晶闸管旁路开关在 UPFC 中的应用

周启文，丁峰峰，潘磊，方太勋
（南京南瑞继保电气有限公司，江苏 南京 211102）

摘　要：在统一潮流控制器（UPFC）系统中为了防止串联变压器以及换流器在系统发生故障时因过电压损坏，要在串联变压器的一次侧或二次侧并联快速旁路设备，文中研究的晶闸管旁路开关是一种利用晶闸管快速导通性能的旁路开关设备。首先介绍了 UPFC 的过电压保护原理，快速旁路设备的组成及技术性能要求，然后以南京 UPFC 工程为例设计了快速旁路设备中晶闸管旁路开关（TBS）的结构、参数并进行器件的选型，校核晶闸管旁路开关的 BOD 保护和 MOV 之间的过电压配合，通过温升试验以及在合成回路中进行的最大短时电流耐受试验验证了晶闸管旁路开关的性能，最后介绍了 TBS 的状态检测系统构成及其检测流程。

关键词：统一潮流控制器；晶闸管旁路开关；阀组测试技术
中图分类号：TM89　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3203（2019）01-0146-06

0　引言

统一潮流控制器（unified power flow controller，UPFC）是迄今为止控制最灵活的柔性交流输电装置，可以调控线路阻抗、安装点线路电压和功角以及线路的有功和无功潮流，主要包括串联变压器（简称串变）、并联变压器以及换流器等设备[1—3]。UPFC 的核心设备为电压源换流器，属于电力电子设备，相比传统电力设备，其耐受故障电压和电流的能力较差。当交流系统发生故障时，线路短路电流会经过串变耦合至换流阀，如果未加任何保护措施，故障电流流过串变会产生数十倍的过激磁，从而导致严重的过电压问题，影响串变以及换流器的安全[4]。因此必须采取措施迅速将 UPFC 串联侧与交流线路隔离，保护串联侧换流器和串变，同时减小对交流系统保护的影响。

电力系统中过电压的应对措施有很多，被动型的如采用避雷器，主动型如采用火花间隙、快速开关等。在电容器串联补偿装置（简称串补）中也有类似的过电压保护结构[5]，在串补中选择火花间隙作为快速旁路设备，其在收到触发命令到导通时间不超过 1 ms。但是火花间隙受外部环境影响因素很大，容易出现不受控制的自触发的问题[6—7]。对于 UPFC 这种涉及到电网潮流控制的系统来说，在低压配网串补以及基于快速开关的故障限流器等系统中一般采用快速机械开关来作为快速过电压切换设备，但是快速机械开关存在的问题是其断口电压和故障电流耐受能力受核心器件以及工作原理的制约，很难满足高电压、大电流的需求，而且快速机械开关虽然其分合闸速度相对常规的断路器有很大提高，但是最高也只能达到 3～10 ms 的水平，相对火花间隙等其它设备仍有一定差距。

文中设计了一种晶闸管旁路开关（thyristor bypass switch，TBS）技术，相对于传统的快速旁路技术如火花间隙、快速开关等，该技术方案具有更快的动作时间，完全可控，不受外部环境因素影响，满足高电压大电流的需求等优点。

收稿日期：2018-08-17；修回日期：2018-09-24

1　原理与设计

1.1　UPFC 的过电压保护原理

UPFC 跟系统的主接线图在不同工程中略有区别，以南京 220 kV UPFC 为例，其主接线见图 1。

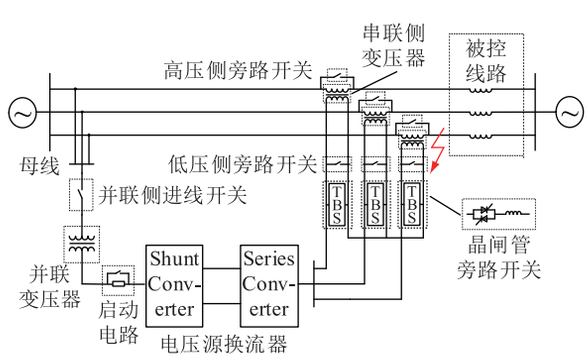


图 1　UPFC 单线图

Fig.1　UPFC single-line diagram

为了保护串变以及换流器，参照图 2 的结构配置相关的保护设备，在串变的一次侧并联机械式旁路开关，为了增加保护的快速性，在二次侧并联机械式旁路开关、金属氧化物限压器（metal-oxide varistors，MOV）以及晶闸管旁路开关。根据计算，将 MOV 的保护水平选择为串变以及换流器所能承受

