

苏南 UPFC 工程保护配合策略研究

张宝顺¹, 董云龙¹, 潘磊¹, 陆翌², 黄如海¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:统一潮流控制器(UPFC)是一种能够独立、快速、精确、连续控制系统电压和潮流的最新一代柔性交流输电系统装置,为解决城市电网发展受限问题提供了有效手段。文中针对苏南 UPFC 工程中保护配置展开研究,介绍了 UPFC 本体保护的三取二功能以及 UPFC 的重启策略,在继电保护配置情况及动作策略基础上,提出了 UPFC 本体保护与交流线路、变压器保护等保护的配合策略。并结合 500 kV 苏州南部电网 UPFC 工程实时数字仿真(RTDS)与入网系统调试,给出实际保护配合策略的功能和效果,试验结果表明可有效保护 UPFC。

关键词:统一潮流控制器;保护配合;重启策略

中图分类号: TM771

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)01-0132-08

0 引言

作为最新一代柔性交流输电系统装置,统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)能够同时控制线路阻抗、电压幅值和相角,进而优化区域潮流分布,可以解决城市电网关键输电断面输电能力不足且新建输电通道受限等问题^[1-3]。UPFC 基本调节功能由并联侧和串联侧换流器共同作用实现,其中并联侧换流器经并联变压器输出补偿电流,向串联换流器提供有功功率,维持直流电压恒定;同时发出或吸收无功功率,调节交流母线电压。串联侧换流器经串联变压器向交流线路注入幅值和相位角均可控的电压矢量,实现潮流控制。

国内外的研究多集中在拓扑、控制策略、系统架构、保护等方面,如平滑启停策略^[4]、系统控制策略^[5]、工程化的控制保护系统架构^[6]等。在保护方面,本体保护配置、控制保护系统设计、关于本体保护对系统的影响的研究^[7-17]开展较多,对于本体保护间、本体保护与其他保护之间的配合逻辑研究较少。

文中针对 UPFC 工程中保护配置展开研究,提出了 UPFC 本体保护的三取二功能以及 UPFC 故障情况下运行策略,提出了 UPFC 本体保护与交流线路、变压器保护等保护的配合策略。通过 500 kV 苏州南部电网 UPFC 示范工程入网给出了实际保护配合策略的功能和效果,提出的保护配合策略为其他 UPFC 工程提供了有益经验。

收稿日期:2018-08-03;修回日期:2018-10-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903100);

国家电网有限公司科技项目(521104170043)

1 苏南 UPFC 工程概述

苏南 UPFC 工程是世界上电压等级最高、容量最大的 UPFC 工程,于 2017 年 12 月 19 日投运。苏州南部电网包括苏州市区及吴江地区,主要电源特高压锦苏直流季节性强,苏南 UPFC 工程对 500 kV 木渎变到梅里变的双回线路潮流进行直接控制,以解决冬季直流小方式下受不满、电网动态无功支撑不足、直流换相失败风险大、夏季直流大方式双极闭锁后应急拉限电多等问题。苏南 UPFC 工程将提升苏州南部 500 kV 电网接纳特高压来电的安全稳定水平,带来显著的经济与社会效益。

苏南 UPFC 工程的系统结构如图 1 所示,采用模块化多电平(modular multilevel converter, MMC)电压源换流器,3 台换流器容量均为 250 MV·A,串联侧 2 个换流器通过 2 台串联变压器接入木渎—梅里 500 kV 双回线路。并联侧 1 个换流器通过启动电阻接至并联变压器后再接入木渎 500 kV 母线,在并联变压器的阀侧和网侧分别配置交流断路器,此外并联变压器还有接至站用变的第三绕组,站用变侧也配置了断路器。串联变压器网侧配置 1 台旁路断路器,阀侧配置 1 台旁路断路器和 1 台晶闸管旁路开关(thyristor bypass switch, TBS)。3 个换流器采用背靠背连接方式,通过刀闸实现直流侧的隔离或连接,直流母线电压为±90 kV。

苏南 UPFC 工程有 3 种运行方式,双线 UPFC 运行方式为 1 号换流器并联接入 500 kV 母线,2 个串联换流器通过串联变压器串联接入 500 kV 双回线路,3 个换流器直流侧均连接;单线 UPFC 运行方式为 1 号换流器并入 500 kV 母线,1 个串联换流器

通过串联变压器串联接入 500 kV 一回线路,另一回路停运,仅上述 2 个换流器直流侧连接;静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)运行方式为 1 号换流器通过并联变压器接入 500 kV 母线,换流器直流侧均隔离。

