降, J_2 结变为正偏, 只要电流稍有增加, 晶闸管两端电压便会迅速下降, 即出现所谓负阻特性, 从而导致晶闸管误导通。

3.6 多次波故障电流出现后换流阀承受第 2 波次负压失效

图 6 给出了晶闸管反向电压、结温、反向恢复电流间关系^[12-13], I 为反向恢复电流。由图 6 可知, 随着晶闸管结温的升高, 反向恢复电流逐渐增大, 晶闸管承受反向电压的能力上升到一定值之后迅速下降。换流阀承受多次波故障电流后, 阻断阶段可以看做晶闸管门极开路, 阳极承受反向电压, J_2 结正偏, J_1 、 J_3 结反偏。晶闸管内只流过很小的反向饱和电流, 由于故障电流 2 次通过晶闸管, 结温上升, 此时晶闸管再次承受反向电压。当电压进一步升高到 J_1 结的雪崩击穿电压后, J_3 结被击穿, 电流迅速增加。此后, 晶闸管会发生永久性反向击穿, 从而造成换流阀失效。

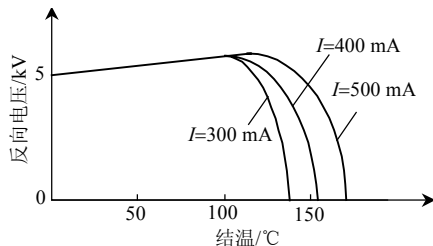


图 6 晶闸管反向电压、结温、反向恢复电流间关系
Fig. 6 Relations between reverse voltage, junction temperature and reverse recovery current of thyristor

3.7 晶闸管反向雪崩状态下的潜在失效

晶闸管反向连接时, J_1 、 J_3 结反偏, J_2 结正偏。由于 J_3 结两侧杂质浓度高(重掺杂区), 在较低电压下即可发生击穿, 承受电压能力弱, 电压几乎都加在 J_1 结上。当外加电压增加至 J_1 结雪崩击穿电压时, 注入 P_1 区的空穴因雪崩倍增, 并与阳极源源不断流入的电子复合^[14-15]。同时过电流流过晶闸管后, 结温会升至很高, 晶闸管因制造工艺会产生低密度的缺陷点, 该类点处的电流密度要高于 PN 结中其他点。当外加电压增加到使局部电荷倍增引起电压击穿时, 如果电流密度继续增大, 局部温度会高于本征温度, 从而造成自加热, 最终导致器件失效^[13]。

晶闸管反向连接可能导致穿通失效。穿通效应是指在外施电压的作用下, 空间电荷的展宽正好等于 N 基区的宽度, 此时 J_2 结穿通, 从而造成晶闸管击穿。

晶闸管的电压、电流特性均与结温直接相关。结温变化时, 晶闸管内部能带发生变化, 器件特性会随之变化, 有时甚至发生很大的变化。过电流流过晶闸管后, 晶闸管处于高结温状态, 反向穿通电压会大幅降低, 此时晶闸管更容易发生击穿^[16]。

4 结论

HVDC 换流阀在不同过电流情况下的电流、电压以及热应力是不同的, 但总体发展过程相似。晶闸管开通时电流变化率过大, 易造成晶闸管局部温度过高而失效。开通冲击电流以及连续过电流可造成阻尼回路功率损耗过大, 导致阻尼电阻损坏, 从而导致换流阀失效。换流阀关断过冲以及反向过电压也会对故障电流状态下的晶闸管造成损坏。本文分析了 HVDC 换流阀不同故障时的失效机制, 所得结论可为换流阀设计制造及运行试验提高参考。

