

含统一潮流控制器输电线路断路器保护研究

朱晓彤, 赵青春, 谢 华, 刘 奎, 潘 磊

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为一种功能强大的柔性交流输电设备,目前在国内外电力系统中得到进一步推广并逐步应用在500 kV电压等级系统中,含UPFC输电线路在一个半接线方式下的断路器保护将面临新的应用问题。文中结合苏州南部电网500 kV UPFC示范工程实施,分析500 kV含UPFC系统对于断路器保护装置特殊功能需求,针对不同接线方式提出断路器保护适应性解决措施,指出不一致运行状态下断路器保护与UPFC控制保护配合策略,可有效避免断路器保护带UPFC重合闸的情况,从而为UPFC接入后系统稳定可靠运行奠定基础。

关键词:UPFC;断路器保护;自动重合闸;三相不一致

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)05-0121-05

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为功能强大的柔性交流输电设备,为传统手段难以解决的潮流分布不均、供电能力提升等问题提供了新的技术手段。UPFC的推广应用对于建设坚强智能电网,降低智能电网的能量损耗以及提高电能输送效率等方面都具有重要的意义^[1-2]。随着2015年南京220 kV西环网统一潮流控制器工程的成功投运^[3],国内正在逐步开展UPFC在更高电压等级、更大范围内的规模性推广应用的研究工作^[4]。

针对统一潮流控制器基础仿真、控制策略等方面较早开展了基础研究^[5-9],目前国内针对UPFC接入以后的研究多集中在如下两个方面:(1)对于UPFC本体系统控制保护优化研究。文献[10]通过构建UPFC新型潮流计算模型,设计了一种利用中间控制变量代替直接控制方式的控制策略;文献[11]针对基于MMC的UPFC系统优化阀侧短引线差动保护性能;文献[12]研究了一种具有短路限流功能的统一潮流控制器优化结构,给出了具体拓扑结构以及控制策略。(2)UPFC接入后交流保护适应性措施研究。文献[13]针对同杆双回线中引入UPFC以后对于传统距离保护的影响以及解决措施进行研究;文献[14]通过类比串补与UPFC系统的典型差异,总结对于交流保护的影响并提出适应性措施;文献[15]针对南京西环网220 kV UPFC工程中保护的配置和配合策略进行了分析研究。

随着UPFC在更高电压等级中的应用进入工程

实施阶段,500 kV系统中交流保护将新增断路器保护(circuit breaker protection, CB Protection)配置,自动重合闸与失灵保护等功能均包含在断路器保护中。UPFC接入后如何构建UPFC本体与断路器保护之间交互配合的通道,断路器保护如何实现高效可靠地重合闸从而满足UPFC整体系统可靠运行的要求,是当前阶段面临的新问题,需要重新进行系统性的综合考虑。

本文针对500 kV含UPFC系统断路器保护存在的问题进行分析研究,指出该系统对于断路器保护功能配置的特殊需求,继而提出完备的成套解决措施为现场工程实施提供参考。

1 苏州南部电网UPFC系统结构

本节针对UPFC典型系统结构进行说明,明确UPFC系统相关设备配置及其功能,结合苏州南部电网500 kV UPFC示范工程网架结构^[16],说明断路器保护配置情况及其在整个交流保护系统中需要特殊考虑的环节。

1.1 UPFC典型结构介绍

实现单回线路控制的UPFC系统整体架构如图1所示,它由两个背靠背的电压源换流器构成,两个换流器共用直流母线,二者都通过联接变压器接入系统中。其中,换流器1对应的联接变压器以并联形式接入,换流器2对应的联接变压器以串联形式接入^[17]。

换流器1的功能是通过公共直流母线提供或吸收换流器2所需要的有功功率,以维持串联变压器与线路之间的有功功率交换;换流器2的功能是通过串联联接的变压器向线路注入幅值和相角均可

