

基于提升故障穿越能力的UPFC重启策略研究及应用

林金娇, 李 鹏, 高 磊, 张 弛, 袁宇波

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 统一潮流控制器(UPFC)是最新一代柔性交流输电系统装置,综合了FACTS元件的多种灵活控制手段。受限于电力电子设备绝缘能力,UPFC故障穿越能力有限。文中在介绍UPFC串联侧故障快速隔离技术的基础上,提出了UPFC配合交流保护重启策略,发生影响UPFC运行的故障时,利用特征量进行故障区域和类型判别,判别为交流电网异常时,进一步根据故障特性,并检测电网运行状态和UPFC运行能力,执行UPFC故障穿越或短时闭锁后自动重启的策略。接着以500 kV 苏南UPFC工程为例,介绍了该策略的具体实现方案。将该策略在南京西环网UPFC工程及苏南UPFC工程应用,结果表明,文中所提UPFC配合交流保护故障重启策略,具有良好的应用可行性和电网适应性,显著提升了UPFC工程的故障穿越能力。

关键词: 统一潮流控制器(UPFC); 故障穿越; UPFC自动重启策略; 苏南500 kV UPFC工程

Restarting Strategy of UPFC Control Protection System with Application for Improving Fault Ride-through Capability

LIN Jinjiao, LI Peng, GAO Lei, ZHANG Chi, YUAN Yubo

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The fault ride-through capability of the unified power flow controller (UPFC) is limited because of weak insulation capacity of electronic equipment. In this study, the fast fault isolation technique for UPFC series side was employed to propose a restarting strategy of UPFC control protection system combining with power grid protection for improving its fault ride-through capability. When a fault affecting UPFC operation happens, the characteristic variables are used to distinguish the fault area and type. If the AC power grid is distinguished to be abnormal, the operation state of the power grid and the running capacity of UPFC are detected according to the fault characteristics, and the strategy of fault ride-through or UPFC automatic restarting after short-time locking is performed. The discrimination principle and implementation method of the strategy are described. This strategy was applied to the system commissioning and operation of the Western Nanjing 220 kV Power Grid UPFC Project and the Southern Suzhou 500 kV Power Grid UPFC Project, and the results showed that the strategy has good application feasibility and adaptability to power grid, and it can further improve UPFC fault ride-through capability.

Key words: unified power flow controller (UPFC); fault ride-through; UPFC automatic restarting strategy; southern Suzhou 500 kV power grid UPFC project

0 引言

随着城市电网的发展,关键输电断面输电能力不足、新建输电通道受限将成为普遍问题。UPFC(unified power flow controller)作为最新一代柔性交流输电

系统装置,综合了FACTS(flexible AC transmission system)元件的多种灵活控制手段^[1-2],为解决这一问题提供了有效手段。目前世界上已投运的UPFC工程有5座,其中南京西环网UPFC工程作为中国首座UPFC工程,2015年初正式全功能投运,中国的苏南

收稿日期:2019-10-11; 修回日期:2019-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51707090)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51707090).

500 kV UPFC工程于2017年底投运,是世界上电压等级最高的UPFC工程^[3-5]。

UPFC换流器通过变压器,分别以并联和串联的方式接入输电系统中,实现无功电压控制和潮流控制。对于串联侧,UPFC利用串联换流器交流侧产生幅值、相位可调的电压,通过串联变压器将这个电压串入线路实现改变线路两端电压的幅值与相位差,从而独立地控制输电线路有功功率和无功功率。在这一结构下,当电网发生故障或异常运行工况,产生的大电流将通过变压器直接耦合入UPFC串联侧换流器,威胁换流阀设备安全。因此交流电网故障时,可能出现将UPFC停运以保障设备安全的情况。同时基于UPFC调节线路潮流原理,其停运将使线路等效阻抗、电压和功角变化,可能引起线路断面潮流过载、电网运行稳定性下降等问题,并且随着UPFC发挥效用的增加,故障停运其带来的危害进一步增加^[6-9]。

为提升UPFC稳定运行能力,外国已投运的3套UPFC工程以及国内外相关研究主要从提高电力电子设备制造水平、改善UPFC控制保护性能两方面展开研究^[10]。结合中国交流电网继电保护配置,文中主要从UPFC控制保护系统与电网保护动作配合策略上展开研究,提出了UPFC重启策略及其实现方案,将其应用于苏南UPFC工程,最后进行了工程运行实例跟踪与分析。