的过电压水平。当线路发生短路故障时,流过串变一次侧和二次侧绕组电流急剧增加,端口电压也随之升高,MOV 将电压限制在保护水平附近,UPFC 控制保护系统对一次侧和二次侧机械旁路开关发出合闸命令。但由于目前高压大容量机械旁路开关的合闸时间≥30 ms,如果不考虑其他更加快速的旁路措施,那么串变、换流器、MOV 要承受至少 30 ms 的故障冲击,这些造价昂贵的设备将面临很大的风险。TBS 是一种利用晶闸管快速导通性能的旁路开关设备,具有响应速度快、通流能力强等特点,而且无需额外配置冷却系统,因此在 UPFC 中采用不受环境影响、受控性能好、导通速度同样很快的 TBS。

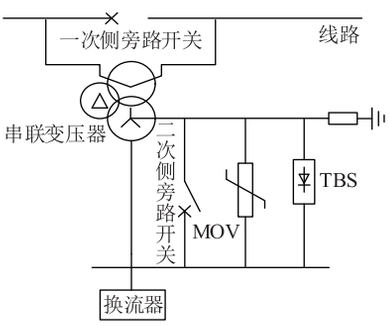


图 2 UPFC 过电压保护原理

Fig.2 The over-voltage protection diagram of UPFC

1.2 TBS 的技术要求

根据 UPFC 的应用工况,TBS 平时处于闭锁状态,仅在系统故障时导通,而且在并联的机械旁路开关合闸后重新闭锁,将故障电流转移到机械旁路开关支路[8]。因此 TBS 要求能够短时导通大电流,最大导通时间按机械旁路开关最大合闸时间考虑,一般不超过 60 ms。TBS 在正常运行过程中导通的时间很短,如果像其他晶闸管设备配置水冷系统将增加成本、占地以及维护的复杂度[9],因此要求 TBS 能在空气自然冷却的状态下正常运行。由于 UPFC 系统要求从系统发生故障到 TBS 导通间隔时间控制在几个毫秒之内,晶闸管自身的响应时间在毫秒级,因此要求 UPFC 的采样系统、控制保护系统以及阀控系统的动作时间以及信号传输延时总和不得超过 1 ms[10—11]。

1.2.1 TBS 的结构

TBS 结构如图 3 所示,它由 n 级串联的反并联晶闸管构成,每一级晶闸管并联有阻容回路和静态电阻[12],阻容回路和静态电阻保证了每一级晶闸管的分压特性一致,此外为了限制在突然导通大电流时产生的 di/dt,TBS 还需要串联饱和电抗器。

1.2.2 TBS 的主要设备选型

在 TBS 技术参数设计之前需要确定晶闸管的

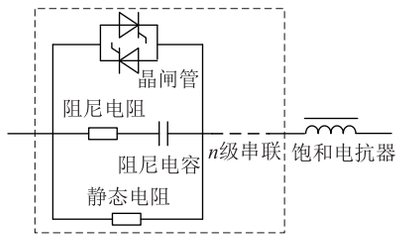


图 3 TBS 结构

Fig.3 The structure diagram of TBS

型号。由于 TBS 作为一种故障电流转移设备,需要有足够高的电流承受能力,以南京 UPFC 工程为例,通过系统仿真计算得出在 UPFC 串变出口侧三相接地短路时流过 TBS 的电流最大,最大峰值为 70 kA,最长持续时间 60 ms[13—14]。由于直流分量的存在,流过反并联晶闸管其中一个方向的电流波形如图 4 所示。根据目前已经公开的资料显示已投运的工程中 TBS 的最大电流峰值仅为 40 kA,尚未见到峰值电流 70 kA 的 TBS 工程应用案例。因此在南京 UPFC 工程 TBS 设计选型时选择目前市面上通流能力最强的两种 6 英寸晶闸管进行结温仿真分析,分别是 5 000 A/8 500 V 和 6 250 A/7 200 V,如图 5 所示。