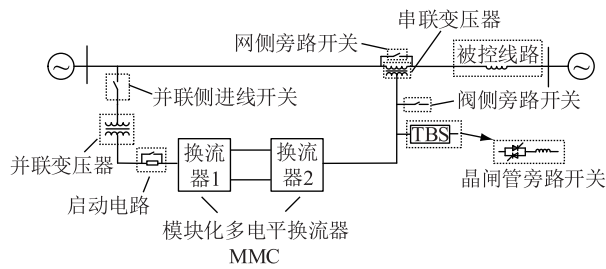


图1 UPFC系统结构

Fig.1 Structure diagram PFC system

控的电压矢量,可同时或有选择性地调节线路上的电压、阻抗和相角。除了换流器2能与系统进行有功和无功功率的交换外,换流器1也可同时发出或吸收无功功率,为系统提供独立的并联无功补偿。

为应对本体以及交流系统故障,UPFC系统配置了齐全的保护,能够在系统故障时通过网侧、阀侧旁路开关以及并联侧的进线开关快速动作,起到故障隔离的效果,UPFC本体交流及直流侧配置的保护功能主要包括:

- (1) 并联侧交流保护:短引线差动保护、交流过压欠压保护、零序过流保护;
- (2) 串联侧交流保护:短引线差动保护、交流过压欠压保护、零序过流保护、避雷器保护;
- (3) 换流器保护:连接线差动保护、阀侧过流过压保护、直流欠压过压不平衡保护、桥臂相关保护等。

UPFC接入后交流系统保护配置需相应的进行调整,主要包括串联变压器保护、并联变压器保护、线路保护、断路器失灵及自动重合闸保护、母差保护等。为适应UPFC接入后系统电气特征变化及UPFC运行控制的特殊需求,部分交流保护功能须针对性地进行优化完善以保证整体系统的运行效果。

1.2 苏州南部电网UPFC工程网架结构

为解决苏州南部电网在直流小方式下梅木双线的N-1过载问题,保证充分消纳锦苏直流输送功率,提升苏南地区电网的动态无功/电压支撑能力,选择在紧邻500 kV木渎变装设UPFC装置,站址位于苏州市吴中区藏书镇篁村,南距藏书镇约4 km,北距苏州世纪大道约3 km,西侧距藏北路约300 m。将梅里—木渎双回线改接至UPFC,实现UPFC装置在梅里—木渎双回线的控制功能,UPFC站出线5回,梅里2回,木渎3回(2回串联变压器,1回并联变压器)。

新增UPFC接入的木渎至梅里双回线路详细网架结构如图2所示。

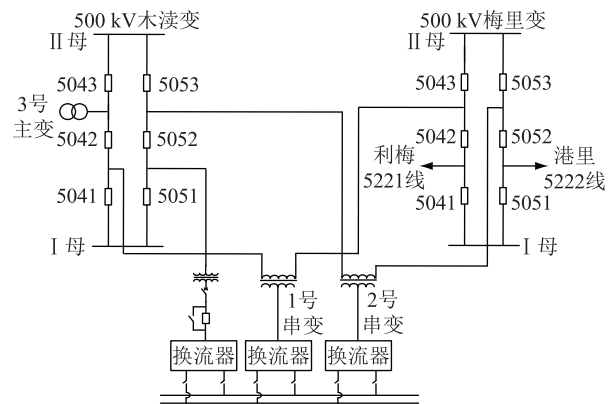


图2 梅木双线网架结构

Fig.2 Structure of Meili-Mudu double transmission line

对于500 kV一个半断路器接线方式,区别于220 kV系统,其断路器重合闸功能及失灵保护功能均配置在断路器保护中。断路器保护依据不同的接线情况,需要进行相应的交互配合处理,主要考虑如下几种接线情况下的断路器保护功能改进:

- (1) 木渎变5053边断路器,梅里变5053边断路器,间隔出线均增加了UPFC接入;
- (2) 木渎变5052断路器为线变串的中断路器,靠近I母侧间隔为并联变压器;
- (3) 梅里变5052断路器为线线串的中断路器,靠近I母侧间隔为常规出线,不含UPFC。

作为国内首个500 kV UPFC示范工程,苏州南部电网500 kV UPFC示范工程在实施过程中充分考虑不同接线方式下UPFC与断路器保护之间交互配合,从而提升整体系统运行可靠性^[18]。

2 断路器重合闸与UPFC本体配合要求

为了针对含UPFC系统断路器保护进行适应性改进,需要在结合UPFC本体控制保护特性和整体系统运行要求基础上,分析既有的断路器保护功能配置,提出含UPFC系统中断路器保护运行指标。