1 UPFC与电网保护影响原理分析

1.1 UPFC的结构和运行方式

UPFC工程可采用双端结构和多端结构,在中国主要应用多端结构,其包括两组以上换流器,常见为一并两串形式,并联换流器经过变压器 T_1 并联于线路一侧电网母线,两组串联换流器经变压器 T_2 串联接入相应线路,并联换流器和串联换流器通过采用直流背靠背连接方式。

UPFC工程一般具备双回线UPFC运行方式、单回线UPFC运行方式,此外可选择配置STATCOM、SSSC等运行方式^[11]。苏南UPFC工程主接线图见图1,该工程具备双回线UPFC方式、里木线UPFC(下称串联侧1)方式、梅木线UPFC(下称串联侧2)方式、STATCOM方式4种运行方式。

1.2 UPFC串联侧的故障隔离技术

基于UPFC的结构和电力设备的弱耐受能力,交流电网故障状态下,串联变压器是最直接接受故障考验的设备。对于串联换流器而言,串联变压器阀侧绕组可看做一个受控电流源,其受控于所串线

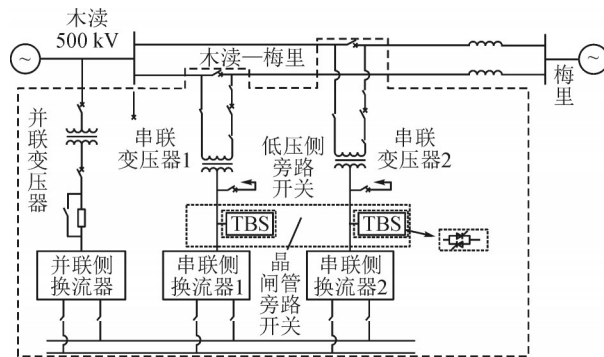


图1 500 kV 苏南UPFC工程结构图

Fig. 1 Structure of southern Suzhou 500 kV power grid

UPFC project

路电流。当交流电网发生故障或异常,激增的线路电流将通过串联变压器耦合入串联换流器。

为保障设备安全,南京西环网UPFC工程首次提出了快速旁路技术,作为目前中国UPFC工程故障隔离和串变绝缘设计问题的主要解决手段。在每台串联变压器的网侧和阀侧分别配置机械旁路开关,并在阀侧配置晶闸管旁路开关(TBS),用于故障时将串联变压器绕组旁路,防止故障电流进入串联换流阀,见图2。

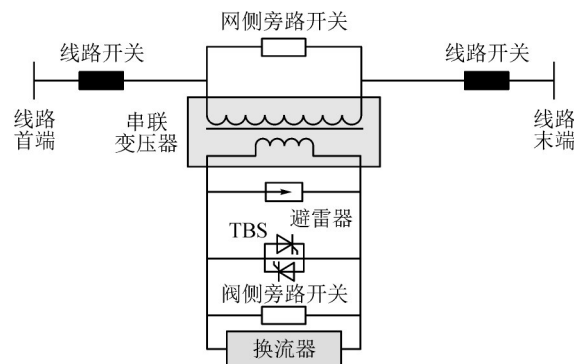


图2 串联侧隔离单元结构

Fig. 2 Structure of isolation technique on series

connect unit

当UPFC本体发生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,串联侧先通过TBS快速隔离UPFC串联侧,再由机械旁路开关承受故障电流。通过TBS的快速旁路特点,UPFC能够在5 ms时间内实现故障隔离,并在40 ms(开关合闸时间)完成串联变压器两侧机械旁路开关可靠闭合。

对于UPFC故障停运,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。

2 UPFC配合线路保护动作重启动策略

若仅采用上述UPFC串联侧隔离技术,可能存

在过度“保护”的现象,主要体现在一是考虑交流电网自愈能力,一些短时异常情况下,可能引起UPFC停运,削弱了电网自愈后UPFC的调节作用;二是通过重合闸大多数线路故障能够被清除,因线路故障而停运的UPFC,应当在线路恢复运行后投入。