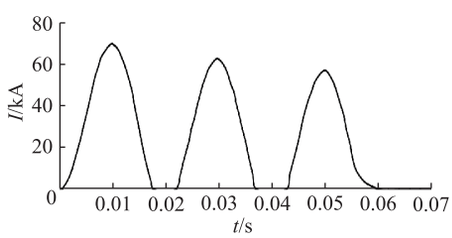


图 4 TBS 需要耐受的电流波形

Fig.4 The fault current wave of TBS

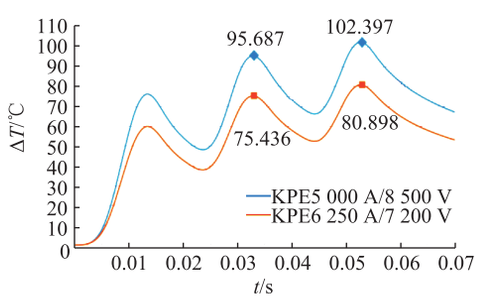


图 5 TBS 晶闸管结温温升曲线

Fig.5 The temperature raise diagram of thyristor

从仿真分析结果来看,5 000 A/8 500 V 的最大温升约 102 ℃,6 250 A/7 200 V 的最大温升约 81 ℃,如果环境温度按 40 ℃考虑,根据晶闸管厂家的建议,选择 6 250 A/7 200 V 型号的晶闸管在这种工况下更为安全。

阻容回路以及静态电阻的参数计算与其他晶

闸管的应用基本一致,在文中不再重点介绍。针对TBS需要特别注意的是,虽然TBS正常运行时不导通,但是由于两端电压的存在,阻尼回路以及静态电阻有泄露电流流过,由于TBS没有配置额外的冷却系统,可能会导致阻尼电阻以及静态电阻的温度持续上升,根据类似的工程经验,这两个电阻的温升可达100 ℃以上。因此需要选择较大额定功耗的电阻,单支一般超过200 W,另外在进行TBS结构设计时需要给电阻留有较大的散热空间,并避免与其他设备距离过近。

以南京UPFC工程为例,TBS的基本参数为:额定电压12 kV,短路电流耐受能力70 kA/60 ms,晶闸管型号6 250 A/7 200 V,串联级数8。

1.2.3 TBS的过电压保护配合

根据图2,当UPFC所在线路发生故障时,流过串变的电流急剧增加,如果没有采取过压保护措施会导致换流器承受过电压而损坏,因此除了安装TBS等快速旁路设备外,还并联有MOV,从而将电压限制在一定的保护水平之内。根据仿真以及绝缘配合计算,南京工程MOV的保护水平设置为电压峰值40 kV,对于TBS来说不考虑冗余的串联数为7级,在保护水平下每一级承受的电压为5.7 kV,对于7 200 V的晶闸管来说是满足要求的。TBS还需要考虑自身的保护性触发(break over diode, BOD)门槛值的设定,在MOV发生损坏无法有效限压且TBS未能及时触发导通的情况下,靠TBS的BOD来快速动作来保护自身以及其他设备,因此TBS的BOD设置值要高于MOV的保护水平且低于晶闸管的最大电压耐受能力,在这里一般按保护水平的1.1倍考虑,即44 kV,单级晶闸管的BOD值为6.3 kV,低于晶闸管的正向最大可重复电压峰值7.2 kV。

2 试验方案与验证

TBS作为一种新型应用的电力电子设备,其应用工况与常规的直流换流阀或者SVC等交直流系统中所使用的晶闸管阀组有着显著的区别。目前尚无针对TBS的相关标准,在实际工程中,TBS的常规试验项目参照GB/T 20995—2007进行[15],对于TBS来说针对其大电流导通和无冷却系统的两个特点,需要进行两个特殊试验项目:温升试验和最大短时电流耐受试验。

2.1 温升试验

由于TBS没有配置额外的冷却系统,因此需要通过温升试验来验证设备的长期温度稳定性。该试验在TBS两端施加额定电压3 h以上,直到确认所有部件温升不再持续上升。环境温度30 ℃下记录各部件最高温升如表1所示。

