直流输电工程换流阀控制系统对比分析

张 俊，李跃婷

(国家电网公司运行分公司上海管理处，上海 201413)

摘要：根据换流阀的触发控制及保护原理，结合常规直流、特高压直流输电工程实际，对不同技术路线的换流阀控制系统进行了对比分析。西门子换流阀控制原理时序性强，在导通期不会对保护性触发产生误判断。但是其恢复期保护的控制策略不尽合理，较容易发生误触发故障。ABB 换流阀控制原理简单可靠，但是其在控制脉冲区间内，不能够准确区分电流断续补发触发脉冲和保护性触发，在进行开路试验及小电流情况下，易造成保护性触发误动作。通过分析直流输电工程中阀控系统出现的有关故障，总结出不同技术路线阀控系统的优缺点，并对存在的问题提出相关解决建议。

关键词：特高压直流输电；换流阀；晶闸管；换流阀控制；触发脉冲；开路试验；换相失败

Relative analysis for valve control system in HVDC

ZHANG Jun, LI Yue-ting

(Shanghai Management Office, Grid Operation Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 201413, China)

Abstract: According to the theory of converter firing control and protection, this paper analyzes the valve control system's merits and demerits compared with different techniques based on the actual situation of the HVDC and UHVDC transmissions. Siemens valve control system is sequential. It could verdict the protective pulse accurately during the conducting state, but could not do it because of the unperfect control strategy, during the recovery period. ABB valve control system is simple and reliable. But during the firing pulse appeared, it could not distinguish the firing pulse sent again because of the discontinuous current and the protective pulse accurately, and would make the protective trigger faulty act, in the OLT mode or under the small DC load.

Key words: ultra HVDC; converter valve; thyristor; converter valve control; firing pulse; OLT; commutation failure

中图分类号： TM723 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)20-0146-04

0 引言

随着±800 kV特高压直流输电工程在国内的开展，我国直流输电技术已经达到国际领先水平[1]。换流阀作为直流输电工程的关键设备，除了实现整流和逆变的功能外，在整流站还具有开关的功能，可利用其快速可控性对直流输电的启动和停运进行快速操作。与常规直流输电相比，±800 kV特高压采用双12脉动换流阀串联的方式，具有输送容量大、运行方式多样化的优点。为了保证特高压直流输电的安全稳定运行，防止造成更大面积的故障和事故，应对换流阀的工作特性及原理进行深入分析和掌握。本文主要讨论西门子技术和ABB技术换流阀的触发控制及其保护原理，对比两种技术路线的优缺点，并对工程中出现的故障情况进行分析，提出解决建议。

1 换流阀控制原理

1.1 换流阀触发及关断条件

换流阀正常导通的条件为：（1）阳极电压必需高于阴极电压，即阀电压为正；（2）在控制极上加上所需的触发脉冲。两条件必须同时满足时阀才能导通。换流阀正常关断的条件：（1）电流减小过零；（2）阀电压持续一段时间为零或为负。两条件满足其一即可关断阀。晶闸管的特性如图1所示。

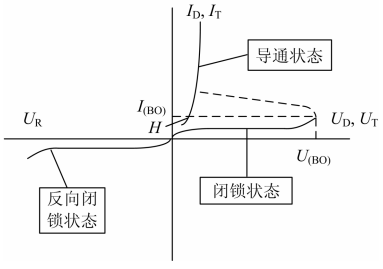


图 1 晶闸管特性

Fig. 1 Performance of thyristor

1.2 换流阀控制设备

直流输电工程中，需由多个晶闸管元件串联组成单个换流阀。因此，整个换流阀控制系统的设备也分为几个部分。①极控系统（PCP）：完成触发角度计算，产生控制脉冲（FCS/CP）发送至阀控系统；②阀控系统（VBE/VCU）：接收来自极控系统的控制脉冲，生成触发脉冲（FP）发送至晶闸管，并收集晶闸管的回报脉冲信号，进行分析处理，上送阀控系统信息给极控系统。③晶闸管控制单元（TFM/TCU）：接收阀控系统的触发脉冲，产生门极脉冲导通晶闸管，并实现晶闸管相关保护功能。

