

# 统一潮流控制器保护功能配置研究

姜崇学<sup>1</sup>, 戴阳<sup>2</sup>, 王莹<sup>3</sup>, 何宏杰<sup>2</sup>

(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102;2.江苏省电力公司,江苏南京 210024;

3.江苏省电力设计院,江苏南京 211102)

**摘要:**统一潮流控制器(UPFC)能够灵活快速地控制线路潮流,改善电网的潮流分布。文中基于南京UPFC工程进行分析研究,从系统结构和故障测点出发,针对其双回线接入方式,提出了系统设备保护的关键需求。同时,构建了以网侧交流保护区、阀侧交流保护区和换流器保护区等组成的完整分区保护策略,以及以模块保护、阀控保护和系统保护等组成的多层次保护策略。保护系统及保护策略在基于RTDS仿真实验平台进行验证和分析,并给出实验结果。

**关键词:**UPFC;拓扑结构;故障点;保护策略

**中图分类号:**TM711

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2015)06-0006-04

统一潮流控制器(UPFC)作为功能最为全面的新一代柔性交流输电(FACTS)设备,能够对交流输电系统多个电气量实现独立、快速、准确的控制和动态补偿。它能合理地控制潮流,实现优化运行,提升电网供电能力;通过快速地无功吞吐,动态支撑相关变电站的电压水平,提高系统电压稳定性;改善系统阻尼特性,提高功角稳定性。UPFC对提高电网供电能力,改善电网潮流分布,提升系统电压水平起着至关重要的作用,因此UPFC本身的可靠性就显得更加重要。目前国内已有针对UPFC接入系统后与交流保护相互影响方面的研究,文献[1,2]中主要集中于线路上装设UPFC时对距离保护测量阻抗产生的影响,提出了解决方案;文献[3-5]对交流系统故障时UPFC动作响应和结果进行了研究,基于PSCAD/EMTDC仿真软件给出研究结果和解决方案。但还未有涉及UPFC自身设备的保护策略、保护功能配置以及自身保护与常规交流保护配合方面的研究。本文以南京UPFC工程为实例,在结合该工程系统拓扑结构的基础上,研究分析了UPFC设备可能出现的典型故障位置及类型,提出了交直流分区、设备分层的保护策略,建立了无死区、多层次完整的UPFC保护系统。

## 1 系统拓扑结构

南京UPFC工程采用双回线路接入方式。并联侧连接于35 kV交流母线,通过两回进线为UPFC供电,提高设备可靠性;串联侧分别通过不同串联变压器接入两回线路中。如图1所示。

工程配有3个相同参数的换流器,根据运行方式的不同选择一个或多个分别与不同交流侧进行连接。为了进一步提高UPFC系统可靠性、实现多种方式运行,在换流器与变压器之间增加转换隔离开关,通过

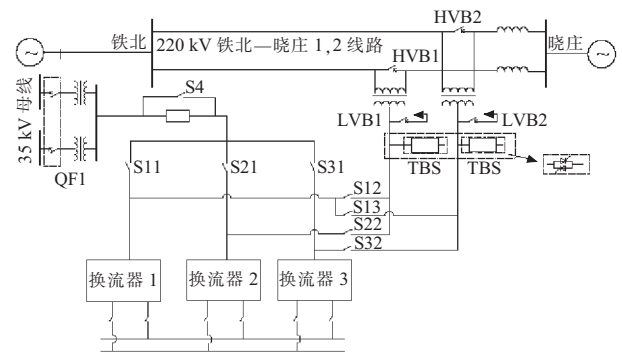


图1 南京UPFC拓扑结构

改变隔离开关的分合位置,使任一换流器均可以连接在并联或串联交流系统,达到换流器间冗余备用、运行方式灵活转换的目的

## 2 UPFC故障点分析

UPFC典型故障根据位置可分为区外系统故障、变压器与换流器之间故障、换流器故障和换流器间直流系统故障(此处未标出变压器本体故障)。按类型,则交流处包含单相接地、相间及相见接地等故障,换流器及直流处包括单极接地、双极短路、器件间短路故障等。UPFC设备正常运行时,并联连接部分与串联连接部分结构略有不同,为区分故障发生处,如图2和图3所示。