2.1 常规断路器保护逻辑介绍

常规断路器保护全称为断路器保护与自动重合闸装置^[19],装置功能包括断路器失灵保护、三相不一致保护、死区保护、充电过流保护和自动重合闸等。与UPFC接入后配合关系最为密切的是断路器保护自动重合闸功能。

目前国内110 kV及以上电压等级应用的断路器重合闸均为一次重合闸方式,可实现单相重合闸或三相重合闸。在500 kV系统一个半断路器接线系统中,一般采用单相重合闸方式。单相重合闸由两种启动方式,一是由线路保护跳闸启动重合闸,二是由断路器跳闸位置启动重合闸。跳闸位置启

动重合功能可由“单相 TWJ 启动重合闸”控制字来设置该功能的投退。

线路保护跳闸启动重合闸逻辑如图 3 所示,当仅单相跳开,即装置收到单相跳闸的信号接点且该接点已返回,开始启动单相重合闸,经整定的单相重合闸延时后重合闸动作出口。

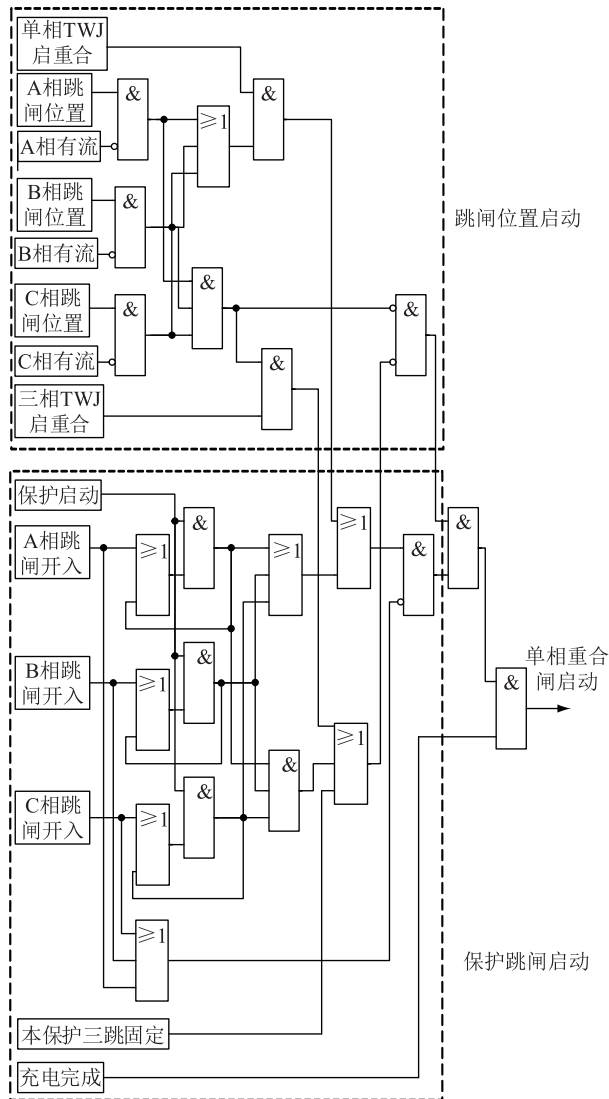


图3 断路器保护单相重合闸启动逻辑

Fig.3 Starting logic diagram of single phase reclosing for CB protection

断路器跳闸位置启动重合闸逻辑如图 3 所示,当单相跳闸位置开入满足且投入“单相 TWJ 启动重合闸”控制字时,开始启动单相重合闸,经整定的单相重合闸延时后重合闸动作出口。

从上文逻辑说明可以看出,常规断路器保护重合闸功能在识别断路器跳闸以后即开始进行重合闸计时,不受其他外部条件影响,对于在输电线路中接入 UPFC 系统以后,常规的断路器保护重合闸功能将不能完全适用。