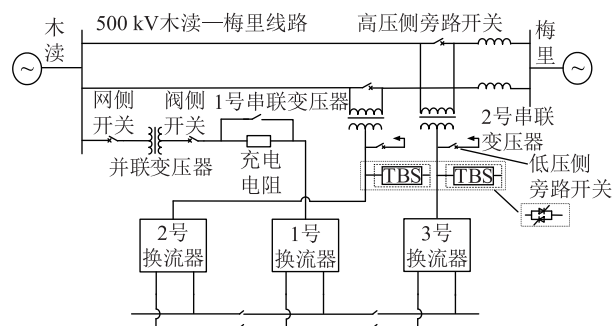


图 1 苏南 UPFC 工程系统结构

Fig.1 The structure of southern Suzhou UPFC project

2 UPFC 保护系统

苏南 UPFC 控制系统与保护系统独立,控制系统实现对整个 UPFC 系统及所有设备的控制、监视和保护。控制系统分为系统层、换流器层及阀控制层,同时按分区对 2 个串联侧换流器和并联侧换流器分别进行控制,共配置 3 套控制主机。

UPFC 系统的保护总体按保护对象就地分布配置,UPFC 本体保护配置 3 套保护主机,采用三取二的配置方案。UPFC 并联、串联侧电路结构不一致,将保护区域分成并联换流器区和串联换流器区 2 个区再根据各自特点分别进行保护配置,实现保护的全覆盖。每个换流器区还可细分为交流区、换流阀区和直流区。当 UPFC 本体故障或交流电网发生危及 UPFC 运行的故障时,UPFC 通过自身的控制保护系统,闭锁相应换流阀,串联侧通过 TBS 快速隔离 UPFC 串联侧,再由机械旁路开关承受故障电流。

除本体保护之外,UPFC 串、并联变压器分别配置变压器保护装置,交流线路由交流线路保护装置和母线保护装置进行保护。其中并联侧配置 2 套并联变压器电量保护、1 套并联变压器非电量保护,每一串联侧各配置 2 套串变电量保护、1 套串变非电量保护。木渎—梅里双回线路各配置 2 套线路保护,并且 UPFC 并变、串变至木渎母线的气体绝缘输电线路(gas insulated line, GIL)配置相应的保护,各保护的主保护范围如图 2 所示。

UPFC 保护系统对大部分故障提供 2 种及以上原理保护以及主后备保护。UPFC 本体保护、变压器保护、线路保护、母线保护范围互相交叉重叠,保证交直流区域全覆盖,无死区,并且合理配置冗余。

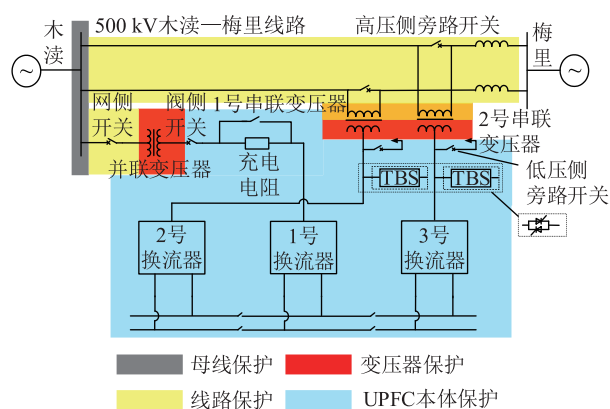


图 2 苏南 UPFC 工程保护范围

Fig.2 The protection area of southern Suzhou UPFC project

各保护之间相互配合,但灵敏度有较大差异,只以自身为保护对象,不作为其他设备后备保护。

3 保护配合

3.1 本体保护的三取二功能

UPFC 本体保护采用三重化配置,出口采用三取二逻辑判别。UPFC 系统的 3 套保护分别通过光纤与冗余的三取二装置中的通信。三取二装置接收各套保护分类动作信息,其三取二逻辑出口实现跳并联变压器进线开关、合串联变压器高/低压侧旁路开关、触发 TBS 导通、启动开关失灵保护等功能。此外,为减少保护动作过程中由于保护主机与三取二装置通信引起的延时等问题,在三取二装置内增加换流器过流快速保护。三取二装置内部是保护逻辑和启动逻辑分别对故障进行判断,同时满足才动作,对 2 套保护三取二,只要 1 套满足动作条件就出口。

每套保护主机以光纤方式连接到冗余的交换机与控制主机进行通信,传输经过校验的数字量信号。各控制主机同样接收各套保护分类动作信息,通过相同的三取二保护逻辑出口,实现闭锁换流器、跳并联变压器进线开关、合串联变压器高/压侧旁路开关、触发 TBS 导通、启动开关失灵保护等功能。在保护动作后,如极端情况下冗余的三取二装置出口未能跳开并联变压器进线开关或未合串联变压器旁路开关,控制主机也将完成对相应开关动作的控制工作。保护三取二功能如图 3 所示。

三重保护与三取二逻辑构成一个整体,3 套保护主机中有 2 套或以上相同类型保护动作被判定为正确的动作行为,才允许出口闭锁或跳闸,以保证可靠性和安全性。并且当 3 套保护系统中有 1 套保护因故退出运行后,采取二取一逻辑;当 3 套保护系

