

大功率晶闸管反向恢复期保护逻辑的优化设计

陶敏¹, 梁家豪¹, 梁秉岗¹, 刘道民², 刘宏², 柴斌²

(1. 中国南方电网有限公司超高压输电公司 广州局, 广东 广州 510000;

2. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200)

摘要:晶闸管是特高压直流输电领域中的核心设备,其运行状态直接影响了直流输电系统的稳定性。晶闸管关断过程中,电流从额定值降为零后,才具备承受反向电压的能力。由于晶闸管结电容的存在,需要一定的反向恢复电荷,使得电流过零后反向流动,这一过程称为反向恢复期。如果晶闸管在反向恢复期内端电压突然升高,斜率超过一定值后,晶闸管就会被击穿,所以需要在反向恢复期内监视晶闸管端电压,一旦电压上升率超过一定值,就必须立刻触发晶闸管,保护晶闸管不被击穿。提出了一种应用于大功率晶闸管反向恢复期保护逻辑信号的优化方案,并通过硬件电路实现。通过仿真分析及硬件电路试验测试,验证了该方案无延时的保护效果,证明了该方案在晶闸管反向恢复期保护中的优越性。

关键词:大功率晶闸管;反向恢复;换流阀;晶闸管电子板

中图分类号:TM726.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22028

A Logic Optimization Design for High Power Thyristor Reverse Recovery Period Protection

TAO Min¹, LIANG Jiahao¹, LIANG Binggang¹, LIU Daomin², LIU Hong², CHAI Bin²

(1. Guangzhou Bureau, China South Power Grid EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510000,

Guangdong, China; 2. C-EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: The thyristor is considered as the core equipment in the field of high voltage direct current (HVDC) transmission. The stability of the direct current (DC) transmission system is directly affected by the operation state of the thyristor. During the turn-off period, the thyristor can withstand the reverse voltage only after the current drops from rated value to zero. A certain reverse recovery charge is required to make the zero-crossing current flow reversely due to the existence of the thyristor junction capacitance, this process is called the reverse recovery period. During the reverse recovery period, the thyristor will be broken if the voltage gradient exceeds a certain value. Therefore, it is necessary to monitor the voltage of the thyristor terminal during the reverse recovery period. Once the voltage gradient exceeds a certain value, the thyristor must be triggered immediately to protect the thyristor from breakdown. An optimization scheme for the high-power thyristor protection logic signals in the reverse recovery period was presented and realized by hardware circuits. The effect and the superiority of the undelayed protection in the reverse recovery period of the scheme were verified through simulation analysis and hardware circuit tests.

Key words: high power thyristor; reverse recovery; converter valve; thyristor electronic board

晶闸管在导通时其内部基区存在大量的过剩载流子,在关断过程中这些载流子通过扩散、迁移及复合等方式逐步消散,因此在关断过程中晶闸管上会流过一个时变的反向恢复电流^[1-3]。由于外回路电感的存在,变化的反向恢复电流导致晶闸管承受反向恢复电压过冲。因此,在晶闸管反向恢复过程中,由于基区存在大量非平衡载流子,其正、反向阻断能力尚未恢复,此时换流阀

若受到高压暂态脉冲的冲击极易发生晶闸管损坏^[3]。尤其是应用在直流输电领域的大功率晶闸管,若反向恢复期内受到暂态高压冲击,不仅造成晶闸管的损坏,还会导致直流输电系统换相失败,因此晶闸管反向恢复保护显得尤为重要^[2,4-6]。

