

南京 UPFC 示范工程人工接地短路试验分析

黄志高¹, 潘磊², 祁万春³, 邱德锋², 黄如海², 姜崇学²

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

3. 国网江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏南京 210008)

摘要:统一潮流控制器(UPFC)包含有串联侧换流器和并联侧换流器两部分,在近端线路发生故障时,UPFC 串、并联的换流器均会受故障影响,对于线路的瞬时性故障,需要 UPFC 能承受故障冲击,并且在线路故障清除后继续运行。人工短路试验可以考验 UPFC 的故障穿越能力,文中通过对南京 UPFC 示范工程的人工接地短路试验的结果进行分析,验证示范工程主设备参数的设计,和故障处理策略的合理性。

关键词:UPFC; 线路故障; 人工短路试验; 故障穿越

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)06-0032-04

统一潮流控制器(UPFC)作为迄今最全面的柔性交流输电系统(FACTS)设备,既能在电力系统稳定方面实现潮流调节,合理控制有功功率、无功功率,提高线路的输送能力,实现优化运行;又能在动态方面,通过快速无功吞吐,动态地支撑接入点的电压,提高系统电压稳定性;还可以改善系统阻尼,提高功角稳定性^[1-4]。因此,为了提高系统运行的可靠性,对 UPFC 的故障处理和故障穿越能力进行优化研究具有重要的意义。

南京西环网 UPFC 示范工程为世界上首个基于模块化多电平换流器(MMC)的 UPFC 工程,也是我国首个 UPFC 工程,该工程的投运代表着我国电力电子技术达到了世界领先水平,对后续 UPFC 的推广应该具有很好的示范意义。设备的故障穿越能力是考验 UPFC 运行可靠性的重要指标。

1 南京 UPFC 工程概况

南京西环网是南京城网的主要负荷中心,由于电网结构特殊,目前南京主城区西环网的沿江输电通道受限,南北输电通道负荷分布严重不均,且新增线路和扩容改造的成本高、施工难度大。经研究论证,在西环网北通道的铁北至晓庄双回线路上安装 UPFC (设备安装在 220 kV 铁北变电站),利用其快速调节电网潮流的能力,可以优化南京西环网潮流,解决晓庄南送断面潮流过重,以及近、远期部分断面潮流无法满足 N-1 校验的问题^[5]。

南京 UPFC 示范工程采用 3 个相同容量的电压源型 UPFC 换流器背靠背连接的方式,其一次系统结构如图 1 所示,其中 UPFC 换流器采用基于 IGBT 的 MMC 技术,换流器容量设计为 3×60 MV·A,各换流器通过隔离刀闸连接至直流公共母线上;同时 3 个换

流器的交流侧安装有多个转换刀闸,可以实现各换流器串、并联连接的转换,从而提高了 UPFC 系统的灵活性和可靠性^[6]。

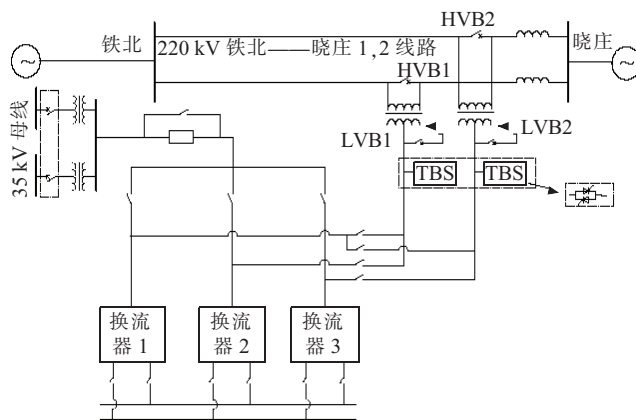


图 1 南京 UPFC 工程一次系统结构图

在正常双回线路 UPFC 方式运行时,2 个换流器串联接入 220 kV 线路,分别控制双回线路的潮流,并可以对线路的有功功率和无功功率独立控制;另一个换流器并联接入 35 kV 交流系统,控制 UPFC 系统的直流电压,并可以提高 35 kV 交流系统的无功储备能力、控制交流系统电压。南京 UPFC 示范工程的主要设备参数如表 1 所示。