为提高UPFC的故障穿越能力,文中提出的UPFC配合交流保护重启策略,综合电网状态、保护动作和开关位置等多种信息,完成最合适的运行方式的判断,UPFC的停运、切换运行模式或恢复原运行方式,并配合交流保护动作执行。

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。针对影响UPFC正常运行的交流电网故障,根据不同故障类型,见图3,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)中国主干网大多配置线路重合闸,进行故障清除。而重合闸的暂态过程可能危害UPFC设备安全,所以UPFC重启动作应与线路重合闸相配合^[12-14]。线路保护动作后,UPFC应进行重启判别,线路重合成功则UPFC应自动投入,线路不重合或重合不成时,UPFC相应串退出运行,切换至单回UPFC或STATCOM运行。

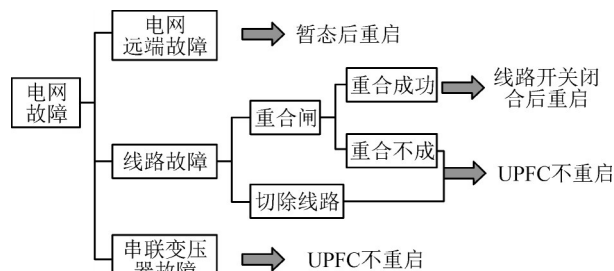


图3 电网故障下UPFC动作策略

Fig. 3 The principle of the strategy for power grid fault

按上述策略进入重启或其他动作后,具备重启能力的按策略执行重启动作,串联侧电网故障未恢复或UPFC不具备重启能力的,UPFC隔离相应串联侧,其他部分保持运行;并联侧不具备运行能力的,停运UPFC系统。

重启流程主要包括重启命令判别和重启执行判别两个模块。前者用于判别故障区域和类型,后者考核电网及UPFC系统是否具备UPFC重启能力。对于多端UPFC系统,重启策略判别见图4。

3 UPFC重启的实现

该节介绍了重启策略中两个主要模块——重

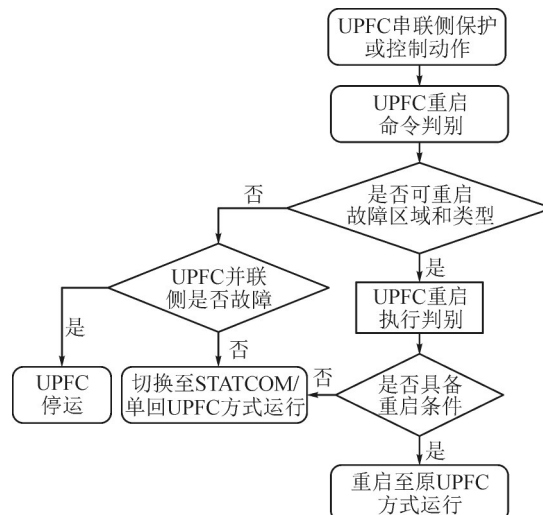


图4 重启策略判别流程

Fig. 4 Process of the restart strategy

启命令判别和重启执行判别的具体逻辑,并以苏南500 kV UPFC工程为例,介绍了重启策略与交流保护配合的具体实施方案。

3.1 重启命令判别

重启命令判别主要利用UPFC本体保护和交流电网保护监测故障^[15],结合交流电气量征进行故障区域判别。

重启策略相关区域为UPFC换流器区域、线路区域、串联变压器区域、并联变压器区域,各区域配置相应保护,故障时将故障设备切除,与正常运行区域隔离,UPFC本体及电网保护见图5。

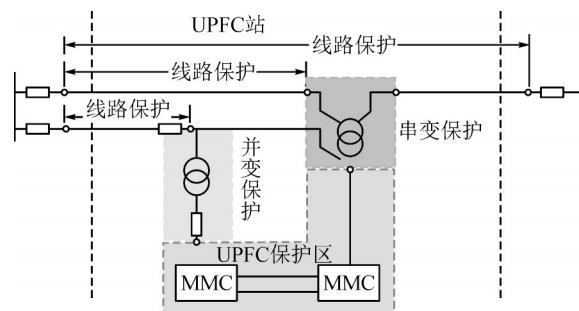


图5 UPFC本体保护及电网保护配置

Fig. 5 UPFC self-protection and related power grid protection

区别于常规保护的主要为串变保护、UPFC控制保护。

1)串变保护动作后,隔离串变的手段为闭合串变两侧旁路开关,即图2中网侧和阀侧旁路开关。

2)在串变至换流器阀的连接线处配置电流测点,用于“阀过流保护”;在UPFC所接入线路处配置电流、电压测点,用于检测电网状态;检测UPFC所接入线路开关状态,用于UPFC串联侧配合重启时,配合线路重合闸。