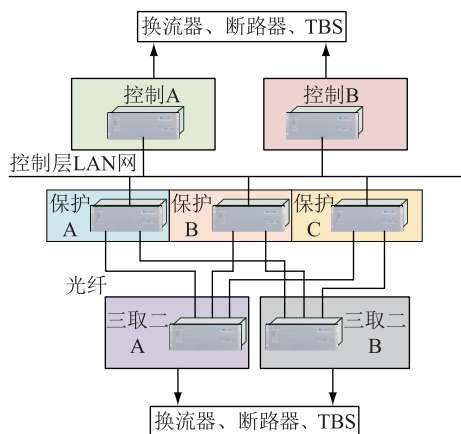


图3 UPFC保护的三取二功能

Fig.3 The 2 out of 3 function of UPFC protection

统中有 2 套保护因故退出运行后,采取一取一逻辑;当 3 套保护系统全部因故退出运行后,UPFC 系统紧急停运,退出运行。

由于各保护主机送出至三取二装置和控制主机的均为数字量信号,三取二逻辑可以按保护类型实现,正常时只有 2 套以上保护有同一类型的保护动作时,三取二逻辑才会出口。且根据具体的保护动作类型判别,而不是简单地取跳闸接点相“或”。

3.2 故障情况下运行方式策略

外部交流电网短时异常造成 UPFC 停运,削弱了 UPFC 在电网暂态中的调节作用,并且大多数线路故障通过重合闸能够被清除,因此外部交流电网异常与线路故障而停运的 UPFC,应当在线路恢复运行后投入。可能引起 UPFC 串联侧阀侧过电流的故障主要包括串联变压器故障、线路故障和电网远端故障。根据影响 UPFC 正常运行的不同故障类型,UPFC 动作原则如下:

(1) 当电网为远端故障影响 UPFC 安全运行时,将串联侧短时隔离,电网恢复后重启 UPFC 串联侧。(2) 当串联变压器故障时,将 UPFC 停运,并旁路,以保证线路正常运行。(3) 故障清除后线路重合成功则 UPFC 应重启投入,对线路不重合或重合不成时,UPFC 相应串联侧退出运行。(4) 并联侧不具备运行能力的,在串联侧隔离的基础上,将闭锁并联侧换流器,断开并联侧进线开关,完成 UPFC 系统与电网的整体隔离,停运 UPFC 系统。

3.3 本体保护与其他保护的配合

如前所述,各套 UPFC 保护的数字量信息送至三取二装置,且除母线保护与并变 GIL 保护之外,非 UPFC 本体保护的各套保护主机的保护动作信息送至三取二装置,并由三取二装置用光纤连接到冗余的交换机送至控制主机。

相应的,三取二装置与控制主机的开关量输出除了跳并联变压器高、低压侧断路器与合串联侧高、低压侧旁路开关合闸之外,三取二装置与控制主机至并联侧的开关量输出包括两路启动并联侧高压开关的失灵信号与一路跳并联变压器三侧开关命令至并变非电量保护。三取二装置至串联侧的开关量输出信号包括两路串变电量保护的联跳信号与两路高压侧旁路开关的启失灵信号。串联侧控制主机的开关量输出包括两路串变电量保护的阀闭锁信号。图 4 为三取二装置与控制主机至变压器保护的开关量输出信号示意,3 号换流器控制主机与 2 号换流器相同,图 4 中省略。

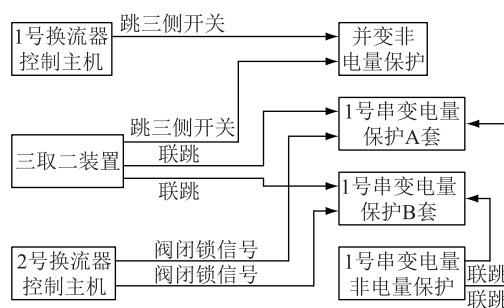


图4 保护主机与三取二装置到变压器保护的开关量输出

Fig.4 The digital output of controller and 2 out of 3 device to transformer protections

并变电量保护的主保护为差动保护,动作结果为跳并联变压器三侧开关,后备保护的动作结果为跳本侧开关,并变非电量保护动作跳并联变压器三侧开关,并且有三取二与控制主机的联跳信号开关量输入。UPFC 本体保护收到并联变压器保护的数字量信息之后跳交流断路器并锁定、闭锁并联侧与串联侧换流器,联动串联侧开关并触发串联侧 TBS。

串变电量保护的主保护动作结果为合并联变压器高、低压侧旁路开关,后备保护动作结果为合本侧开关。串变非电量保护动作会合高、低压侧旁路开关,联跳电量保护。UPFC 本体保护收到串变保护的数字量信息后合高压低侧旁路开关并锁定,闭锁换流阀,触发串联侧 TBS,联跳变压器保护。