2 南京 UPFC 工程故障处理策略

统一潮流控制器的核心设备为电压源换流器,属于电力电子设备,其承受系统过电压和过电流的能力有限,相比传统的电力设备比如变压器,其耐受故障电压和电流能力非常差,特别是串联换流器对应的线路发生故障时,线路短路电流会经过串联变压器耦合至换流阀,因此在发生故障时,必须要迅速采取措施保护换流器。

南京 UPFC 工程在串联侧每组串联变压器两侧分别配置 1 台高压侧机械旁路开关 (HVB)、1 台低压侧

表 1 南京 UPFC 工程主要参数

主要技术参数	
换流器容量 /MV·A	60
额定直流电压 /kV	±20
额定直流电流 /A	1000
换流器桥臂子模块数量 / 个	26+2
串联变压器容量 /MV·A	70
串联变压器接线方式	IIIYD
串联变压器变比 /kV	26.5/20.8/10
并联变压器容量 /MV·A	60
串联变压器接线方式	DY1
并联变压器变比 /kV	35±2*2.5/20.8

机械旁路开关 (LVB) 和 1 台快速晶闸管旁路开关 (TBS), 如图 2 所示。故障发生时(线路故障、串联变压器故障或者串联换流器区故障), 保护迅速动作同时触发 TBS 导通、发送高压侧旁路开关和低压侧旁路开关合闸命令, TBS 快速导通, 将串联侧换流器旁路, 隔离换流器和交流线路, 避免交流系统故障和阀区故障的相互影响。在低压侧旁路开关或者高压侧旁路开关任意一个合闸后, 闭锁 TBS 的触发脉冲^[7,8]。

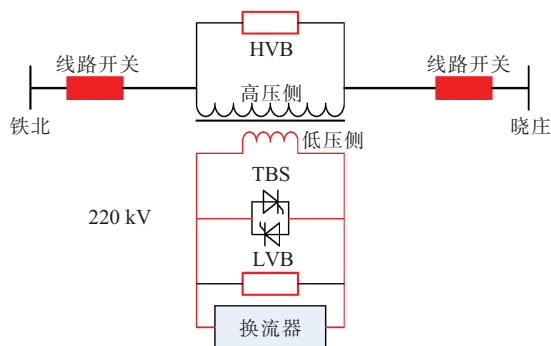


图 2 UPFC 串联侧旁路方案

如上所述, 南京 UPFC 工程采用三重旁路开关的配置, 可以保证 UPFC 串联侧换流器在故障时安全可靠的退出, 提高整个系统的可靠性。安装线路故障对于 UPFC 来说是区外故障, 但由于 UPFC 的串、并联换流器均和线路的耦合关系较强, UPFC 的串、并联侧换流器均会受到线路故障的影响。对此, 南京工程对线路故障的处理策略为: 并联侧换流器通过控制保护策略的优化, 保持并联侧换流器持续运行; 串联侧换流器在故障发生后通过三重旁路开关的保护配合迅速退出。

另外, 对于线路的瞬时性故障, 线路保护可能会重合闸, 因此南京 UPFC 工程的串联侧增加了故障重启策略, 在检测到是区外故障或者接收到线路保护装置的保护动作命令后, 经过一定时间的延迟(延迟的时间主要和重合闸时间配合)后, 如判断线路重合闸成功, 则将 UPFC 系统重新投入运行, 即实现 UPFC 设备的故障穿越。

3 南京 UPFC 工程人工短路试验概述

为检查交流系统瞬时性故障情况下 UPFC 系统的故障穿越能力, 考核一次设备耐受故障冲击的能力, 考核 UPFC 控制保护及系统相关保护的動作性能, 2016 年 2 月 28 日凌晨, 在 220 kV 铁北变晓铁线近地相进行单回线路单相瞬时人工接地故障试验。

3.1 人工接地点的选择要求

(1) 单相接地故障发生前晓铁双回线及 UPFC 系统正常运行;

(2) 单相接地故障发生后故障相线路两侧断路器跳开切除故障, 非故障线路等设备在故障发生及清除过程中保持正常运行;