1.3 换流阀控制保护功能

换流阀正常运行时的触发角度（整流器为触发角，逆变器为关断角），从减少无功消耗、减少谐波分量和降低运行损耗等方面考虑，宜越小越好。但从换流阀安全可靠换相和保证有足够的调节裕度的角度出发，应有最小角度限制[1]。根据国内以往多个直流工程经验及触发控制系统的性能水平，整流器的触发角一般取15° 左右，逆变器的关断角一般取17° 左右。即整流站极控系统在换流阀承受正向电压15° 时发出控制脉冲，逆变站从换流阀关断至再次承受正向电压的间隙为17° [1-10]。

正常运行时，为防止由于触发光纤或触发回路故障，不能正常触发导通晶闸管，而产生过高电压损坏晶闸管，在晶闸管控制单元设置有过电压保护功能，当晶闸管两端正向电压超过一定值时，自行导通晶闸管，并给阀控系统发送信号脉冲。由于保护性触发会造成阀导通延时，产生直流电流分量流过换流变阀侧绕组。因此，当同一个换流阀内的保护性触发数量达到一定数量时，为防止换流变过应力，需要闭锁换流器。此外，高压直流输电中，晶闸管处于反向恢复期时，对正向电压上升率比较敏感，如果正向电压上升率过高，将会损坏晶闸管。为避免这种情况的出现，在晶闸管控制单元还设置有恢复期保护功能，当检测到du/dt超过一定值时，晶闸管控制单元会再次触发导通晶闸管[4]。

2　西门子技术换流阀

2.1 触发原理

西门子技术换流阀主要有以下特点：换流阀采用模块化设计，晶闸管串联组成了基本模块——晶闸管组件，每个组件由若干个晶闸管（11～15个）串联组成，模块集成度高，便于现场的安装和维修；换流阀中元器件使用了最新型的聚合材料，提高阀的防火性能；换流阀的触发以阀组件为单元进行光纤配置，因此触发光纤数量少；组件冷却回路采用并联形式，具有较好的冷却效果。该技术换流阀的触发控制原理如图2所示。

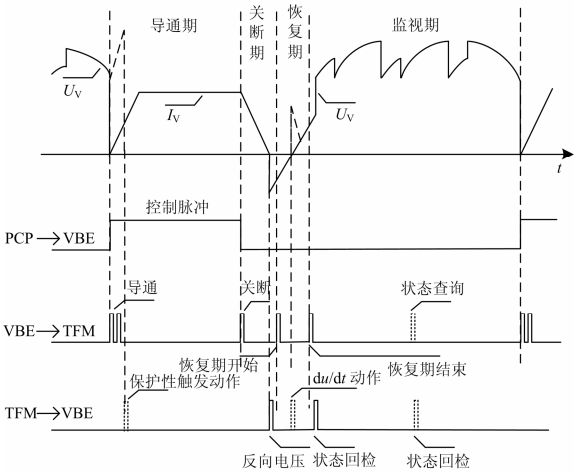


图 2 西门子技术换流阀触发原理

Fig. 2 Firing theory of Siemens convertor valve

阀控系统将整个触发周期划分为四个阶段。在导通期，PCP发送宽度为120° 的控制脉冲给VBE [1-5]，VBE接收到控制脉冲后，发送双脉冲触发指令至TFM，当晶闸管上正向电压超过120 V时，TFM便发送门极脉冲导通晶闸管。同一个阀内的所有晶闸管导通时差控制在1 μs以内。在此期间，只要电压再次超过120 V，TFM会再次触发晶闸管。在开路试验及小电流的情况下，可能会在同一导通期多次触发晶闸管。若由于触发回路故障导致某个晶闸管不能正常导通，该晶闸管的电压会迅速上升达到保护性触发水平。保护性触发可以导通晶闸管，避免其击穿，同时发送动作信号给VBE，VBE对信号进行分析处理。