重启命令判别中,以UPFC本体保护(除过流保

护外)和串联变压器保护作为闭锁重启逻辑的条件;当UPFC本体的阀侧过流保护动作或UPFC控制系统过流引起换流器闭锁时,以线路保护动作、交流电网低电压(TA₁)作为判据,判别闭锁是否由交流电网引起,两者取“或”进入重启逻辑,见图6。

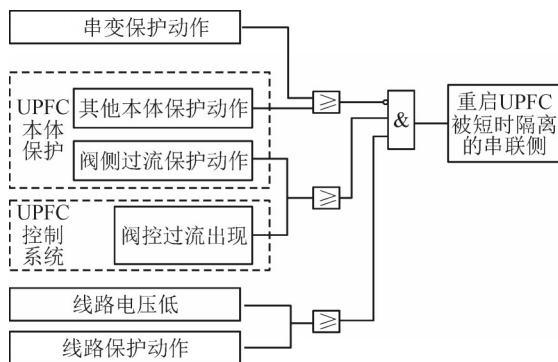


图6 重启逻辑判别

Fig. 6 Restart logic discrimination

3.2 重启执行判别

经重启命令判别为“重启”后,应延时进行重启执行条件判别,避免异常状态下投入UPFC串联侧对UPFC设备和电网的危害^[16-17]。主要目的—是判别UPFC的运行状态是否满足重启要求,二是判断电网恢复或故障隔离情况。后者具体而言,对于电网远端故障,UPFC系统在电网暂态过程平稳后,可自动进入重启动;对于线路故障,为保障UPFC设备安全,需考虑其重合闸动作情况后,选择UPFC重启动作。

苏南UPFC工程中,重启执行判别前延时设置为固定值,此延时考虑线路重合闸完成且电网暂态故障恢复。对于交流电网条件判断,包括线路运行情况、旁路开关位置以及线路电压、电流水平;对于并联侧充电串联侧的能力判断,一是检测换流阀状态,二是检测直流电流水平,因为UPFC串联侧重启由并联侧提供有功功率,具体逻辑见图7。

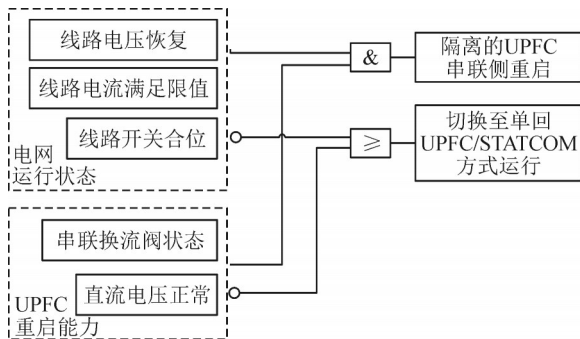


图7 重启执行判别

Fig. 7 Restart execution discrimination

当交流电网条件判别和并联侧充电串联侧的能力均满足时,UPFC重启;当两者任一不满足时,UPFC切换运行模式,永久隔离该串联侧,保持当前运行模式^[18]。

3.3 动作配合与信息交互

在UPFC重启策略的命令判别和执行判别中,利用UPFC控制保护、交流电网各个保护、开关位置、电网运行状态等多项信息和装置进行综合判别。信息交互、执行的配合是实现UPFC重启策略的重点。

UPFC工程与220 kV UPFC工程重启实现方式基本相同,但由于两个电压等级电网的保护配置不同,重启过程信息交互存在差异。220 kV电网普遍重合闸功能在线路保护中完成,而500 kV单独配置开关保护,实现重合闸、失灵、远跳以及UPFC所需特殊功能,配合的信息交互过程较复杂。下面以较为复杂的500 kV苏州南部电网UPFC工程为实例,介绍重启策略的实现方式。