(3) 安全、可靠, 便于试验实施和操作。

人工接地装置构成如图 3 所示。

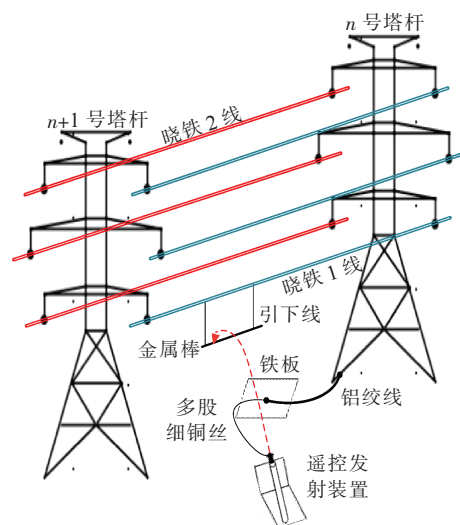


图 3 人工接地试验示意图

3.2 人工接地短路试验前准备

(1) 将准备进行接地试验的线路转入检修状态。

(2) 按图 3 所示安装好线路和地面部分的人工接地装置。

(3) 人工接地装置安装完毕并检查无误后, 工作人员退出现场, 报告试验指挥。

(4) 将铁晓双线转入运行状态;

(5) 将 UPFC 系统投入运行, 通过 UPFC 将试验线路双回线路输送有功功率控制为 50 MW。

3.3 人工接地短路试验步骤

(1) 当短路试验准备命令发出后, 工作人员将遥控发射装置设置在准备发射前状态, 全体工作人员退到试验场地遮拦之外(距接地点 40 m 以外), 报告试验指挥。

(2) 当接地试验 5 min 准备命令发出后, 监控员和装弹员再进入遮拦内, 先将弹射弹放入发射筒内, 然后将接有引弧线的接线环放置在发射筒上, 最后接通遥控接收装置和电动机电源。

(3) 发射装置一切准备就绪并且检查无误后, 监控员和装弹员后退至距发射装置 40 m 左右, 报告试验指挥。

(4) 由试验指挥发出接地试验命令, 接地试验命令倒数至 0 时, 控制人员按动遥控器按钮, 弹射弹带着连接有引弧线的接线环飞向悬挂在空中的金属细棒(相碰前空气间隙已被击穿)形成线路对地故障。

3.4 人工接地短路试验预期结果

(1) 试验过程期间, 并联侧换流器一直保持运行;

(2) 接地故障发生后, 故障线路对应的 UPFC 串联侧迅速退出运行, 换流器闭锁、晶闸管旁路开关导通、机械旁路开关合闸;

(3) 线路保护在故障消失后完成线路的重合闸;

(4) 退出的换流器在重合闸完成后重新投入运行, 最终恢复到接地短路试验前的功率状态(即双回线路 50 MW)。

(5) 故障期间, UPFC 成套设备(包括换流阀、变压器和 TBS、控制保护系统等)运行正常。

4 南京 UPFC 工程人工短路试验结果分析

4.1 线路保护动作情况

人工短路试验期间, 铁晓 2Y59 线路(短路故障模拟线路)的线路保护波形如图 4 所示。线路保护正常动作, 在 53 ms 左右铁晓 2Y59 开关 B 相跳开, 大约 876 ms 后线路重合闸成功(重合闸整定时间为 800 ms, 线路开关合闸时间大约 76 ms)。

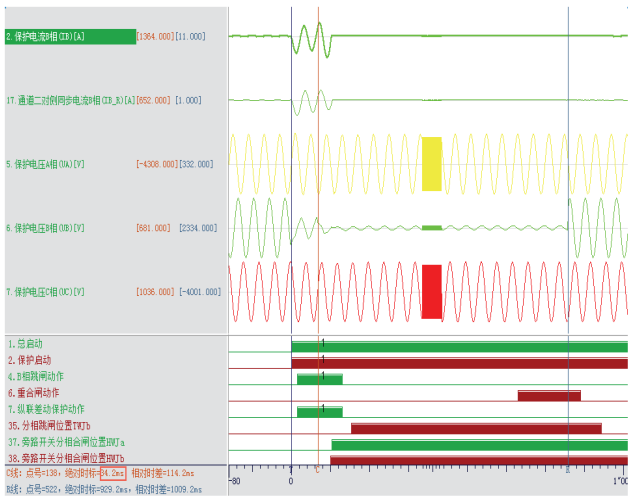


图 4 铁晓 2Y59 线保护装置录波

从图 4 波形可以看出, 故障发生后, 串变 1(接入 2Y59 线路的串联变压器) 高压侧旁路开关合上之前, 铁北侧故障电流有效值 10.8 kA(瞬时值 18 kA); 串变 1 高压侧旁路开关合上后故障电流有效值略有增加, 有效值 13.7 kA(瞬时值 22.4 kA), 故障点短路电流有效值 19.97 kA(峰值 33.7 kA)。从图 4 可以看出, 串变 1 高压侧旁路开关合上的时间约为 34 ms。