2.2 含 UPFC 系统断路器重合闸配合要求

由于电力电子器件耐受冲击能力相对较弱,需要尽量避免出现带 UPFC 重合的情况,特别是当带 UPFC 重合于永久性故障时,对于串联变压器以及相应的直流侧设备,都会带来较大的影响。与常规串联电容、串联电抗等补偿设备能够耐受重合闸冲击不同,UPFC 系统需要重点考虑其在重合闸期间的整体耐受能力。

一方面,适应 UPFC 接入的输电线路保护与 UPFC 本体控制保护之间增加了相互配合,当线路保护动作后,联动 UPFC 本体保护,从而实现将 UPFC 退出运行;另一方面,由于难以保证在重合闸时 UPFC 已经退出运行,需要在 UPFC 系统与断路器保护之间构建相互配合通道,增加相应的逻辑处理环节,从而保证不会出现带 UPFC 重合闸的工况。

考虑到 UPFC 系统的可靠性,对于断路器保护重合闸逻辑提出了明确要求:断路器保护不能重合于 UPFC 系统运行状态,即当断路器保护重合闸时 UPFC 串联变压器网侧旁路开关应该处于闭合状态,从而避免重合闸对于串联变压器以及直流侧系统造成影响。

3 适应 UPFC 接入的断路器保护解决方案

由于 UPFC 系统具备完整的控制保护逻辑,采集了相应的测量 PT、CT、断路器位置等关键信息,并且在 UPFC 站与交流站之间构建了相应的通信渠道,使得 UPFC 系统与断路器保护之间的紧密配合成为可能,本节针对上文提出的问题,为断路器保护提出成套解决方案,以满足 UPFC 接入以后的系统运行要求。

3.1 重合闸允许判别条件优化

依据上文分析,断路器保护重合闸时需要 UPFC 处于退出运行状态,直观来讲,串联变压器网侧旁路开关合闸状态能够有效反应这一状态。

因此,对于间隔的出线接入 UPFC 系统时,要在断路器保护中设置对应的网侧旁路开关合闸位置开入接口,当断路器保护由于线路保护动作或者断路器位置启动重合闸时,必须满足对应的网侧旁路开关在合位,才允许重合闸动作出口。具体逻辑如图 4 所示。

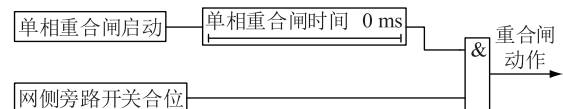


图4 断路器保护重合闸优化逻辑

Fig.4 Optimization logic of reclosing for CB protection

由于串联变压器侧断路器合闸需要一定时间,为了不影响既有的输电线路重合闸时间,仅须在断路器保护重合闸出口前使用该合闸位置进行把关即可。

3.2 线线串特殊问题考虑

上文提出的引入网侧旁路开关合闸位置作为重合闸必要条件,能够有效地解决线变串中出线含 UPFC 系统的情况。

在常规系统中,线线串的中断路器仅具备一组分相跳闸开入,两条出线的线路保护动作信号并联接入该开入,以实现任一线路跳闸均能够启动断路器重合闸。但在线线串接线方式下,如果两条出线中,其中一条线路接入 UPFC,而另一条为常规输电线路,如图 2 中梅里变侧两个线线串的配置情况,对于这个串内的中断路器,由于串内两条出线的任一线路保护动作均会启动重合闸,按照新增网侧旁路开关合位作为重合闸允许条件则常规线路故障时会出现重合闸无法出口动作问题。

为了解决中断路器在线线串中的重合闸应用问题,在断路器保护中新增一组分相跳闸开入。应用于中断路器时,常规线路的线路保护跳闸信号接入原有的分相跳闸开入(第一组分相跳闸开入),安装 UPFC 线路的线路保护分相跳闸信号接入新增的一组分相跳闸开入(第二组分相跳闸开入)。

图 4 所示逻辑进一步优化如图 5 所示。当有重合闸启动,且装置未收到第二组分相跳闸开入,也不是跳闸位置启动重合闸时,可以认为是常规线路的线路保护装置跳闸启动了重合闸,此时重合闸出口不经网侧旁路开关位置把关;反之则重合闸出口需要经网侧旁路开关位置把关。