UPFC 双回线路与串变 GIL 线路上任一侧保护动作后将跳线路开关并起失灵。UPFC 本体保护收到线路保护的数字量信息后合高低压侧旁路开关、换流阀闭锁、触发串联侧 TBS 并跳变压器保护。

4 仿真试验

基于苏州南部电网相关数据构建实时数字仿真(real-time digital simulation, RTDS)模型,包含 UPFC 线路附近的详细系统模型,UPFC 设备的详细

模型。在此仿真模型基础之上,设置系统处于双回 UPFC 运行方式下,对于含 UPFC 输电线路本线以及相邻线路、串联变压器、直流母线等模拟各种类型故障,考核相关保护逻辑的正确性。其中,系统按照实际苏州南部电网网架结构搭建。

4.1 区内金属性瞬时故障

分别模拟线路保护区内点金属性瞬时短路故障,故障类型包含单相接地、两相短路接地、两相相间短路、三相短路故障。

线路保护发出跳闸信号(16.9~23.94 ms),随后发出闭锁信号(22.78~28.03 ms)。

GIL 区内故障时,GIL 线路保护首先发出三相跳闸信号(18.6~21.1 ms),随后发出闭锁信号(23.3~26.8 ms);GIL 区外故障时,GIL 线路保护不动作。

断路器保护首先跳闸(59.49~66.65 ms);GIL 区外单相故障时,断路器保护重合闸(1 355~1 368 ms);多相故障或 GIL 区内单相故障时,断路器保护随后不重合闸。

串变保护收到 UPFC 本体保护动作信号后,合网侧旁路和阀侧旁路(24.1~55.11 ms)。

4.2 区内金属性永久故障

分别模拟线路保护区内金属性永久短路故障,故障持续时间设置为 1 800 ms。

线路保护发出跳闸信号(17.3~21.6 ms),随后发出闭锁信号(23.9~27 ms);GIL 区外单相故障时,再次发出跳闸信号(1 453~1 456 ms),随后再次发出闭锁信号(1 458~1 462 ms);多相故障或 GIL 区内单相故障时,线路保护不再发出跳闸信号和闭锁信号。GIL 区内故障时,GIL 线路保护首先发出三相跳闸信号(18.8~22.5 ms),随后发出闭锁信号(23.2~28 ms);GIL 区外故障时,GIL 线路保护可靠不动作。断路器保护首先跳闸(60~64.7 ms);GIL 区外单相故障时,断路器保护随后重合闸(1 351~1 361 ms),断路器保护接着再次跳闸(1 496~1 500 ms);多相故障或 GIL 区内单相故障时,断路器保护随后不重合闸和再次跳闸。串变保护收到 UPFC 本体保护动作信号后,正确合网侧旁路和阀侧旁路(24.7~57.4 ms);GIL 区外单相故障时,串变保护再次收到 UPFC 本体保护动作信号,再次合网侧旁路和阀侧旁路(1 490~1 492 ms);多相故障或 GIL 区内单相故障时,串变保护不再动作。

4.3 区内经过渡电阻故障

分别模拟线路保护区内经过渡电阻瞬时短路故障,包含单相接地、两相相间短路。过渡电阻以故障点电流一次值大于 800 A 为依据进行设定。

线路保护发出跳闸信号(19.7~107 ms),随后发出闭锁信号(25.7~108 ms)。

GIL 区内故障时,GIL 线路保护首先发出三相跳闸信号(20.2~71.8 ms),随后发出闭锁信号(25~65.7 ms);GIL 区外故障时,GIL 线路保护可靠不动作。

断路器保护首先跳闸(62.3~149.5 ms),当木渎侧开关电流低于有流门槛时,木渎侧开关断路器保护不跟跳;GIL 区外单相故障时,断路器保护随后重合闸(1 345~1 399 ms);多相故障或 GIL 区内单相故障时,断路器保护随后不重合闸。

串变保护收到 UPFC 本体保护动作信号后,合网侧旁路和阀侧旁路(32.8~131.9 ms)。

4.4 串变故障

(1) 模拟串联变压器网侧绕组匝间、阀侧绕组匝对地、阀侧绕组匝间故障:线路保护、GIL 线路保护、断路器保护均可靠不动作。

(2) 模拟串联变压器网侧绕组经过渡电阻瞬时短路故障:线路保护发出跳闸信号(22.6~24.7 ms),随后发出闭锁信号(28.3~30.8 ms)。GIL 线路保护发出跳闸信号(23~25.1 ms),随后发出闭锁信号(27.5~30.6 ms)。断路器保护跳闸(64.3~73 ms),当木渎侧中开关电流低于有流门槛时,木渎侧中开关断路器保护不跟跳。

4.5 UPFC 本体故障

模拟 UPFC 串联变压器阀侧连接线路、UPFC 直流母线单极接地故障、UPFC 直流母线双极短路故障:线路保护、GIL 线路保护、断路器保护均可靠不动作。串变保护收到 UPFC 本体保护动作信号后,合网侧旁路(25.4~32.19 ms)和阀侧旁路(26.13~32.85 ms)。