4.2 UPFC 动作情况

人工短路试验期间, UPFC 保护装置 CPR 的部分电气量的波形如图 5 所示。第 1 组为 2Y59 线路三相电压 $U_{L_L_PR}$ 的波形、第 2 组为串联变压器 1(接入 2Y59 线路的串联变压器) 阀侧绕组电流 $I_{VT_L_PR_SE1}$ 的波形、第 3 组为换流器 2(试验期间接入 2Y59 线路的换流器) 交流电流 $I_{VS_L_PR_SE1}$ 的波形, 第 4 组为变压器 1 阀侧绕组电流和换流器 2 交流电流波形的比较。

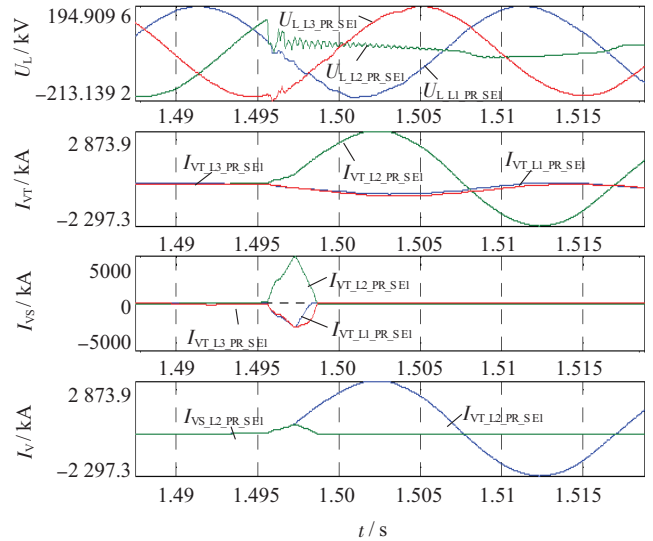


图 5 UPFC 保护装置(CPR)录波

系统正常运行时, 2Y59 线路对应的串联变压器 1 低压侧绕组电流 $I_{VT_L_PR_SE1}$ 和换流器 2(试验时换流器 2 接入 2Y59 线路)的交流电流 $I_{VS_L_PR_SE1}$ 相等; 当 TBS 导通或者低压侧的机械旁路开关 LVB 合闸, 但高压侧机械旁路开关分闸时, 这 2 个电流不一样, 这种情况对应的是 UPFC 换流器退出、但串联变压器接入线路。线路发生接地故障时, 短路电流耦合到换流阀, UPFC 保护系统检测到 $I_{VS_L2_PR_SE1}$ 超过过流保护保护动作定值后, 保护动作迅速触发串联变压器 1 对应的 TBS 导通, 而此时串联变压器 1 对应的机械旁路开关还未合闸, 换流器 2 与故障隔离, 但串联变压器仍串入线路中, 则 TBS 导通后 $I_{VS_L_PR_SE1}$ 和 $I_{VT_L_PR_SE1}$ 会不相等, 2 者的电流波形会分叉。

人工短路试验期间, UPFC 换流器 2(试验期间接入 2Y59 线路的换流器)的控制装置 CCP 的部分电气量的波形如图 6 所示。第 1 组为 2Y59 线路 B 相电压 $U_{L_out_B_TFR}$, 第 2 组为 2Y59 线路 B 相电流 $I_{L_B_TFR}$, 第 3 组为换流器 2(试验期间接入 2Y59 线路的换流器)交流电流 I_{V_TFR} , 第 4 组的 4 路开关量分别为: 换流器解锁信号 DEBLOCKED、串联变压器 1 高压侧旁路开关的合闸信号 $W_{23_QF1_CLOSE_IND}$ 、串联变压器 1 低压侧旁路开关的合闸信号 $W_{23_QF2_CLOSE_IND}$ 、2Y29 线路开关位置信号 $W_{23_QF2_CLOSE_IND}$ (线路开关任一相分即判断为分位)。