图 5 中断路器保护重合闸优化逻辑
Fig.5 Optimization logic of reclosing for Tie CB protection

应用于边断路器时,当其所接线路安装有 UPFC 时,上述优化后的断路器保护装置仍然适用:线路保护的跳闸信号接入第二组分相跳闸开入,第一组分相跳闸开入不接即可。

3.3 不一致运行状态保护逻辑改进

当断路器单相偷跳造成三相不一致需要启动重合闸时,重合闸前也需要串联变压器网侧旁路开关处于合位。由于系统可能并无线路保护动作,也没有相关的扰动造成 UPFC 停运,此时就需要断路

器保护输出信号给 UPFC 控制系统,使其相应串联侧停运,旁路开关闭合,此信号通过断路器保护开出接点输出。具体逻辑如图 6 所示。

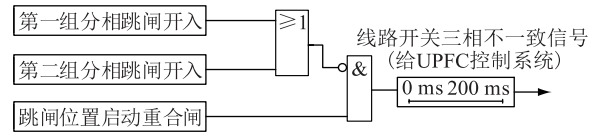


图 6 三相不一致运行时断路器保护逻辑

Fig.6 Logic in three phase inconsistent operation for CB protection

与之相配合的,UPFC 收到该信号后临时退出运行,当重合闸完成后,UPFC 控制系统监测交流系统电压和电流已经恢复正常,则开始解锁换流器启动 UPFC 重投策略,将 UPFC 及时投入线路中,从而有效降低对于系统运行带来的影响。

4 结语

本文对于 500 kV 一个半接线断路器接线方式下接入 UPFC 后断路器保护的适应性进行评估,对于该系统中断路器保护重合闸功能提出明确的技术要求,提出了全新的断路器保护与 UPFC 系统之间的交互配合方案,主要包含如下内容:(1) 断路器保护新增一组分相跳闸开入,对应间隔的出线如果包含 UPFC,则将该线路保护的跳闸接点接入新增的这一组分相跳闸开入;(2) 新增的分相跳闸开入启动重合闸时,须额外判别串联变压器网侧旁路开关合闸位置作为重合闸允许条件;(3) 为避免断路器偷跳造成带 UPFC 重合闸,断路器偷跳启动重合闸时,将同时输出信号至 UPFC 控制设备用于其临时退出,重合后及时自动投入运行。

通过上述的配合措施,可有效避免交流线路故障及异常运行状态对于 UPFC 本体设备带来的影响,增强整体系统动作可靠性,从而为含 UPFC 的 500 kV 系统持续稳定运行奠定基础。

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 Company. 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: 南京西环网统一潮流控制器示范工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
State Grid Jiangsu Electric Power Company. Unified power flow controller engineering practice: demonstration project of unified power flow controller for Nanjing West Ring Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.