参考文献

- [1] 卢强, 薛禹胜, 李立涅, 等. 第二届南方电网技术论坛主旨报告荟萃[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 128.
Lu Qiang, Xue Yusheng, Li Licheng, et al. The major report selection of the 2nd technique forum of Southern power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 128(in Chinese).
- [2] 汤广福. 2004 年国际大电网会议系列报道: 高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 125.
Tang Guangfu. A review of 2004 CIGRE on application status and perspective in HVDC and power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 125(in Chinese).
- [3] 周小谦. 我国“西电东送”的发展历史、规划和实现[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 126.
Zhou Xiaoqian. Development, planning and implementation of the project of power transmission from West China to East China [J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 126(in Chinese).
- [4] 周会高, 许钊, 黄超. 特高压直流输电换流阀运行试验合成回路研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 158-163.
Zhou Huigao, Xu Fan, Huang Chao. Research of synthetic test circuit for operational test of UHVDC thyristor valves[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 158-163(in Chinese).
- [5] 范建斌, 于永清, 刘泽洪, 等. ± 800 kV 特高压直流输电标准体系的建立[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 1-6.
Fan Jianbin, Yu Yongqing, Liu Zehong, et al. Introduction of ± 800 kV HVDC transmission standards system[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 1-6(in Chinese).
- [6] 贺之渊, 汤广福, 邓占锋, 等. 新型高压晶闸管阀过电流试验回路的建立[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 22-26.
He Zhiyuan, Tang Guangfu, Deng Zhanfeng, et al. A novel overcurrent test equipment for high voltage thyristor valves[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 22-26(in Chinese).
- [7] 温家良, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 高压晶闸管阀运行试验方法与试验装置的研究与开发[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 26-31.
Wen Jialiang, Tang Guangfu, Zha Kunpeng, et al. Operational test method of high voltage thyristor valves and development of its

- synthetic test equipment[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 26-31(in Chinese).
- [8] Adler M S, Temple V A K. The dynamics of the thyristor turn on process[J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1980, 27(2): 483-494.
- [9] 赵中原, 邱毓昌, 于永明, 等. 用晶闸管宏模型分析换流阀内电压分布特性[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 33-36.
Zhao Zhongyuan, Qiu Yuchang, Yu Yongming, et al. Analysis of voltage distribution in HVDC converter valve by macro-model of thyristor[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 33-36(in Chinese).
- [10] Tanabe S, Kobayashi S. Discussion of thyristor characteristic optimization for HVDC valves[J]. Electrical Engineering in Japan, 1999, 128(3): 43-52.
- [11] 汤广福, 贺之渊, 邓占锋. 基于器件物理特性的晶闸管阀串联机制系统化研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 39-44.
Tang Guangfu, He Zhiyuan, Deng Zhanfeng. Study on thyristor valve series mechanism based on device physical characteristic [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 39-44(in Chinese).
- [12] Krishna Y P C S. Important characteristics of thyristors of valves for HVDC transmission and static Var compensators[R/OL]. [2006-11-01]. <http://www.cigre.org/>.
- [13] Woodhouse M L. Voltage and current stresses on HVDC valves[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 2(1): 199-206.
- [14] 贺之渊, 汤广福, 邓占锋, 等. TSC 高压晶闸管阀过电流失效机制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 23-28.
He Zhiyuan, Tang Guangfu, Deng Zhanfeng, et al. The overcurrent failure mechanism of TSC high voltage thyristor valve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 23-28(in Chinese).
- [15] Choknawalar S, Carroll E I. A snubber design tool for P-N junction reverse recovery using a more accurate simulation of the reverse recovery waveform[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1991, 27(1): 74-83.
- [16] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 串联晶闸管反向恢复暂态过程的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 15-19.
Lan Yuanliang, Tang Guangfu, Yin Yonghua, et al. Study on transient of reverse recovery of series thyristors[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 15-19(in Chinese).



收稿日期: 2010-07-05。

作者简介:

解婷(1984), 女, 博士研究生, 研究方向为直流输电技术以及换流阀运行试验方法等, E-mail: xieting_36@163.com;

查鲲鹏(1977), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为灵活交流输电和 HVDC 技术及其相关试验方法;

汤广福(1966), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为灵活交流输电及 HVDC 相关技术;

郑健超(1939), 男, 中国工程院院士, 长期从事高电压、柔性交流输电技术方面的研究工作。

(编辑 徐梅)