UPFC控制保护与交流保护配合策略,涉及保护包括UPFC本体控制保护、串联变压器保护、线路保护、开关保护、母线保护,涉及开关包括串联变压器旁路开关和线路开关,配合关系见图8,其中线路故障时配合关系以虚线标示,串变故障时以粗实线标示,开关位置与保护的配合关系以细实线标示。

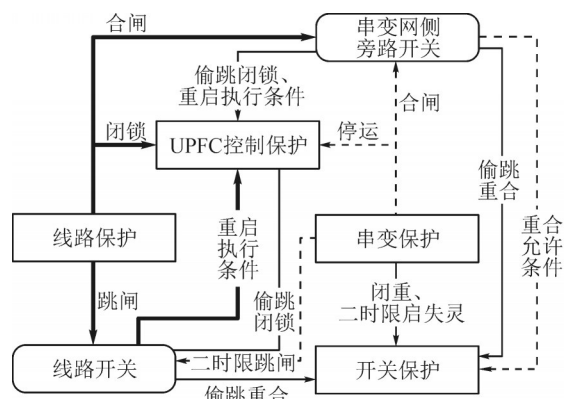


图8 重启策略的信息交互

Fig. 8 Information interaction of the strategy

1)线路故障。线路故障后,通过快速旁路技术UPFC串联侧瞬间隔离。对于能够进行重合闸的故障,UPFC监测线路重合成功后进行重启,UPFC本体控制保护与交流电网保护的配合关系主要体现为:

设置联动逻辑,线路保护动作后,闭锁换流器,并合相应串联变压器旁路断路器。

在线路重合闸逻辑中,增加串变网侧旁路开关合位条件,避免重合过程对换流阀造成伤害。

线路重合后,线路保护或开关保护向UPFC控制传送线路开关位置信息,UPFC监测线路电气量状态,根据上节所述判别逻辑,恢复故障前运行方式或切换运行方式或停运。

2)串联变压器故障。串联变压器是UPFC本体区域与电网的接口,作为UPFC的特殊设备,保护动

作策略与常规变压器区别较大,主要体现在:

首先合上两侧旁路开关,并发信号至UPFC控制系统和开关保护,闭锁换流器阀与线路重合闸。

考虑旁路开关失灵,串变保护延时跳线路两侧开关。

3)开关偷跳。对于串变旁路开关偷跳和线路开关偷跳,通过开关位置不一致启动重合闸信号作为UPFC保护的开入,配合开关重合。

4)电网远端故障。UPFC本体控制保护通过检测串联阀侧电流,判别动作行为。对于电网远端故障或不致使电网保护动作的异常运行状态,对于威胁UPFC运行的工况,执行短时刻隔离。

4 工程验证

将文中所提重启策略应用于南京西环网UPFC工程和苏南UPFC工程。对两个工程开展系统调试验证所提重启策略,并对南京西环网UPFC工程运行以来的效果进行追踪。在交流电网故障下,典型波形如下:

1)在苏南UPFC工程系统调试试验中,模拟电网远端故障影响UPFC串联侧2运行试验,故障延时1 s返回。UPFC动作全过程录波见图9-11,可见模拟电网远端故障后,串联侧1短时隔离后重启,并且重启成功后期间串联侧1所接入线路以及串联侧2保持正常运行。