本文研究了高压直流输电领域应用较为广泛的西门子换流阀晶闸管触发监测单元的触发逻辑,对西门子晶闸管触发监测逻辑中的不足进

作者简介:陶敏(1988—),男,本科,工程师,Email:taomin8879@qq.com

通讯作者:刘道民(1988—),男,硕士,工程师,Email:liu915175121@163.com

行了分析,并提出了一种优化方案。通过 PSPICE 数字验证和实际测试的方法,验证了该优化方案的可行性和有效性。

1 晶闸管反向恢复期及其现有保护逻辑介绍

晶闸管在电压两端负向过零点开始进入反向恢复期,反向恢复过程典型电流电压波形如图1所示。

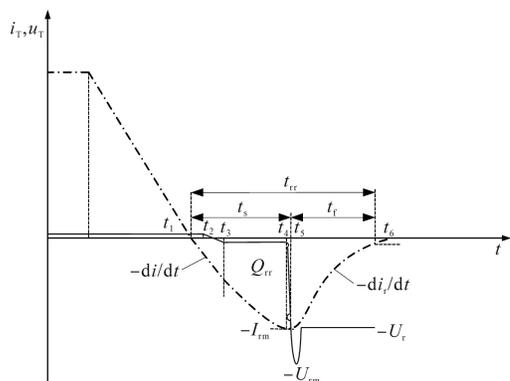


图1 晶闸管反向恢复过程典型电流电压波形

Fig.1 Typical waveforms in reverse recovery process of thyristor

图1中,虚线为电流波形,实线为电压波形。在反向恢复过程中,反向恢复电流从零增大到峰值 $-I_m$ 的时间记为存储时间 t_s ,电流峰值 $-I_m$ 下降到 $-0.1I_m$ 的时间记为下降时间 t_f ,存储时间和下降时间共同组成了反向恢复期时间,即反向恢复时间 $t_{rr}=t_s+t_f$ 。反向恢复期时间与管子特性有关,不同的管子特性不一致,以溪浙特高压直流输电工程中的晶闸管为例,其反向恢复期约为 $1\text{ ms}^{[1,5,7]}$ 。

西门子高压直流输电领域晶闸管电子板(TE板)监测触发逻辑如图2所示,触发逻辑为脉冲信号,每个周期由5个宽度为 $3\text{ }\mu\text{s}$ 的脉冲信号组成,分别标记为脉冲1~脉冲5。脉冲1、脉冲2为间隔 $10\text{ }\mu\text{s}$ 的双脉冲组,实现晶闸管的触发;脉冲3为负压信号,VBE监测到控保下发的同步信号后产生脉冲3,TE板接收到脉冲3信号后将产生一个RN状态回报信号;脉冲4为反向恢复保护信号,VBE接收到RN后产生脉冲信号4;脉冲5为晶闸管状态监测信号,VBE产生脉冲信号4后延时固定时间产生脉冲信号5^[6,8-11]。

反向恢复保护信号产生后,TE板进入反向恢复保护期Ⅲ,在反向恢复期内,晶闸管两端电压 $du/dt>100\text{ V}/\mu\text{s}$ 时,TE板触发晶闸管,从而起到保护晶闸管的作用。

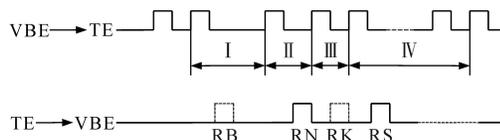


图2 西门子高压直流输电领域TE板监测触发逻辑

Fig.2 Monitoring and trigger logic of TE board in Siemens HVDC field

该触发逻辑中,当VBE产生脉冲3后晶闸管已经开始进入反向恢复期,而TE板在脉冲4产生后才开始进行反向恢复期的保护,因此从脉冲3~脉冲4中间阶段晶闸管处于反向恢复期,但TE板并未对晶闸管进行反向恢复保护。该区间内,若晶闸管上产生较大的 du/dt 变化,可能造成晶闸管的损坏^[12-13]。