表1 TBS部件最高温升表

Table 1 The temperature raise of TBS

部件	温度/℃	温升/℃
阻尼电阻	101.7	71
静态电阻	88.1	58
阻尼电容	31.7	1.7
晶闸管	31.6	1.6

2.2 最大短时电流耐受试验

由于在类似的工程应用中尚未有过TBS导通70 kA故障电流的先例,因此最大短时电流耐受试验是验证TBS导通能力的最重要的试验项目。试验涉及到电流、电压以及晶闸管开通时序的配合,为此搭建了合成试验回路进行测试。对于反并联结构的晶闸管,由于是对称结构,受试验条件所限只验证单向导通能力。

该合成回路由四部分组成:电压源、电流源、辅助回路以及试品阀(TBS),如图6所示。

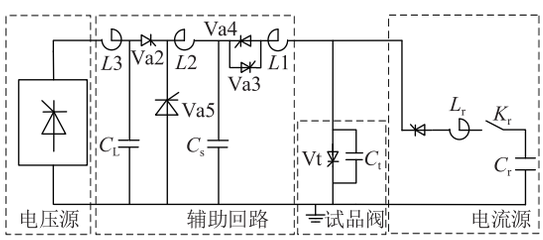


图6 TBS合成试验回路

Fig.6 The synthetic test circuit

TBS中单向晶闸管的正常运行及故障电流期间的电压电流波形如图7所示。

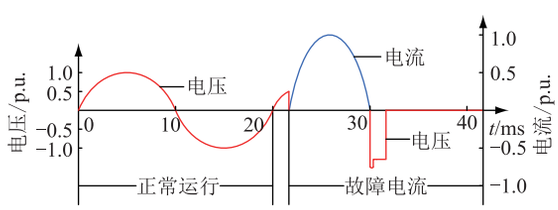


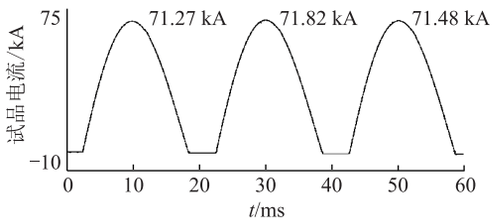
图7 TBS单向晶闸管波形时序

Fig.7 The test current timing wave of thyristor

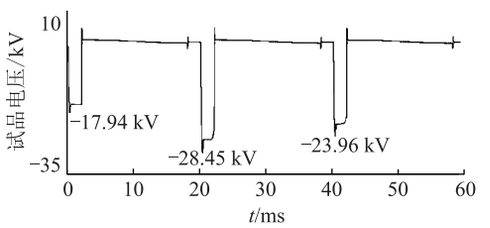
正常运行时,单向晶闸管只承受串变两端电压,晶闸管不导通;系统故障时,触发导通TBS,单相晶闸管流过较大的短路电流,电流过零后承受反向恢复电压,随着另一方向晶闸管的导通,承受电压恢复为零。

合成回路由电压源、辅助回路、电流源组成。电压源及辅助回路内辅助阀的时序配合模拟正常及故障电流期间TBS的电压。电流源是由电容、电

感组成的谐振回路,通过调整电容、电感参数以及电容充电电压的大小,模拟故障电流期间的大电流的底宽和幅值。合成回路的主要参数电压源为 110 kV,电流源为 80 kA/三周波。TBS 在合成回路上试验的三周波故障电流波形如图 8。



(a) 试品电流



(b) 试品电压

图 8 TBS 三周波电流试验波形

Fig.8 The three duties fault current wave

三周波合成回路试验结束后,检查 TBS 外观无异常,各部件无明显温升,经测试晶闸管正常。

该 TBS 在 220 kV 南京 UPFC 工程中得到应用,在人工接地短路试验中成功动作,从故障发生到 TBS 动作时间间隔≤1.8 ms,流过 TBS 的最大短路电流峰值 28.7 kA,为保护串变和换流器起到了重要作用[16]。

3 TBS 的状态检测

TBS 作为一种应急保护设备,绝大部分时间工作在闭锁状态,平时无法对其是否处于正常工作状态进行有效评估,如果有关键部件(如晶闸管、阻尼电容、电阻)发生损坏很难及时给出告警提示。因此需要在定检期间对 TBS 进行快速全方位的检测以及时排除故障隐患,从而提高设备的可靠性和可用率。