4.6 断路器失灵故障

模拟木渎侧边断路器 A 相失灵,校核断路器保护动作性能。

木渎侧边开关失灵时:木渎侧线路保护发出单相跳闸信号(18.3~20.6 ms),随后发出闭锁信号(24.3~27 ms),单跳失败发出三相跳闸信号(127~171 ms);梅里侧线路保护发出单相跳闸信号(18.1~21.1 ms),随后发出闭锁信号(23.2~26.5 ms);GIL 区外故障时,梅里侧断路器重合失败后,梅里侧线路保护发出三相跳闸信号(1 517 ms);GIL 区内故障时,梅里侧线路保护不再发出三相跳闸信号。重合加速跳闸后木渎侧边开关失灵时:木渎侧和梅里侧线路保护发出单相跳闸信号(17.1~20.2 ms),随后发出闭锁信号(22~26.6 ms),断路器重合失败

后,木渎侧和梅里侧线路保护发出三相跳闸信号(1 452~1 453ms)。

GIL 区内故障时,GIL 线路保护发出三相跳闸信号(20.1~21 ms),随后发出闭锁信号(25~26.7 ms);GIL 区外故障时,GIL 线路保护不动作。

木渎侧边开关失灵且 GIL 区内故障时:木渎侧和梅里侧断路器保护三相跳闸(61~63 ms);木渎侧边开关断路器保护发出失灵信号(258 ms)。木渎侧边开关失灵且 GIL 区外故障时:木渎侧和梅里侧断路器保护单相跳闸(60.5~64.7 ms);木渎侧断路器保护单跳失败三相跳闸(214~215 ms);木渎侧边开关断路器保护发出失灵信号(262 ms);梅里侧断路器保护重合闸(1 403~1 407 ms),重合失败后,梅里侧断路器保护三相跳闸(1 559~1 560 ms)。重合加速跳闸后木渎侧边开关失灵且 GIL 区外故障时:木渎侧和梅里侧断路器保护单相跳闸(58.7~63.3 ms),随后重合闸(1 347~1 357 ms),重合失败后,三相跳闸(1 495~1 496 ms);木渎侧边开关断路器保护发出失灵信号(1 693 ms);若不是 A 相故障,木渎侧边开关断路器保护不发出失灵信号。

串变保护收到 UPFC 本体保护动作信号后,合网侧旁路和阀侧旁路(28.4~57 ms)。

5 系统试验

为保证工程安全有效运行,苏南 UPFC 入网应用前通过系统试验验证了功能和性能水平。系统试验中相关的保护试验如下:

(1) 在控制主机中,模拟线路电压异常判据满足,再模拟三取二装置中 2 号换流器阀侧快速过流保护动作。模拟线路电压异常目的是使控制主机将造成 2 号换流器快速过流的原因判断为外部交流电网故障,在故障消失后会执行 UPFC 重启逻辑。试验结果如图 5 所示,故障发生后三取二装置合高低压侧旁路开关并触发 TBS 导通,保护跳闸闭锁以及 UPFC 系统重启行为正确。

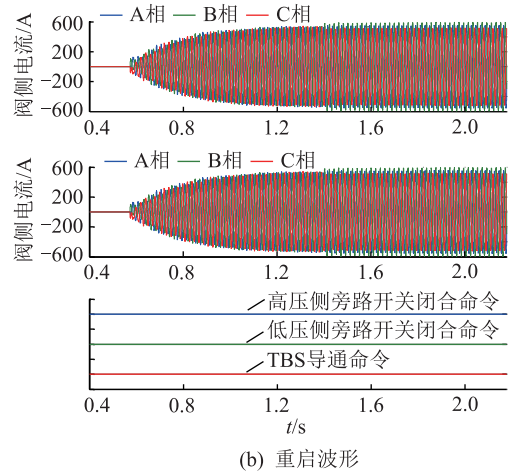
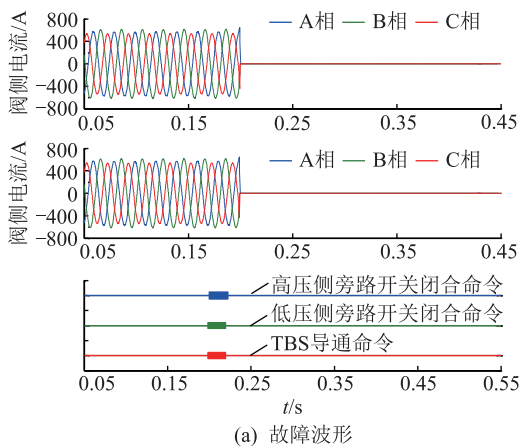


图 5 换流器 2 快速过流保护动作与重启波形
Fig.5 Waveform when fast overcurrent protection action of converter 2