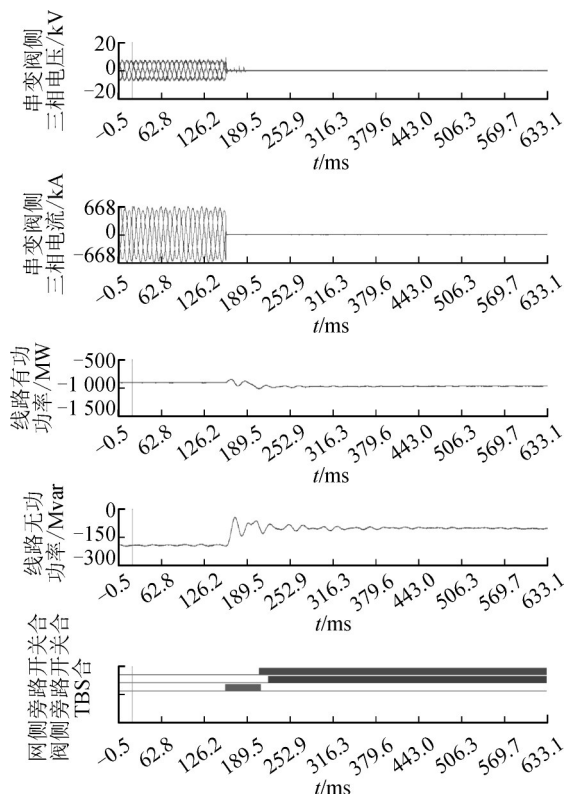


图9 串联侧2被隔离波形

Fig. 9 Being isolated waveform of series connect unit 2

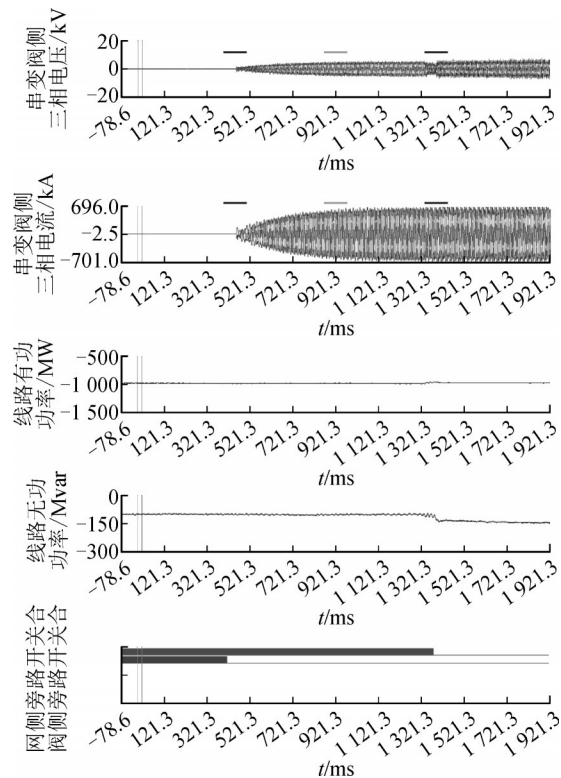


图10 串联侧2重启波形

Fig. 10 Restarting waveform of series connect unit 2

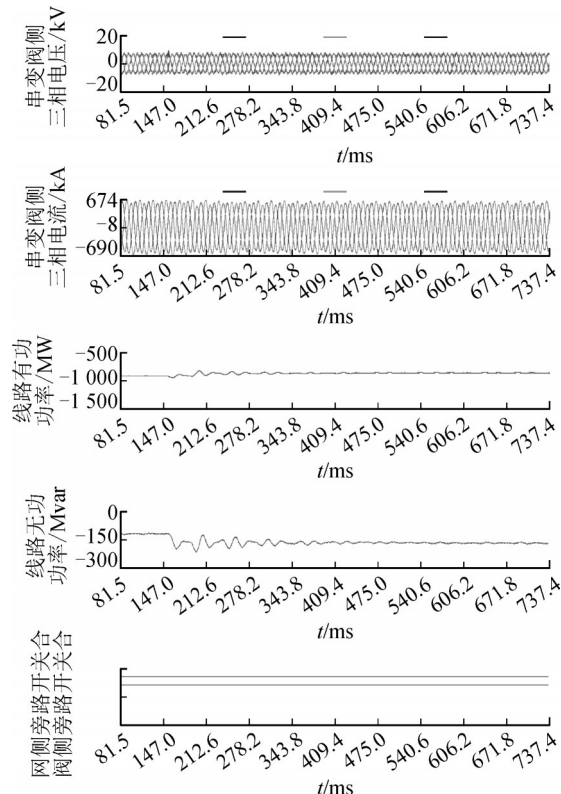


图11 串联侧1运行波形

Fig. 11 Waveform of series connect unit 1

2)在南京西环网UPFC工程,双回UPFC运行方式下,模拟串联侧1串变故障。在50 ms内UPFC串联侧可靠隔离,切换至单回UPFC方式运行平稳运行,波形见图12-13。