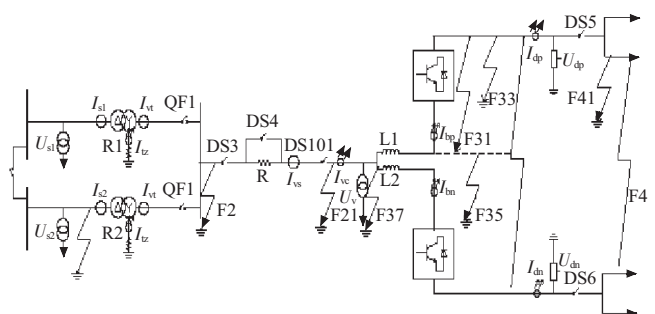


图2 并联连接系统故障点示意图

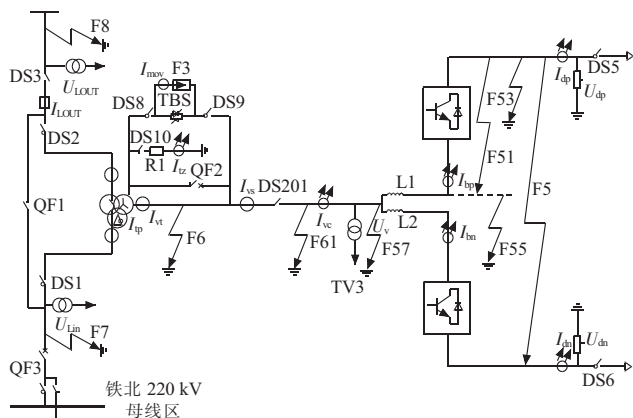


图3 串联连接系统故障点示意图

图2、图3中箭头为故障发生的位置,各故障点的含义内容如表1所示。

表1 UPFC系统典型故障点对应描述

故障类型	故障点编号
并联网侧故障	F1
阀侧交流短引线故障	F2, F6
阀侧交流母线故障	F21, F61
换流器出口短路故障	F3, F5
桥臂短路故障	F31, F51
直流母线单极接地故障	F33, F53
换流器电抗间故障	F35, F55
桥臂电抗器故障	F37, F57
直流连接线双极短路故障	F4
直流连接线单极接地故障	F41
线路母线侧故障	F7
线路系统侧故障	F8

表1中所列故障,会引起UPFC一系列电气量的异常,从而对主设备和换流器造成不同程度的威胁。如阀交流侧故障按照位置和类型的不同会导致该交流母线过流或造成差流,而母线过流会引发桥臂过流等,同时故障导致的阀侧电压不平衡进而使得直流电压也不平衡。又如直流母线短路,直流电压急剧降低,大电流流过桥臂会导致阀交流侧电流随之增大,而直流母线的故障会波及连接于该母线的换流器,因此整个设备都受到影响。由于UPFC故障有连锁反应,并且引发的反应不尽相同,因此保护的原理需要更加多样全面。兼顾保护的灵敏性、可靠性和速动性,划分保护区域的范围不宜过大,适当整定各保护的定值和动作时间,相互配合,充分发挥装置和器件的性能,才能有效保护UPFC设备。

### 3 保护解决方案

#### 3.1 分区保护策略

根据典型故障点的分析,针对不同区域和不同类型的故障,提出分区保护策略,如图4所示。

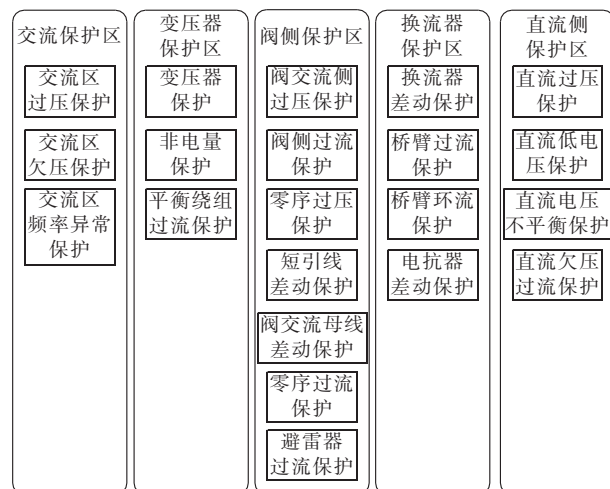


图4 UPFC系统分区策略

(1) 交流保护区包含变压器高压侧以外的区域,配置交流过压保护、交流欠压保护和频率异常保护。由于UPFC与电网紧密连接,所以系统交流的故障有可能对其造成影响;又因该区域属于UPFC区外,则需合理整定定值,使其动作可靠、准确,既UPFC本身的安全,又不会误动其他相邻设备甚至影响电力系统运行。