- [3] 陈刚, 刘建坤, 李群. 统一潮流控制器技术现状及应用分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1):1-6.
CHEN Gang, LIU Jiankun, LI Qun. State of the art and application analysis of unified power flow controller [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1):1-6.
- [4] 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.
- [5] 唐爱红, 朱鹏程, 程时杰, 等. 统一潮流调节器实验装置的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6):122-126.
TANG Aihong, ZHU Pengcheng, CHENG Shijie, et al. Study of the test equipment for UPFC [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(6):122-126.
- [6] 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, 40(3):73-77.
ZHANG Zhenhua, JIANG Daozhuo. Control strategy simulation of UPFC based on modular multilevel converters [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3):73-77.
- [7] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. UPFC 的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10):42-48.
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian. Cross-coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC [J]. Proceedings of the Chinese Society For Electrical Engineering, 2007, 27(10):42-48.
- [8] 卓谷颖, 黄晓明, 楼伯良, 等. 直流建模对静态电压稳定分析的影响[J]. 浙江电力, 2016, 35(6):6-10.
ZHUO Guying, HUANG Xiaoming, LOU Boliang, et al. Impacts of UHVDC transmission system modeling on the static voltage stabilization analysis [J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(6):6-10.
- [9] 刘盛松, 胡伟, 邹燕, 等. 多线路潮流控制的 UPFC 模型研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1):37-40.
LIU Shengsong, HU Wei, ZOU Yang, et al. Study on the UPFC model for multi-lines power flows control [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1):37-40.
- [10] 刘永江. UPFC 控制策略研究及对电力系统的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
LIU Yongjiang. Research on UPFC control strategy and its influence on power system [D]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University, 2011.
- [11] 郑涛, 吴丹, 宋洁莹. 基于 MMC 的统一潮流控制器交流侧故障特性及保护方案[J]. 电网技术, 2015, 39(12):3570-3577.
ZHENG Tao, WU Dan, SONG Jieying. The AC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on MMC [J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3570-3577.
- [12] 阎博, 江道灼, 吴兆麟, 等. 具有短路限流功能的统一潮流控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4):69-73.
YAN Bo, JIANG Daozhuo, WU Zhaoling, et al. Design of unified power flow controller with fault current limiting [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4):69-73.
- [13] 晏宇. 含 UPFC 的同杆双回线路距离保护的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
YAN Yu. Study on distance protection on double-circuit line with UPFC [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.
- [14] 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(4):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):137-142.
- [15] 林金娇, 李鹏, 孔祥平. 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. The UPFC protection system configuration and action strategy in Nanjing western power grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):56-60.
- [16] 李鹏, 林金娇, 孔祥平. 统一潮流控制器在苏南 500 kV 电网中的应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):20-24.
LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping. Application of UPFC in the 500 kV southern power grid of Suzhou [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):20-24.
- [17] 鲁江, 秦健, 潘磊. 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. Study on architecture and configuration for control and protection system of Nanjing UPFC project [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):1-5.
- [18] 肖建民, 董云龙, 卢宇, 等. 统一潮流控制器的 RTDS 仿真试验系统[J]. 供用电, 2017, 34(8):33-38.
XIAO Jianmin, DONG Yunlong, LU Yu, et al. Simulation test system based on RTDS for unified power flow controller [J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(8):33-38.
- [19] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHU Shengshi. Principle and technology of relay protection in HV power network [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

作者简介:



朱晓彤

朱晓彤(1976—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究管理工作(E-mail:zhuxt@nrec.com);

赵青春(1980—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护研究工作(E-mail:zhaocq@nrec.com);

谢华(1983—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护研究工作。

The Development of Composite Insulators Hydrophobicity Analysis Software Based on MATLAB Platform

YAN Kang

(State Grid Luquan Power Supply Company, Shijiazhuang 050200, China)

Abstract: The hydrophobic condition of composite insulators has an important influence on the security and stability of power system. In order to identify hydrophobicity of composite insulators accurately, fast and conveniently, with the tools of MATLAB image processing and GUI developing composite insulators hydrophobicity analysis software. The software was developed using a modular thinking, the establishment of image processing, the amount of drops of water feature extraction, hydrophobicity detection methods and database management modules. The improved Canny operator was used for image segmentation, extraction characteristics of water drop (or water stains), finally the improved RBF neural network was used to analyse the insulators hydrophobicity grade. The results of experiment show that the software was able to identify insulators hydrophobicity grade accurately and objectively and its accurate recognition rate is as high as 92%. The software can avoid the influence of artificial factors, improve the work efficiency and provide data support and reference for field operation personnel.

Key words: composite insulators; hydrophobicity; MATLAB; software development

(编辑 方 晶)

(上接第 125 页)

Circuit Breaker Protection of 500 kV Transmission Line with UPFC

ZHU Xiaotong, ZHAO Qingchun, XIE Hua, LIU Kui, PAN Lei

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

Abstract: As a powerful flexible AC transmission equipment, Unified Power Flow Controller (UPFC) has been further extended in the domestic power system and gradually applied in the 500 kV level system, circuit breaker protection in the 3/2 connecting mode of transmission line with UPFC will face new application problems. Based on the Southern SuZhou power grid 500 kV UPFC demonstration project, this paper analysis the circuit breaker protection device's special functional requirements in power system with UPFC. According to different connecting modes, the adaptability of circuit breaker protection and the combination strategy of circuit breaker protection and UPFC control protection in three phase inconsistent operation are proposed. All of this can effectively avoid the reclosing of circuit breaker protection with UPFC. The research improves operation reliability of UPFC system.

Key words: unified power flow controller(UPFC); circuit breaker protection; automatic reclosing; pole discrepancy

(编辑 钱 悦)