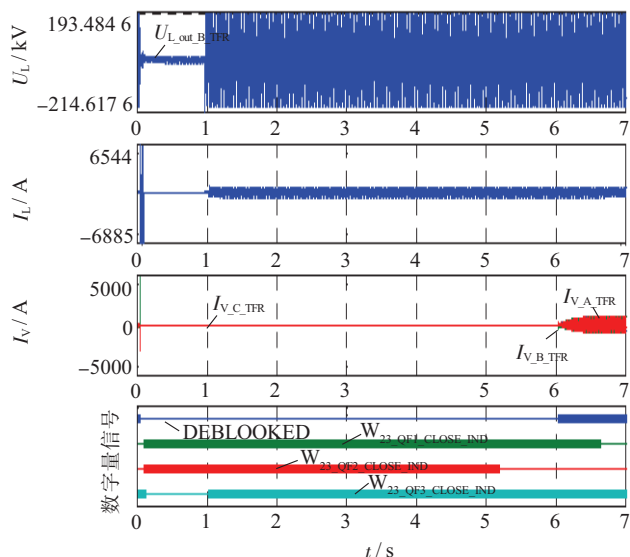


图6 UPFC控制装置(CCP)录波

人工接地短路试验对于线路来说是瞬时性故障,故障消失后线路会重合闸,根据前述故障处理策略,UPFC也应该在线路重合闸成功后重新启动投入运行。人工短路试验控制保护动作时序图如图7所示。

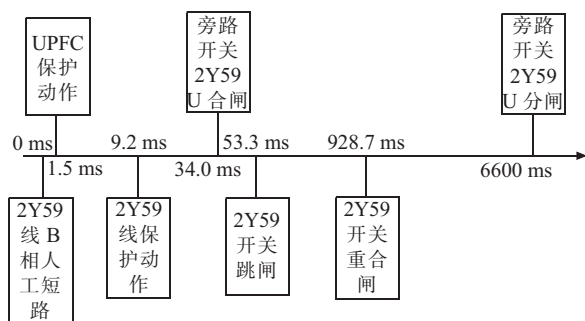


图7 人工短路试验控制保护动作时序图

从图7相关的波形可以看出,故障发生后,故障线路对应的串联侧换流器迅速闭锁、同时故障线路对应的TBS导通、串联变压器机械旁路开关均合闸、故障线路开关断开。在线路故障清除后,故障线路对应的换流器开始重新启动,先分串联变压器1低压侧旁路开关,之后换流器2重新解锁,串联变压器绕组电流建立后,分开串联变压器1高压侧旁路开关,UPFC开始重新控制线路功率,完成故障穿越和故障重启过程。

4.3 控制保护动作时序分析

对上述故障试验分析进行梳理,整理出此次人工短路时间的整个控制保护动作时序如下:00:18:09.148,人工模拟瞬时单相接地故障,1.5 ms UPFC保护动作,9.2 ms 铁晓2Y59线路保护动作,34 ms 串联变压器1的高压侧机械旁路开关合闸,53 ms 铁晓2Y59线路开关B相跳开,929 ms 铁晓2Y59线路开关B相重合成功,6.6 s 换流器2完成对2Y59线路控制

的重新启动。

整个故障过程中系统保护、UPFC控制保护均动作正确。故障前,铁晓双回线输送有功功率50 MW,故障后铁晓双回线功率恢复至故障前水平。

5 结束语

通过对南京UPFC工程人工接地短路试验的过程和试验波形进行详细分析,以及试验结束后对一次设备的详细检查,结果表明电网相关保护动作行为正确;UPFC控制保护系统动作正确,故障处理策略设计合理、且具有较好的性能;UPFC一次设备现场经检查无异常。南京UPFC工程可承受电网短路故障带来的冲击并成功穿越,整个UPFC系统具有良好的电网运行适应性和兼容性。试验过程中,所有设备运行正常,未出现故障,表现出极高的可靠性。

参考文献:

- [1] 马凡. 统一潮流控制器动态特性及相关控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [2] 朱鹏程,刘黎明,刘小元,等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):45-51.
- [3] 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.
- [4] 凌峰,秦健,戴阳,等. 南京UPFC工程运行方式[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):36-40.
- [5] 王旭,祁万春,黄俊辉,等. 柔性交流输电技术在江苏电网中的应用[J]. 电力建设,2014,35(11):92-96.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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.