(2) 在换流器 1、2 运行的单线 UPFC 运行方式下,模拟 2 号换流器相关外部线路保护动作出口闭锁换流阀,在故障消失后会执行 UPFC 重启逻辑。保护主机录波见图 6、图 7,故障时刻直流电压电流有小幅波动,换流器 1 正常运行,2 号换流器的 TBS 导通,保护跳闸闭锁以及 UPFC 系统重启行为正确。

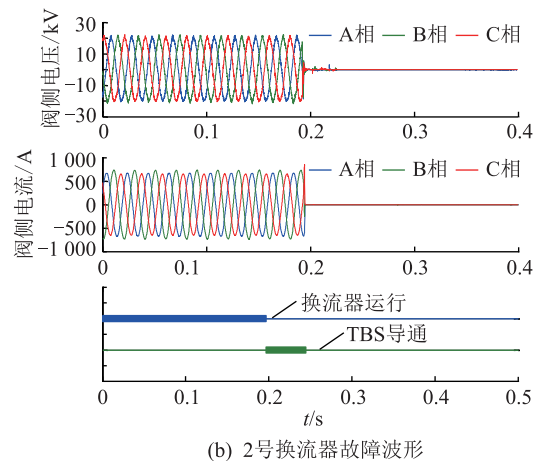
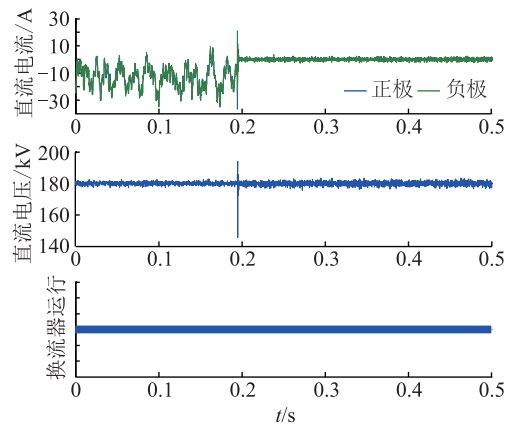


图 6 线路 1 故障时保护动作波形
Fig.6 Waveform when line1 fault

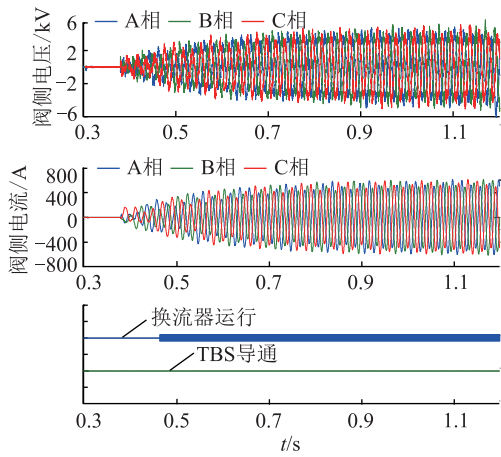
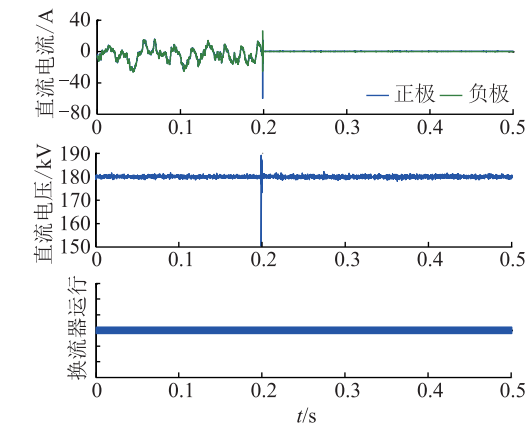


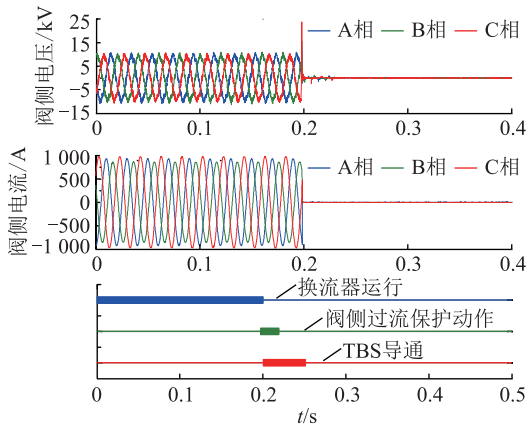
图7 线路1故障时重启波形

Fig.7 Restart waveform when line 1 fails

(3) 在换流器 1、3 运行的单线 UPFC 运行方式下,首先在控制主机中模拟线路电压异常判据满足,再模拟 2 套保护主机中 2 号换流器阀侧过流保护动作。保护主机的故障及重启录波如图 8、图 9 所示,保护跳闸闭锁、三取二功能以及 UPFC 系统重启行为正确。