因此,TE板产生晶闸管反向恢复保护时间较实际晶闸管电压过零点延时包括:1)控制保护系统检测到过零点并发送到换流阀控制系统时间 t_1 ;2)换流阀控制系统发送脉冲3到TE板时间 t_2 ;3)TE板产生RN信号延时 t_3 ;4)RN发送到换流阀控制系统延时 t_4 ;5)换流阀控制系统产生脉冲4、脉冲发送到TE板的时间 t_5 ;6)TE板接收到脉冲4后产生反向恢复保护的时间 t_6 。其中, t_1, t_3, t_6 产生时间与硬件电路设计及程序有关; t_2, t_4, t_5 为光纤传输延时,根据直流输电现场光纤长度估算,从阀厅到阀控室光纤长度约为 400 m ,光在光纤中传输的速度约为 $2\times 10^8\text{ m/s}$,因此光纤传输中的延时约为 $6\text{ }\mu\text{s}$ 。现有TE板保护逻辑中若在晶闸管过零点后产生了反向冲击电压,TE板将无法对其进行保护。

2 反向恢复保护功能及电路实现

针对西门子TE板触发逻辑中存在的上述隐患,对TE板触发逻辑进行优化,优化后的触发逻辑如图3所示。触发逻辑为脉冲信号,每个周期由3个宽度为 $3\text{ }\mu\text{s}$ 的脉冲信号组成,分别标记为脉冲1~脉冲3。脉冲1、脉冲2为间隔 $3\text{ }\mu\text{s}$ 的双脉冲组,实现晶闸管的触发;脉冲3为负压信号,

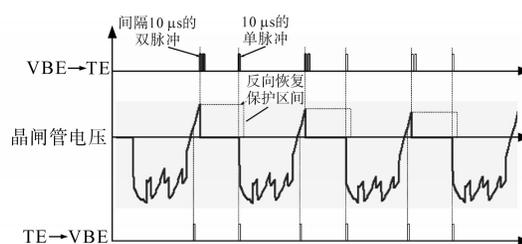


图3 优化后的TE板监测触发逻辑

Fig.3 Optimized monitoring and trigger logic of TE board

VBE监测到控保下发的同步信号后产生脉冲3,TE板接收到脉冲3信号后将产生一个RN状态回报信号,同时晶闸管进入反向恢复保护期,TE板对晶闸管进行反向恢复保护。

优化后晶闸管电压反向过零点的监测和反向恢复保护区间设定功能均由TE板自主实现。TE板在晶闸管电压负向过零点(晶闸管进入反向恢复期后)即开始对晶闸管进行保护,提高了TE板对晶闸管保护的可靠性。

优化后的反向恢复保护功能实现方法如图4所示,电路分别由RS触发器、比较电路和延时电路组成,其中,晶闸管正负压监测信号为 U_{Uth} ,高压暂态脉冲监测信号为 U_{RRP+} ,延时电路采用触发器定时电路产生,其延时时间可以通过调节定时回路中的电阻值来调节。



图4 反向恢复保护电路原理图

Fig.4 Schematic diagram of reverse recovery protection circuit

根据溪浙特高压直流输电工程晶闸管特性,设置板卡内延时电路延时时间为1ms,即在晶闸管电压反向过零点产生后1ms内,晶闸管反向恢复保护水平设定为1.2kV。晶闸管两端电压大于设定的反向恢复保护电压后,反向恢复电路保护信号 $U_{RRPtrigger}$ 将产生一个高电平信号,并发送到TE板门极触发电路,门极触发电路将触发晶闸管,对晶闸管产生保护作用。

3 电路仿真及试验

电路采用PSPice软件进行仿真,仿真过程中晶闸管触发角设置为 36° ,在晶闸管电压反向过零点后1ms时,晶闸管两端施加2kV的冲击电压,冲击电压上升沿和下降沿均设置为 $20\mu s$ 。仿真结果如图5所示,其中, U_{signal} 为晶闸管触发信号。仿真结果显示,在晶闸管电压反向过零点产生后,晶闸管电压监测信号 U_{Uth} 和晶闸管电压同步变化,几乎无任何延时产生。仿真显示该设计方法不仅能实现晶闸管的反向恢复保护功能,且能无延时进行保护。