(2) 变压器保护区包括常规变压器保护和非电量保护,由于串联变压器的特殊性,增加了平衡绕组,因此在此区域内增设平衡绕组的过流保护。

(3) 阀交流侧保护区包含变压器低压侧至换流器之间区域,考虑故障位置和类型的多样化,配置阀侧过流保护、阀侧过压保护、零序过流(外接)保护、零序过压(自产)保护以及电流差动保护。此处以转换隔离刀闸为断点,分为引线差动保护和交流母线差动保护,根据运行方式的不同,交流侧与换流器并不是一一对应,因此参与差动保护的计算量的对应需要做一定的处理,保证此运行方式下差动保护正确动作且无死区。

(4) 换流器保护区包括换流阀及其桥臂电抗器等,配置桥臂过流保护、桥臂环流保护、电抗器差动保护和换流器差动保护。换流器结构复杂,器件对电流、电压和温度等灵敏,所以保护配置也相对复杂,动作过程和处理结果也与常规保护有些出入。

(5) 直流保护区负责直流连接线路的保护,包含直流过压保护、直流低电压保护、直流电压不平衡保护和直流欠压过流保护。当直流线路较长时,可增加对线路单独的直流线路纵差保护。

#### 3.2 分层保护策略

3.1节的分析从UPFC整体把握故障点分布,保护设备宏观故障,但如第(4)点所述,UPFC的换流器结构较为复杂,而其内部不同故障也不必要一致的动作结果,因此将换流器区域分层次处理,即换流器区保护单元分成子模块层保护子单元、阀控系统层保护子单元和换流器层直流控制保护子单元,如图5所示。

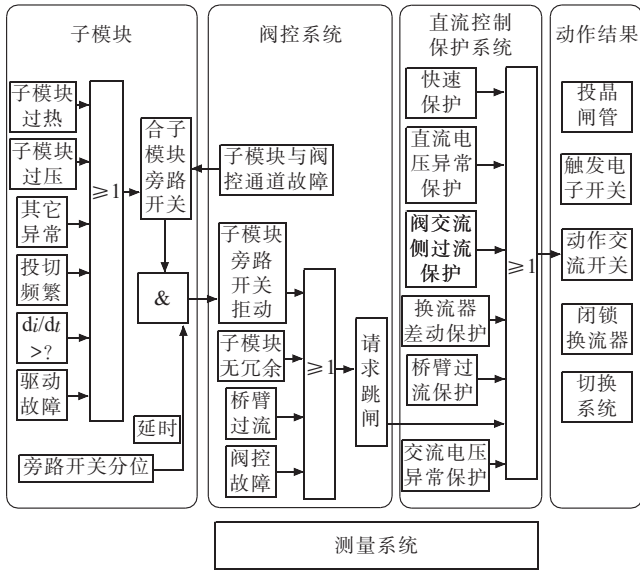


图 5 UPFC 系统分层策略

(1) 子模块是组成换流器的最小单元, 其单元内部包含自身的过热、过压、电流变化、投切频率等保护, 以及实时监测模块驱动系统是否正常。当子模块发现上述任一异常后, 会通过合自身的旁路开关达到隔离自己、消除故障的目的, 从而最大程度地减少系统的扰动, 避免个别子模块故障对整个阀组的影响, 保证系统稳定运行。但子模块自动旁路后不可自动回归。

(2) 阀控系统是直接对模块收发状态信号和指令的控制单元, 以桥臂为单位独立运行。阀控本身采集合并单元发送的桥臂电流流量并进行逻辑运算。当阀控系统检测到下属子模块自行旁路失败、与子模块通讯发生故障、子模块冗余个数不足、桥臂过流或者阀控装置本身故障时, 该阀控可快速闭锁该桥臂并发送请求跳闸信号, 通过上层控制保护系统断开交流开关。

(3) 当 UPFC 一次设备出现故障, 且如 3.1 节分区保护策略的动作结果, 此处不再赘述。

(4) UPFC 系统包含交直流多种电气量, 保护动作结果较为复杂, 单一通过控制交流开关不能完全满足切断故障的要求, 具体措施及含义, 如表 2 所示。

表 2 UPFC 动作结果解析

动作结果	具体含义
报警	后台事件显示
控制系统切换	可能由控制系统造成的故障, 通过切换系统可以消除
闭锁换流器	关断所有子模块
触发晶闸管旁路开关	通过晶闸管快速切断串入线路的 UPFC 设备
合串联变压器二次侧旁路开关	通过机械开关切断变压器低压侧串联的 UPFC 设备
合串联变压器一次侧旁路开关	通过机械开关切断串联侧 UPFC (含串联变压器)
并联交流断路器跳闸	断开并联侧交流系统
开关锁定	防止开关跳开后误操作