通过阻抗试验、短路试验和低压触发试验一般能够全面反映 TBS 关键部件的状态[17]。TBS 状态检测系统构成及其检测流程分别见图 9 和图 10。

阻抗试验主要用于检测晶闸管级单元连线是否正确可靠、阻尼及均压回路是否存在短路或者开路情况、晶闸管是否损坏等。阻抗试验电路采用低幅值的正弦发生器对晶闸管级单元两端施加不同频率的正弦电压,通过测量级单元两端的电压和回路电流得到对应频率下的阻抗,一般选取直流、100

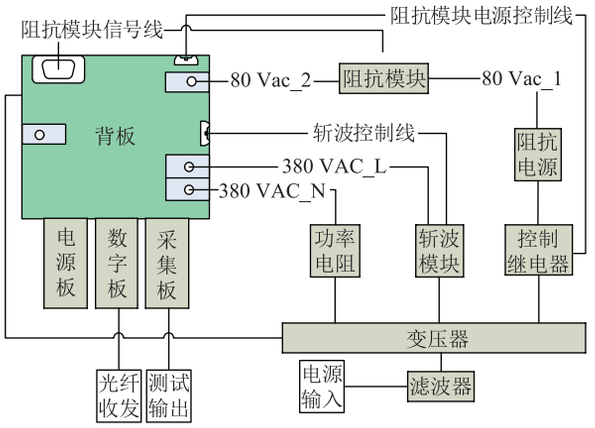


图 9 TBS 检测系统原理

Fig.9 Schematic of the TBS test system

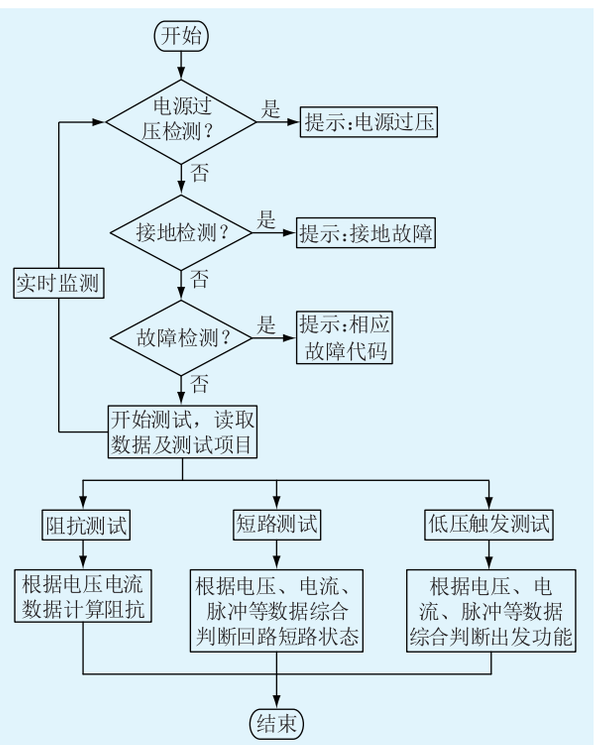


图 10 TBS 状态检测流程

Fig.10 Flowsheet of the TBS test system

Hz 和 10 kHz 3 个频率进行检测。其中高频阻抗主要反映阻尼电阻状态,低频阻抗主要反映阻尼电容状态。阻抗试验的电压、电流波形及其检测原理如图 11 所示。

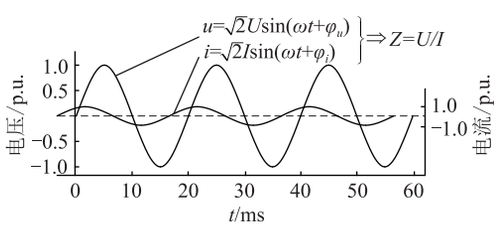


图 11 阻抗试验波形

Fig.11 Diagram of the resistance test

短路试验主要用于检测晶闸管级单元是否短路,其原理是对晶闸管级单元施加一定幅值的工频电压,通过检测回路电压、电流以及晶闸管控制单元(thyristor control unit, TCU)回报脉冲(indication pulse, IP)个数来判断晶闸管级单元是否短路。短路试验的电压、电流以及 IP 信号波形如图 12 所示。