在控制脉冲的下降沿，VBE发送截止指令脉冲给TFM，开启关断期。在此期间，原来导通的换流阀开始换相关断，TFM将不会给晶闸管发送门极脉冲。当晶闸管承受的反向电压超过120 V时，发送信号脉冲给VBE，VBE根据该信号结束关断期，开启恢复期，并发送恢复期保护窗口启动脉冲至TFM。恢复期保护窗口时间将持续1 300 μs。恢复期监视电压上升率，当du/dt超过100 V/μs或电压超过1 300 V时，TFM将再次导通晶闸管，同时反馈脉冲信号给VBE。如果单阀内超过三个晶闸管出现恢复期保护动作，VBE将触发整个阀。恢复期保护窗口结束之后，就进入监视期，在监视期，当晶闸管电压超过120 V或−120 V时，TFM会发送状态回检脉冲信号给VBE，指示晶闸管能够正常工作，当状态回检信号

丢失时，VBE判断为晶闸管故障，当单阀内故障数量超过冗余数时，VBE将发送跳闸信号闭锁换流器。

2.2 工程中出现的故障及解决建议

在±800 kV向上特高压直流输电工程中，当西门子换流阀作为逆变站运行时，频繁出现换相失败故障。经过现场监视分析，判断故障原因为单阀内出现多个晶闸管恢复期保护动作，VBE再次导通已经关断的阀，引起阀控系统误触发，从而最终导致换相失败。

向上特高压直流输电工程与很多直流输电工程一样，正常运行时逆变站控制系统采用定熄弧角γ控制，γ角运行在17°[4-10]附近，即换流阀从电流过零到再次承受正向电压，供其恢复的时间为17°。而西门子换流阀的恢复期窗口时间为1 300 μs，约为23°。可以看出，恢复期保护窗口的时间宽度不但包含了换流阀的正常熄弧角时间，还包含了换流阀再次承受正向电压之后的一段时间（约6°）。因此，部分晶闸管的恢复期保护会误动作，单阀内误动作数量超过三个时，VBE便导通整个换流阀，造成换相失败。

为了解决该问题，可以根据直流输电工程的实际熄弧角设定值，适当调整阀控系统恢复期保护的窗口时间，使其能够切实反应晶闸管在恢复期间的状态。并在此基础上，优化阀控系统的控制策略，在单阀内出现很多恢复期保护动作时才触发整个换流阀，出现的较少时只触发该位置的晶闸管。

3 ABB 技术换流阀

3.1 触发原理

ABB技术换流阀主要有以下特点：换流阀采用模块化设计，晶闸管串联组成了基本模块——晶闸管组件，每个组件由若干个晶闸管（6～8个）串联组成，便于现场的安装和维修，保证了换流阀满足机械应力和电气应力要求；换流阀中元器件使用了最新型的聚合材料，提高了阀的防火性能；该技术换流阀在阀层内设置检修平台，便于现场开展检修工作；阀组件冷却回路采用串联形式，有效减少了接头数量，降低阀冷系统冷却液泄漏风险；冷却回路管径较大，具有良好的冷却效果。该技术换流阀的触发控制原理如图3所示。

当 TCU 能够正常供电工作且晶闸管电压超过 32 V 时，TCU 会发送一个监视脉冲（IP）给 VCU，表明晶闸管能够正常工作，VCU 通过该信号对晶闸管进行检测。当 PCP 发送控制脉冲至 VCU 时，同时检测到 IP 信号，VCU 即产生触发脉冲导通换流阀。当晶闸管触发回路故障，发生保护性触发时，TCU 同样会发送一个 IP 信号给 VCU。ABB 换流阀也具备电流断续再触发功能，只要在控制脉冲区间内出现 IP，VCU 就会产生 FP 触发相应晶闸管，如图 3 所示。

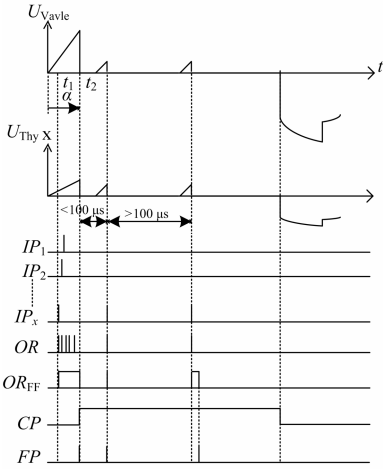


图 3 ABB 技术换流阀触发原理

Fig. 3 Firing theory of ABB convertor valve

由图中可见，如果VCU在100 μs内接收到新的IP脉冲，新的FP脉冲就立即产生，如果在100 μs之后收到新的IP脉冲，新的FP脉冲将延时20 μs触发。同样，ABB换流阀也具有恢复期保护功能，在1 050 μs的恢复期保护窗口内，若电压高于1 500 V，则恢复期保护动作，但是只导通故障晶闸管。