TE板反向恢复保护设计如下:晶闸管由导通状态至晶闸管反向电压为 $-20V$,TE板启动反向恢复保护,反向恢复期内,晶闸管正向电压超过保护水平,TE板保护触发晶闸管,反向恢复保护水平

为1700V,TE板晶闸管反向恢复期保护水平可调。

为了验证该方法的可靠性,设计试验进行测试,测试电路电气接线图如图6所示。

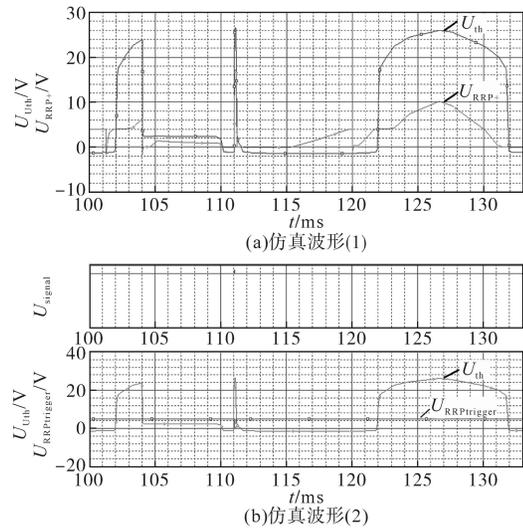


图5 晶闸管反向恢复保护电路仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of thyristor reverse recovery protection circuit

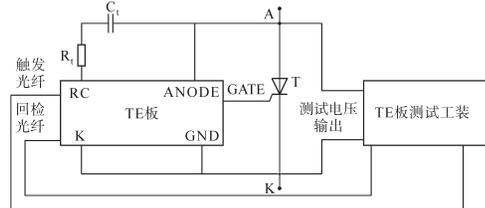


图6 反向恢复特性测试电路电气接线图

Fig.6 Electrical wiring diagram of reverse recovery characteristic test circuit

试验线路参数如下:TE板测试工装为单相AC 220V输入,输出0~10000V;动态均压电容 C 为 $1.5\mu F/4kV$;动态均压电阻 R 为 $40\Omega/300W$;晶闸管T为5000A/8500V;TE板满足输入电压DC 60V,BOD保护水平7000V,反向恢复保护水平1700V。

测试结果如图7所示,采样间隔100ns,反向恢复保护电压值约1.74kV,反向恢复保护无延时。

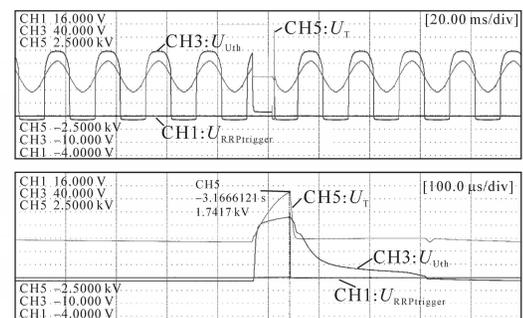


图7 反向恢复保护电压测试波形

Fig.7 Reverse recovery protection voltage test waveforms

4 结论

本文通过分析现有西门子晶闸管触发监测逻辑,发现了晶闸管反向恢复保护功能存在的不足,提出了一种新的晶闸管触发监测逻辑,并对该逻辑方法的实现进行了理论分析、数字仿真和试验验证。结果表明,该方法不仅能实现晶闸管的反向恢复保护功能,而且能够实现无延时的反向恢复保护,对高压直流输电大功率晶闸管保护具有重要意义。