(a) 1号换流器故障波形



(b) 3号换流器故障波形

图8 换流器 2 阀侧过流保护动作波形

Fig.8 Inverter 2 valve side overcurrent protection action waveform

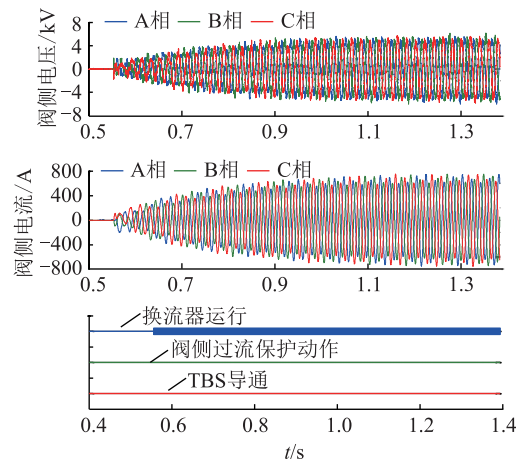
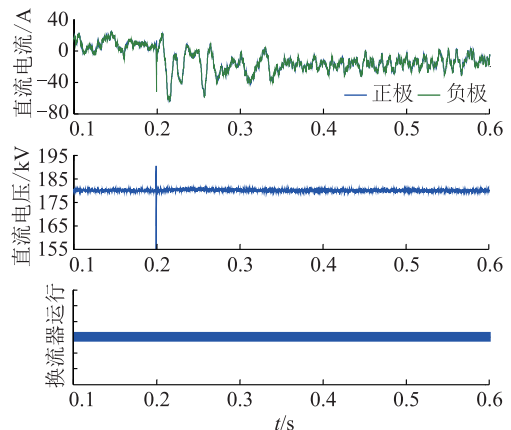


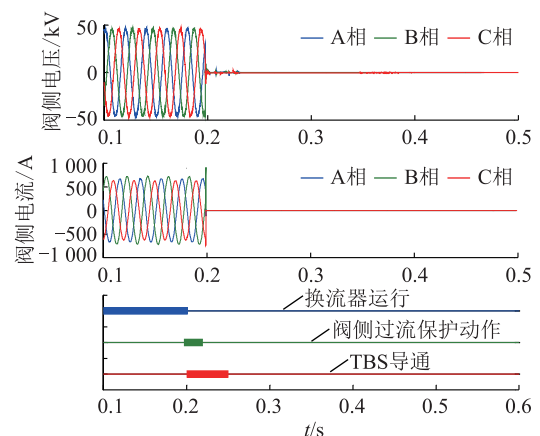
图9 换流器 2 阀侧重启波形

Fig.9 Inverter 2 valve side restart waveform

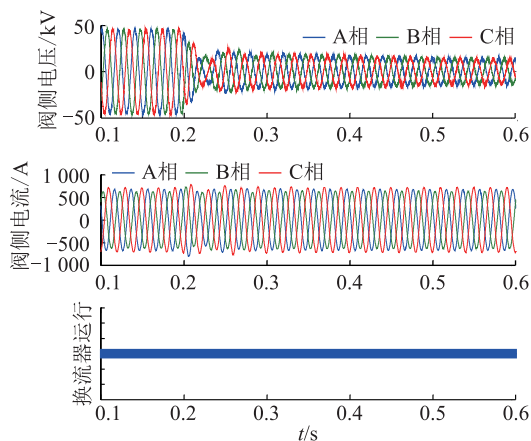
(4) 在双回 UPFC 运行方式下,将 CPRC 置为试验,Cpra 中模拟 2 号换流器阀侧过流保护动作。此时未在控制主机中模拟线路电压异常,因此控制主机将造成 2 号换流器阀侧过流的原因判断 UPFC 内部故障造成的阀侧过流,因此故障消失后串联侧不重启。保护主机的录波如图 10 所示,保护跳闸闭锁行为正确,同时一套保护主机退出运行后的二取一功能也得到了验证。



(a) 1号换流器故障波形



(b) 2号换流器故障波形



(c) 3号换流器故障波形

图10 换流器2 阀侧过流保护动作波形

Fig.10 Fault waveform when valve side overcurrent of converter 2

6 结论

文中提出 UPFC 系统保护配合策略,并通过西南 UPFC 入网系统调试得到了验证,结论如下:

(1) 在独立的三取二装置和控制主机中分别实现“三取二”功能,保护动作可靠有效。

(2) 对于不同故障区域和类型,UPFC 重启策略提出相应动作行为,并实现了与交流保护动作配合,在故障恢复瞬间进行重启,减少 UPFC 退出运行时间,提高了 UPFC 故障穿越性能。

(3) 通过 UPFC 本体保护与变压器保护、线路保护相互配合,能够可靠保护 UPFC。

参考文献:

- [1] 国网江苏省电力有限公司. 统一潮流控制器技术与应用 [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] 刘建坤,李群. 计及统一潮流控制器的可用输电能力计算方法[J]. 陕西电力,2017,45(2):49-53,77.
LIU Jiankun, LI Qun. Calculation method for available transfer capacity considering UPFC[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(2):49-53,77.
- [3] 钱锋,王永,胡剑锋,等. 基于 PSS/E 的统一潮流控制器仿真建模[J]. 广东电力,2017,30(11):61-66.
QIAN Feng, WANG Yong, HU Jianfeng, et al. Simulation modeling for unified power flow controller based on PSS/E[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(11):61-66.
- [4] 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 controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):159-164.