作者简介:

- 黄志高(1962),男,江苏泗阳人,高级工程师,研究方向为电力系统自动化;
- 潘磊(1985),男,湖北荆州人,工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作;
- 祁万春(1979),男,江苏盐城人,高级工程师,研究方向为电力系统规划及可靠性;
- 邱德锋(1986),男,江苏泰州人,工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作;
- 黄如海(1987),男,江苏南通人,工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作;
- 姜崇学(1987),男,黑龙江佳木斯人,工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2007;256.
- [2] 藤 林,刘万顺,李 营,等. 一种实用的新型高压输电线路故障双端测距精确算法[J]. 电力系统自动化,2001,25(18):24-27.
- [3] 辛振涛,尚德基,尹项根. 一种双端测距算法的伪根问题与改进[J]. 继电器,2005,33(6):36-39.
- [4] 桂 勋,刘志刚,韩旭东,等. 基于高压输电线电压沿线分布规律的故障双端测距算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(19):63-69.
- [5] 靳 希,吴世镜,吴剑敏,等. 一种基于高压输电线路双端故障测距算法的伪根判别方法[J]. 华东电力,2010,38(1):72-75.
- [6] 蒋春芳,王克英. 基于参数估计的双端不同步故障测距算法[J]. 继电器,2008,36(1):1-4.
- [7] 杜召满,赵 舫. 一种新的超高压输电线路双端测距算法[J]. 高电压技术,2003,29(11):11-12.
- [8] 徐 鹏,王 钢,李晓华,等. 双端不同步数据故障测距的非线性估计算法[J]. 继电器,2005,33(1):16-20.
- [9] 李 勋,石帅军,龚庆武. 采用信赖域法和双端非同步数据的故障测距算法[J]. 高电压技术,2010,36(2):396-400.
- [10] 卫志农,张 颖,周红军. 基于双端不同步采样数据的高压输电线路故障测距[J]. 继电器,2005,33(23):5-8.

作者简介:

- 王 忠(1969),男,江苏丹阳人,高级工程师,研究方向为高压输电线路微机保护及其自动化测试;
- 刘 奎(1985),男,陕西临潼人,工程师,研究方向为高压输电线路微机保护;
- 陆金凤(1987),女,江苏南通人,工程师,研究方向为高压输电线路微机保护;
- 沈 军(1975),男,江苏南通人,工程师,研究方向为高压输电线路微机保护;
- 赵青春(1980),男,湖北武汉人,工程师,研究方向为高压输电线路微机保护。

Fast and Accuracy Algorithm for Dual-terminal Fault Location with Automatic False Root Identification for HV Transmission Line

WANG Zhong, LIU Kui, LU Jinfeng, SHEN Jun, ZHAO Qingchun
(Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: To solve the problems such as false root judgment, astringency, high computation cost and so on, which exist in asynchronous dual-terminal fault location algorithms, this paper presents a new fast and accuracy dual-terminal fault location algorithm for HV transmission line. Based on the line distributed parameters and the analysis of the monotonicity and periodicity of HV transmission line's voltage amplitude curve, it automatically identifies the false root according to the variation tendency of fault point's voltage in the process of iterations, so that the next search direction can be determined. Then the fault point is rapidly located by dichotomy. This algorithm is simple with minor calculation. It also doesn't require synchronous dual-terminal data and can eliminate the influence of transition resistance. So it has a high practical value. The simulation results of PSCAD show that it overcomes deficiency of the former algorithms and has high accuracy and quick computation speed, resolving the contradiction between rapidity and false root judgment.

Key words: fault location; asynchronous dual-terminal data; dichotomy; distributed parameter; HV transmission line

(上接第 35 页)

Analysis of Artificial Grounding Test for Nanjing UPFC Pilot Project

HUANG Zhigao¹, PAN Lei², QI Wanchun³, QIU Defeng², HUANG Ruhai², JIANG Chongxue²

(1.State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 3.State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: Unified power flow controller (UPFC) consists of two parts, namely series and parallel converters. When faults happen on the line near the two parts, converters respectively at the series side and parallel side will be both affected. The UPFC must have the ability against the line instantaneous fault, and the ability to continue running after the fault is cleared. Artificial short circuit test can test the fault ride-through capability of UPFC. The parameter design of main equipment and strategy against faults of Nanjing UPFC pilot project are proved reasonable by the analysis of the artificial grounding test results.

Key words: unified power flow controller (UPFC); line fault; artificial short circuit test; fault ride-through

广告索引

南京南瑞继保电气有限公司

封一

《江苏电机工程》协办单位

封三

南瑞科技股份有限公司

封二

南京中凌科技股份有限公司

封四

《江苏电机工程》期刊更名启事

前插 1