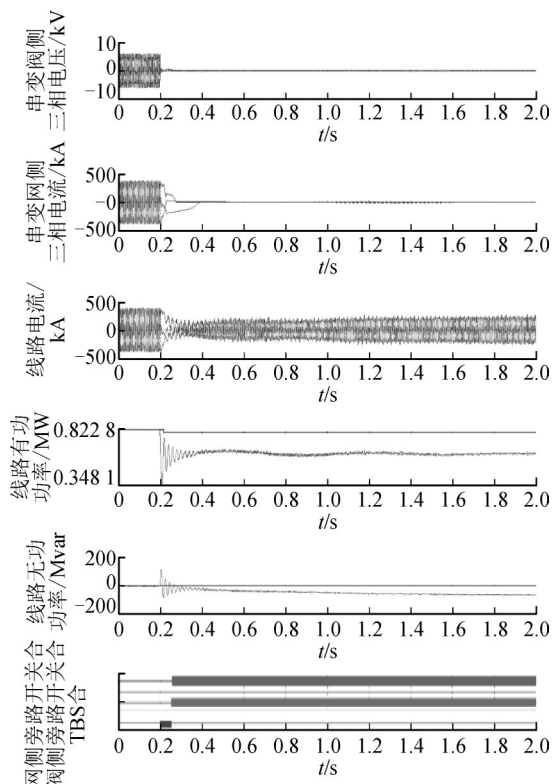


图12 串联侧1停运波形

Fig. 12 Outage waveform of series connect unit 1

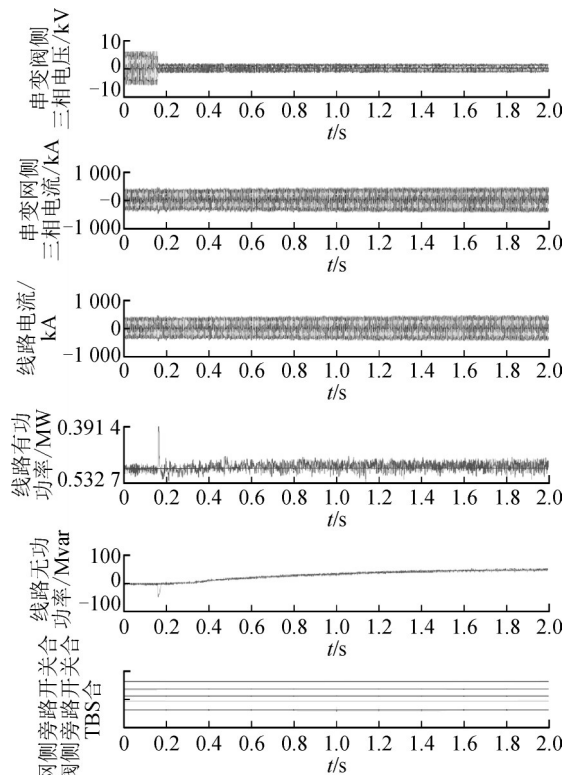


图13 串联侧2运行波形

Fig. 13 Waveform of series connect unit 2

5 结论

文中介绍了电网故障下UPFC的故障重启判别

原理,提出了配合交流保护动作的UPFC重启策略,并详细阐述了重启过程实现方法,并将其应用于南京西环网UPFC工程和苏南UPFC工程,得到如下结论:

1)文中提出的UPFC配合交流保护重启策略,综合电网状态、保护动作和开关位置等多种信息,实现UPFC运行方式的适应性调整。线路故障和影响UPFC运行的电网远端故障中,按策略完成了自动短时隔重启动过程;串变故障时,UPFC完成了运行方式切换;电网严重故障时,UPFC按指令完成了停运。

2)在南京西环网UPFC工程运行的一年中,西环网发生了线路单相故障或电网远端扰动事件3次,UPFC重启策略均按既定策略完成了其故障穿越,成功率为100%,提升了UPFC的故障穿越能力。因此建议安装UPFC的线路,配置线路重合闸,并采用此重启策略。

参考文献:

- [1] 李岩,罗雨,许树楷,等. 柔性直流输电技术:应用、进步与期望[J]. 南方电网技术,2015,9(1):7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: Application, advancement and expectation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.
- [2] GYUGI L, SCHAUDER C D, WILLIAMS S L, et al. The unified power flow controller: A new approach to power transmission control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1089.
- [3] RENZ B A, KERI A, MEHRABAN A S, et al. AEP unified power flow controller performance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1374-1381.
- [4] SCHAUDER C, STACEY E, LUND M, et al. AEP UPFC project: Installation, commissioning and operation of the ± 160 MVA STATCOM(phase I)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1530-1535.
- [5] CHANG B H. Study of operational strategies of UPFC in KEPCO transmission system[C]//2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition.[S.L.]: IEEE, 2005: 1079-1085.
- [6] 李兰英,沈艳红. UPFC控制器IP设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 104-108.
LI Lanying, SHEN Yanhong. IP design of unified power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 104-108.
- [7] 张栋,欧阳有鹏,尚慧玉,等. 电压源型换流阀在绝缘型式试验下电场仿真计算[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 76-81.
ZHANG Dong, OUYANG Youpeng, SHANG Huiyu, et al. Electric field simulation and calculation of voltage sourced

- converter valve in insulation type test[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 76-81.
- [8] 陈峰, 江道灼, 周洋, 等. 基于故障电流控制的新型UPFC-FCL设计[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 145-150. CHEN Feng, JIANG Daozhuo, ZHOU Yang, et al. Electric power automation equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 145-150.
- [9] 张杨, 毛雪雁, 徐政. 用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 30-33. ZHANG Yang, MAO Xueyan, XU Zheng. UPFC models for power system steady-state and dynamic analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 30-33.
- [10] ALI A, MEHDI A. A multi-objective gravitational search algorithm based approach of power system stability enhancement with UPFC[J]. Journal of Central South University, 2013(6): 1536-1544.
- [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, 36(6): 56-60. LIN Jinjiao, LI Peng, KONG Xiangping, et al. The UPFC protection system configuration and action strategy in Nanjing western power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 36(6): 56-60.
- [12] 陈名, 朱童, 黎小林, 等. 柔性直流系统断路器保护配合研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 33-40. CHEN Ming, ZHU Tong, LI Xiaolin, et al. Research on protection coordination between flexible DC system and breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 33-40.
- [13] 李岩, 龚雁峰, 姜斌. 一种基于方向行波的多端VSC-HVDC系统保护策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 70-73. LI Yan, GONG Yanfeng, JIANG Bin. A protection scheme for multiterminal VSC-HVDC system based on direction traveling waves[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 70-73.
- [14] 徐政, 张哲任, 刘高任. 柔性直流输电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 54-59. XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 54-59.
- [15] 罗苏南, 曹冬明, 王耀, 等. ± 800 kV特高压直流全光纤电流互感器研制及应用研究[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 1-7. LUO Sunan, CAO Dongming, WANG Yao, et al. Development and application research of ± 800 kV UHVDC fiber optical current transducer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 1-7.
- [16] 李建国, 杨文博, 宋强, 等. 模块化多电平换流器电容电压的分布式均衡控制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 197-203. LI Jianguo, YANG Wenbo, SONG Qiang, et al. Distributed balancing control strategy of capacitor voltage for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(17): 197-203.
- [17] 徐政, 黄弘扬, 周煜智. 描述交直流并列系统电网结构品质的3种宏观指标[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 1-7. XU Zheng, HUANG Hongyang, ZHOU Yuzhi. Three macroscopic indexes for describing the quality of AC/DC hybrid power grid structures[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 1-7.
- [18] 莫浪娇, 骆树权. ± 200 Mvar STATCOM在500 kV水乡站的工程实践[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 47-52. MO Langjiao, LUO Shuquan. Engineering practice of ± 200 Mvar STATCOM in 500 kV Shuixiang substation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 47-52.
- 林金娇(1988—), 女, 工程师, 研究方向为柔性直流输电控制保护技术。
- 李鹏(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电控制保护技术。
- 高磊(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电控制保护技术。
- 张弛(1992—), 男, 工程师, 研究方向为继电保护技术。
- 袁宇波(1975—), 男, 研究员级高工, 研究方向为特高压直流输电技术、继电保护技术。