### 4 保护功能验证

为验证第 3 节中所述保护的策略及相关设备功能的正确性, 搭建了基于 RTDS 的 UPFC 实时试验仿真系统。系统完整模拟了南京西环网电网状况、并联和串联变压器、及 UPFC 设备等。试验系统中 UPFC 工况及额定参数与实际工程一致。具体设备参数如表 3 所示。

表 3 UPFC 仿真电气参数

电气一次参数	数值
并联交流电压 /kV	35
串联线路电压 /kV	230
阀侧电压 /kV	20.8
直流电压 /kV	20
并联变压器容量 /MV·A	60
串联变压器容量 /MV·A	40
桥臂模块个数 / 个	28
旁路开关合闸时间 /ms	40

模拟的故障中比较严重的两类故障波形如图 6 和图 7 所示。且分别是阀交流侧相间短路故障和阀组直流双极短路故障。图中波形自上至下依次表示阀侧电压  $U_V$ 、阀侧连接线两端电流  $I_{VS}, I_{VC}$ 、直流电流  $I_D$ 、直流电压  $U_D$  和保护动作信号。

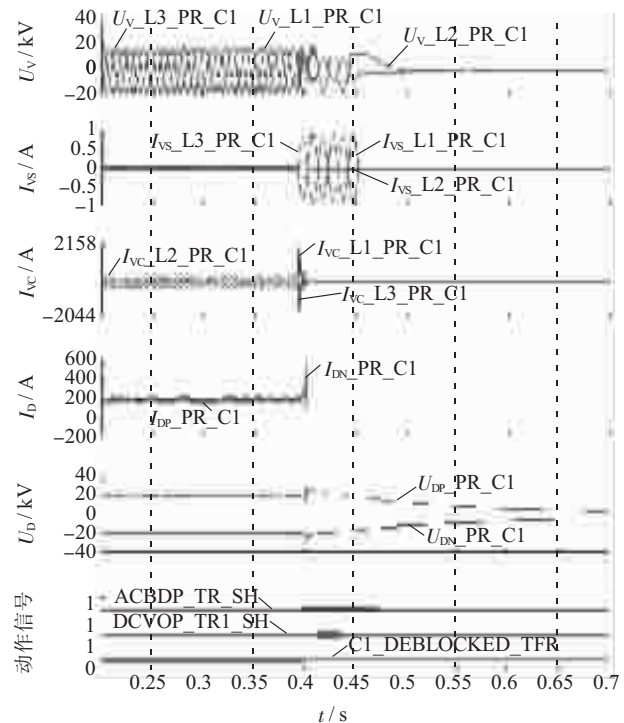


图 6 阀侧相间短路故障

从图 6 可看到, 在发生阀侧 AB 相间短路故障后,  $U_V$  的两相电压幅值相位相同, 近交流系统的阀侧电流  $I_{VS}$  两相突然增大且方向相反, 近换流器的阀侧电流  $I_{VC}$  先增大, 在换流器闭锁后电流减小, 直流电流突变后也由于换流器闭锁而降为 0, 直流电压无法突变, 经回路缓慢放电后降为 0, 故障由阀侧电流差动保护、直流低