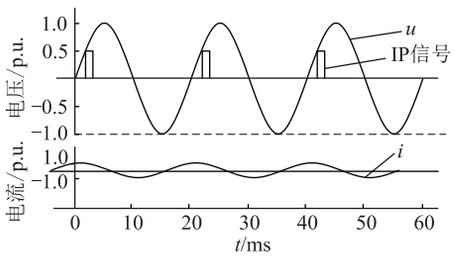


图 12 短路试验波形

Fig.12 Diagram of the short circuit test

低压触发试验用于检测 TBS 中的晶闸管能否正确地响应触发信号(fire pulse, FP)而导通,其原理是对晶闸管级单元施加工频电压,并在特定时刻对晶闸管发出触发命令,通过检测 TCU 回报脉冲以及回路电压、电流判断级单元状态[17—18]。低压触发试验是对晶闸管级单元基本功能的一个整体测试,任何元件的故障均有可能导致低压触发试验失败。低压触发试验的电压、电流、IP 以及 FP 信号波形如图 13 所示。

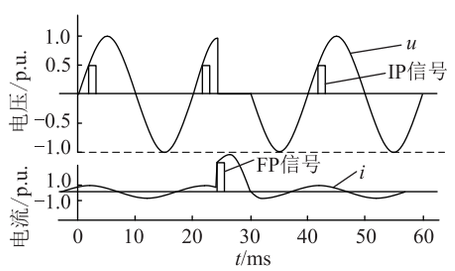


图 13 低压触发试验波形

Fig.13 Diagram of the low voltage triggering test

4 结语

文中介绍了 TBS 在 UPFC 中的作用,并介绍其原理构成以及主要部件的参数设计,通过了温升试验以及合成回路试验验证,在 220 kV 南京 UPFC 工程、500 kV 苏南 UPFC 工程中成功得到了应用。UPFC 中 TBS 应用是电力电子设备作为高压大容量超高速开关的突破性尝试,为电力电子设备的广泛应用引领了新的方向。

参考文献:

[1] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器技术及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.. Unified power flow controller technology and application [M]. Beijing: China Electric Power Press,2015.

[2] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器工程实践[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.. Unified power flow controller engineering practice [M]. Beijing: China Electric Power Press,2015.

[3] 瞿峰,邓凯,张赟,等. 500 kV 苏南 UPFC 接入对距离保护的影响及应对策略[J]. 电力工程技术,2018,37(2):27-32,43.
QU Feng, DENG Kai, ZHANG Yun, et al. Research on the effect of 500 kV UPFC in southern Suzhou on distance protection and the countermeasures[J]. Electric Power Engineering Teachnology, 2018, 37(2): 27-32,43.

[4] 张晓宇,顾乔根,文继锋,等. 统一潮流控制器系统串联变压器保护设计[J]. 电力系统自动化,2017,41(17):72-77.
ZHANG Xiaoyu, GU Qiaogen, WEN Jifeng, et al. Series transformer protection design in inified power flow controller system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 72-77.

[5] 陈葛松,林集明,郭剑波,等. 500 kV 串补站过电压保护研究[J]. 电网技术,2001,25(2):21-24.
CHEN Gesong, LIN Jiming, GUO Jianbo, et al. Overvoltage protection for 500 kV series compensation station [J]. Power System Technology,2001,25(2):21-24.

[6] 周启文,潘勇斌,王德昌,等. 500 kV 串补系统中火花间隙系统研究[J]. 高压电器,2012,48(8):40-44.
ZHOU Qiwen, PAN Yongbin, WANG Dechang, et al. Improvement of spark gap system for 500 kV series compensation system [J]. High Voltage Apparatus,2012,48(8):40-44.

[7] 祝谦,刘相枪. 平果可控串补本体保护介绍[J]. 电网技术,2004,28(16):73-77.
ZHU Qian, LIU Xiangqiang. Protection system of TCSC installed in pingguo series compensation station [J]. Power System Technology,2004,28(16):73-77.

[8] 潘磊,李继红,田杰,等. 统一潮流控制器的平滑启动和停运策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 159-164.
PAN Lei, LI Jihong, TIAN Jie, et al. Smooth start and stop strategies for unified power flow controllers[J]. Automation of Electric Power Systems ,2015, 39(12): 159-164.