参考文献

- [1] 刘隆晨,岳珂,庞磊,等. 基于反向恢复特性的换流阀晶闸管级控制单元保护功能测试研究[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3727-3732.
Liu Longchen, Yue Ke, Pang Lei, *et al.* Study on protective function test of control unit of thyristor level in HVDC converter valve based on thyristor reverse recovery characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3727-3732.
- [2] 张静,汤广福,温家良,等. 高压大功率晶闸管反向恢复特性动态模型[J]. 电力电子技术, 2015, 49(4): 50-53.
Zhang Jing, Tang Guangfu, Wen Jialiang, *et al.* Dynamic modeling of the turn off performance of high voltage power thyristor[J]. Power Electronics, 2015, 49(4): 50-53.
- [3] 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.
- [4] 王峰,刘天琪,李兴源,等. 考虑直流电流上升及交流电压下降速度的换相失败分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 111-117.
Wang Feng, Liu Tianqi, Li Xingyuan, *et al.* Commutation failure analysis considering DC current rise and AC voltage drop speed[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 111-117.
- [5] 黄华,方太勋,刘磊,等. 晶闸管换流阀反向恢复特性建模及阻容参数优化设计[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 187-190.
Huang Hua, Fang Taixun, Liu Lei, *et al.* Modeling of reverse recovery characteristic and optimal design of resistance and capacitance parameters for thyristor converter valve [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 187-190.
- [6] 饶宏,张东辉,赵晓斌,等. 特高压直流输电的实践和分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2481-2488.
Rao Hong, Zhang Donghui, Zhao Xiaobin, *et al.* Practice and analyses of UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2481-2488.
- [7] 岳珂,刘隆晨,孙玮,等. 反向恢复特性在高功率晶闸管检测试验中的应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 97-103.
Yue Ke, Liu Longchen, Sun Wei, *et al.* Application of reverse recovery characteristics in high power thyristor testing [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 97-103.
- [8] 丁厦,陈飞,高炜,等. 特高压直流输电换流阀控制系统应用[J]. 山东电力技术, 2019, 46(2): 42-45.
Ding Xia, Chen Fei, Gao Wei, *et al.* Application of converter valve control system in UHVDC transmission project [J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(2): 42-45.
- [9] 任小静,王潇,刘飞超,等. 两种特高压直流输电用晶闸管控制单元工作原理分析对比[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 74-77.
Ren Xiaojing, Wang Xiao, Liu Feichao, *et al.* Comparative analysis on operating principles of the two thyristor control unit in UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 74-77.
- [10] 汤广福,贺之渊,邓占锋. 基于器件物理特性的晶闸管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.
- [11] 杨勇,石岩,操国宏,等. 特高压晶闸管反向恢复期失效机理及解决方案[J]. 电力电子技术, 2019, 53(9): 121-124.
Yang Yong, Shi Yan, Cao Guohong, *et al.* Study of failure mechanism and solution of thyristor reverse recovery period of HVDC converter valve[J]. Power Electronics, 2019, 53(9): 121-124.
- [12] 黄蓉,李世平,任亚东,等. 特高压直流输电用晶闸管 dv/dt 特性试验研究[J]. 大功率变流技术, 2013, 36(4): 4-8, 27.
Huang Rong, Li Shiping, Ren Yadong, *et al.* Research on dv/dt performance test of thyristors used in ultra high voltage DC transmission [J]. High Power Converter Technology, 2013, 36(4): 4-8, 27.
- [13] 解婷,汤广福,郑健超,等. 高压直流晶闸管阀故障电流下反向电压特性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 140-146.
Xie Ting, Tang Guangfu, Zheng Jianchao, *et al.* Analysis on reverse voltage characteristics of HVDC thyristor valves in the fault state [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 140-146.
- [14] 汪道勇,胡宇洋,何钢,等. 可控硅的反向恢复触发保护探讨[J]. 华中电力, 2008, 21(5): 26-28, 32.
Wang Daoyong, Hu Yuyang, He Gang, *et al.* Discussion on HVDC thyristor recovery protection and RP test [J]. Central China Electric Power, 2008, 21(5): 26-28, 32.
- [15] 张禄琦,周家启,刘洋,等. 高压直流输电工程可靠性指标统计分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 31(19): 95-99.
Zhang Luqi, Zhou Jiaqi, Liu Yang, *et al.* Statistical analysis on reliability indices for HVDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 31(19): 95-99.

收稿日期:2020-06-08

修改稿日期:2020-07-07