3.2 工程中出现的故障及解决建议

在±400 kV青藏直流输电工程中，在进行开路试验时，多次因为单阀内保护性触发数量超过一定值，引起换流器闭锁。分析原因为开路试验时电流断续，晶闸管不能连续导通，在控制脉冲区间内，再次出现正向电压，产生IP信号，VCU再次产生FP触发晶闸管。但是VCU不能正确区分该信号是正常的IP信号还是保护性触发IP信号，而误判断为保护性触发，最终导致换流器闭锁。

要解决该问题，需要改进晶闸管控制单元TCU，使其能够在不同的工况下发出不同的指示信号脉冲。例如，正常的信号指示发送脉冲宽度为1 μs的IP信号，保护性触发指示发送脉冲宽度为2 μs的IP信号。

4 对比分析

两种技术的换流阀都有各自的优点和缺点。西门子换流阀控制原理时序性强，通过指令脉冲明确各个阶段的任务，晶闸管的控制严格按照指令来执行。在导通期不监视晶闸管的正向电压情况，因此

不会对保护性触发产生误判断。但是由于其恢复期保护的控制策略不尽合理，较容易发生误触发故障；ABB 换流阀控制原理简单可靠， 发生恢复期保护动作时，只触发故障位置的晶闸管，不易产生误触发。但是其在控制脉冲区间内，不能够准确区分电流断续补发触发脉冲和保护性触发，在进行开路试验及小电流情况下，易造成保护性触发误动作。目前，国内已有多个设备厂家掌握了换流阀制造技术，并结合两家换流阀的特点，取长补短，形成了比较完善的换流阀控制技术。

参考文献

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 106-112.
ZHAO Wan-jun. HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 106-112.

[2] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2006年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
LIU Zhen-ya. UHVDC transmission technology research album 2006[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[3] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
SHU Yin-biao, LIU Ze-long, GAO Li-ying, et al. A preliminary exploration for design of ±800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.

[4] 杨敏, 孙志军, 李楠, 等. 直流输电换流阀点火脉冲的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 126-129.
YANG Min, SUN Zhi-jun, LI Nan, et al. Design of firing pulse used for valves control in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 126-129.

[5] 李少华, 刘涛, 苏匀, 等. ±800 kV 特高压直流输电系统解锁/闭锁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 84-87.
LI Shao-hua, LIU Tao, SU Yun, et al. Research on de-blocking/blocking operation in ±800 kV UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 84-87.

[6] 霍鹏飞, 王国功, 刘敏, 等. 向上±800 kV 特高压直流输电工程的直流保护闭锁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 137-139.
HUO Peng-fei, WANG Guo-gong, LIU Min, et al. The DC protection block strategy in Xiangjiaba-Shanghai ±800 kV UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 137-139.

[7] 张民, 石岩, 韩伟. 特高压直流保护动作策略的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 10-16.
ZHANG Min, SHI Yan, HAN Wei. Research on action strategy of UHVDC protection[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 10-16.

[8] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.

[9] 罗隆福, 尚荣艳, 李勇, 等. 交流系统等值电抗对新型直流输电系统运行参数的影响[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 96-103.
LUO Long-fu, SHANG Rong-yan, LI Yong, et al. Impacts of the AC system equivalent reactance on operation parameters of a novel DC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 96-103.

[10] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.
YANG Fen-yan, XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 45-52.

收稿日期：2013-12-31；　修回日期：2014-01-21

作者简介：

张　俊（1987－），男，本科，工程师，主要从事常规直流及特高压直流输电工程换流站运维工作；E-mail：j-zhang@sgcc.com.cn

李跃婷（1980－），女，研究生，高级工程师，主要从事常规直流及特高压直流输电工程换流站运维工作。E-mail：yueting-li@sgcc.com.cn