- [5] 祁万春,杨林,宋鹏程,等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术,2016,40(1):92-96.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(1):92-96.
- [6] 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.
- [7] 宋洁莹,吴丹,陆振纲,等. MMC-UPFC 本体保护系统研究[J]. 智能电网,2015,3(10):948-955.
SONG Jieying, WU Dan, LU Zhengang, et al. Research on the control and protection system of MMC-UPFC [J]. Smart Grid, 2015, 3(10):948-955.
- [8] 申淑丽,周渊深. 改进预测直接功率控制的 UPFC 控制策略[J]. 广东电力,2018,31(1):93-98.
SHEN Shuli, ZHOU Yuanshen. UPFC control strategy based on improved predictive direct power control [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1):93-98.
- [9] 姜崇学,张建锋,戴阳,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, ZHANG Jianfeng, DAI Yang, et al. Study on protection configuration for UPFC [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):6-9.
- [10] 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,2015,34(6):6-9.
ZHANG Xiaoyun, GU Qiaogen, WEN Chongxue, et al. Study on protection configuration for UPFC [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):6-9.
- [11] 林金娇,李鹏,孔祥平,等. 南京西环网 UPFC 保护系统及配合策略[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):56-60.
LIN Jinjiao, LI Peng, KONG Xiangping, et al. Study on protection configuration for UPFC [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):56-60.
- [12] 孔祥平,袁宇波,高磊,等. 含 UPFC 线路的距离保护方案研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5219-5226.
KONG Xiangping, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. Study of distance protection scheme for transmission line including UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19):5219-5226.
- [13] BHUPENDRA K, ANAMIKA Y. Backup protection scheme for transmission line compensated with UPFC during high impedance fault and dynamic situations[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2017, 11(6):703-712.
- [14] 丁久东,田杰,刘奎,等. 柔性直流输电对交流系统负序方向元件影响分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):113-117.
DING Jiudong, TIAN Jie, LIU Kui, et al. Impact of VSC-HVDC on negative directional component in alternating current system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):113-117.
- [15] 谢华,潘磊,赵青春,等. 统一潮流控制器与串补对线路保

- 护影响的比较分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(04): 137-142.
- XIE Hua, PAN Lei, ZHAO Qingchun, et al. Research on the effect of UPFC and SC on line protection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 93-98.
- [16] TRIPATHY L N, DASH P K, SAMANTARAY S R. A new cross-differential protection scheme for parallel transmission lines including UPFC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1822-1830.
- [17] 黄如海, 杨光, 郭有强, 等. 南京 UPFC 工程母联开关接地故障分析[J]. 供用电, 2017, 34(8): 28-32.
- HUANG Ruhai, YANG Guang, GUO Youqiang, et al. Analysis

of an actual ground fault for Nanjing UPFC project[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(8): 28-32.

作者简介:



张宝顺

张宝顺(1986), 男, 博士, 工程师, 从事柔性直流输电与 UPFC 控制保护相关工作(E-mail: zhangbs@nrec.com);

董云龙(1977), 男, 硕士, 高级工程师, 从事柔性直流输电与 UPFC 控制保护相关工作(E-mail: dongyl@nrec.com);

潘磊(1985), 男, 硕士, 工程师, 从事 UPFC 控制保护技术相关工作。

Protection coordination strategy of southern Suzhou UPFC project

ZHANG Baoshun¹, DONG Yunlong¹, PAN Lei¹, LU Yi², HUANG Ruhai¹

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: As the latest generation of FACTS device, unified power flow controller (UPFC) can control the system voltage and power flow rapidly, precisely and continuously, which provides an effective means to break the restrictions on urban power grid development. The protection configuration of UPFC project is studied in this paper. Firstly, the 2 out of 3 principle of UPFC self-protection is introduced, and then based on protection system configuration and action strategy, the restart strategy and coordination strategy of UPFC self-protection with AC line protection, transformer protection and other protections is proposed. At last, combining with southern Suzhou 500 kV power grid UPFC project RTDS simulation and system commissioning, the function and effects of the actual protection coordination strategy are given, the results show that UPFC can be effectively protected with the coordination strategy.

Keywords: unified power flow controller; protection coordination; restart strategy

(编辑 方晶)