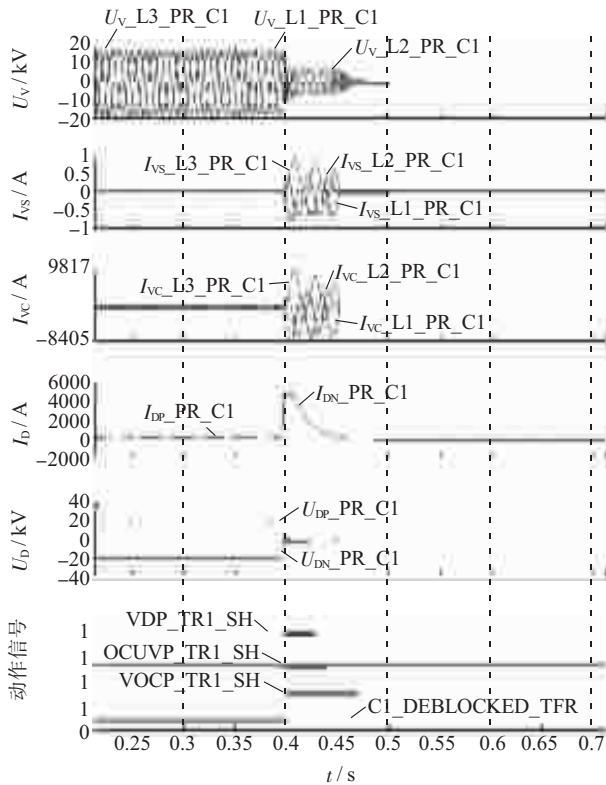


图7 直流双极短路故障

电压保护动作后切除,此时并联侧跳开交流开关,串联侧合旁路开关,所有的换流器均闭锁,从而有效地保护了换流器的安全。图7中,直流双极短路后直流电压瞬间下降,直流短路电流迅速上升并通过回路放电后回落, $I_{vs}$ 和 $I_{vc}$ 随之增大并保持幅值和相位一致。此时桥臂故障电流非常大,阀控系统对换流器进行快速的闭锁处理后故障由阀侧过流保护、直流低电压保护及换流器差动保护动作切除。换流器闭锁后,IGBT器件关断,故障电流只流经二极管,有效保护了器件的安全。

经上述分析可看出,UPFC系统出现故障时通常引发多处部件测量异常,前文提出的分区分层保护策略,可全面快速地切除各处故障,保证设备整体的安全。

## 5 结束语

UPFC是调节电力系统输电能力的重要设备,由于设备内部结构复杂,且受器件过流和过压能力的限制,对UPFC本体的保护提出了苛刻的要求。本文以南京UPFC工程为基础,对不同位置和类型的故障进行了分析,提出了故障的特点和保护需求,构建了电网系统交流区、阀侧交流区和换流器区组成的分区域以及由子模块层、阀控系统层和直流保护系统层组成的多层次的完整的保护系统及保护策略。UPFC故障的检测方法和主要保护策略经过了RTDS仿真试验系统的验证,可以有效保护设备的安全。南京UPFC工程作为国内首个应用,其控制保护技术还需经受实际故障地检验,并随着应用的发展而进一步完善。

### 参考文献:

- [1] 刘青,魏清,王增平.统一潮流控制器对距离保护影响的分析[J].电力科学与工程,2005,21(1):76-78.
- [2] 刘恩德.统一潮流控制器的存在对距离保护的影响[J].国际电力,2002,01(6):43-46.
- [3] 温家良,姜为华,陈文忠,等.线路故障下UPFC的响应及其保护的仿真研究[J].电瓷避雷器,2015,264(2):109-113.
- [4] 杨杰,郑健超,汤广福,等.电压源换相HVDC站内交流母线故障特性及保护配合[J].中国电机工程学报,2010,30(16):6-11.
- [5] 张振华,江道灼.基于MMC拓扑的UPFC控制策略仿真研究[J].电力系统保护与控制,2012,39(3):73-77.

### 作者简介:

- 姜崇学(1987),男,黑龙江佳木斯人,工程师,从事特高压直流输电及柔性直流输电控制保护研究工作;
- 戴阳(1978),男,江苏泰州人,工程师,从事电网工程建设管理、智能电网应用、电网新技术应用等方面的工作;
- 王莹(1986),女,江苏常州人,工程师,从事电力规划研究工作;
- 何宏杰(1981),男,浙江德清人,高级工程师,从事电网工程建设管理、智能电网应用、电网新技术应用等方面的工作。

## Research on Protection Function Deployment for UPFC Device

JIANG Chongxue<sup>1</sup>, DAI Yang<sup>2</sup>, WANG Ying<sup>3</sup>, HE Hongjie<sup>2</sup>

(1. Nanjing Nari-relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

3. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The UPFC is capable to control the power flows over transmission lines and to improve the distribution level of power flows in power grid. Based on the Nanjing UPFC project, the protection function deployment for the UPFC device with double circuit line connection mode is proposed. A complete partition protection strategy consists of grid-side AC protection zoon, valve-side AC protection zoon and converter protection zoon and a multi-level protection strategy composed of module protection, valve-controller protection and system protection are provided. The proposed protection system and strategy have been tested in RTDS, and the testing results are presented.

**Key words:** unitied power flow controller( UPFC); topological structure; fault point; protection strategy