[9] 尚勇,朱岸明,王敏,等. 高压大容量 SVC 阀组冷却系统优化设计[J]. 高压电器,2013(3):79-84.
SHANG Yong, ZHU Anming, WANG Min, et al. Optimal design of thyristor valve cooling-system for high-voltage and large capacity SVC [J]. High Voltage Apparatus,2013(3):79-84.

[10] 姜崇学,戴阳,王莹,等.统一潮流控制器保护功能配置研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 6-9.
JIANG Chongxue, DAI Yang, WANG Ying, et al. Research on protection function deployment for UPFC device [J]. Jiangsu Electrical Engineering ,2015, 34(6): 6-9.

[11] 鲁江,秦健,潘磊,等. 南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 1-5.

LU Jiang, QIN Jian, PAN Lei, et al. Study on architecture and configuration for control and protection system of Nanjing UPFC project [J]. Jiangsu Electrical Engineering ,2015, 34(6): 1-5.

[12] 童路,陈赤汉,谢门喜. 静止无功补偿器中的晶闸管阀组设计[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(1):33-37.
TONG Lu, CHEN Chihan, XIE Menxi. Design of thyristor valves block in static var compensator [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2011,32(1):33-37.

[13] 蔡晖,祁万春,黄俊辉,等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设,2015,36(8):73-78.
CAI Hui, QI Wanchun, HUANG Junhui, et al. Application of UPFC in Nanjing western power system [J]. Electric Power Construction,2015,36(8):73-78.

[14] 凌峰,李九虎,田杰,等. 适用于双回线路的统一潮流控制器系统结构优化分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 113-119.
LING Feng, LI Jiuhu, TIAN Jie, et al. Optimization analysis of UPFC system structure for double-circuit lines[J]. Automation of Electric Power Systems ,2015, 39(21): 113-119.

[15] 周强,邓凯,徐高,等. 500 kV 苏南 UPFC 晶闸管旁路开关分析及工程应用[J]. 电工电气,2018(5):37-41.
ZHOU Qiang, DENG Kai, XU Gao, et al. Analysis and engineering application of thyristor bypass switch in 500 kV unified power flow control in southern Suzhou [J]. Electrotechnics Electric,2018(5):37-41.

[16] 黄志高,潘磊,祁万春,等. 南京 UPFC 示范工程人工接地短路试验分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(6): 32-35.
HUANG Zhigao, PAN Lei, QI Wanchun, et al. Analysis ofartificial grounding test for Nanjing UPFC pilot project [J]. Jiangsu Electrical Engineering ,2016, 35(6): 32-35.

[17] 巴雅尔,谷劲松,刘爱民,等. SVC 装置阀组检测电路的研究[J]. 电力电容器,2006(6):8-11.
BA Yaer, GU Jinsong, LIU Aimin, et al. Research on valve block detection circuit of SVC device [J]. Power Capacitor, 2006(6):8-11.

[18] 刘纲,蔡晖,祁万春,等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(6):119-124.
LIU Gang, CAI Hui, QI Wanchun, et al. Study on application of 500 kV unified power flow controller at southern power system of Suzhou [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2017,38(6):119-124.

作者简介:



周启文

周启文(1976),男,硕士,高级工程师,从事柔性交流输电相关工作(E-mail:zhouqw@nrec.com);

丁峰峰(1984),男,硕士,工程师,从事柔性交流输电相关工作;

潘磊(1985),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术相关工作。

The application of thyristor bypass witch in UPFC

ZHOU Qiwen, DING Fengfeng, PAN Lei, FANG Taixun

(NR Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China)

Abstract: To prevent the series transformer and inverter valve from over-voltage in the Unified Power Flow Controller (UPFC) during system fault, the two wingdings of series transformer should be paralleled with fast bypass devices such as mechanical bypass switch, thyristor bypass switch (TBS), MOV and etc. TBS that utilizes the fast conduction of thyristor is studied. The overvoltage protection principle of UPFC is introduced first, then taking the Nanjing UPFC project as an example, the structure and parameters of TBS are designed, the components selection of TBS is introduced and the overvoltage matching between the BOD protection of TBS and MOV is checked. The performance of TBS is verified by maximum short-time current withstand test in the synthetic test circuit and temperature rise test. In the end, the structure and detection process of the state detection system of the TBS are introduced.

Keywords: unified power flow controller; thyristor bypass switch; valve test technology

(编辑 钱悦)