

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181215

统一潮流控制器对继电保护的影响及对策研究综述

郑涛¹, 汤哲¹, 张滋行¹, 李厚源¹, 曹虹²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;
2. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京 100192)

摘要: 统一潮流控制器可以提高输电线路的传输容量, 提高系统稳定水平。但当其接入电网后, 会使线路中的电压、电流以及阻抗发生变化, 可能会造成线路继电保护的误动作。介绍了统一潮流控制器的工作原理。综述了统一潮流控制器以及静止同步补偿器、静止同步串联补偿器接入电网给线路继电保护(包括距离保护、纵联保护)造成的影响。分析了现有的应对方案及其不足, 并对后续研究重点给出了相应的建议。

关键词: 统一潮流控制器; 继电保护; 影响; 对策

Review of the influence of unified power flow controller on relay protection and countermeasures

ZHENG Tao¹, TANG Zhe¹, ZHANG Zihang¹, LI Houyuan¹, CAO Hong²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. The State Key Laboratory for Security and Energy Saving (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: The unified power flow controller can improve the transmission capacity of the transmission line and enhance the system stability level. However, when it is connected to the grid, the voltage, current and impedance in the line will change, which may cause malfunction of the line relay protection. The working principle of the unified power flow controller is introduced. The effects of the unified power flow controller and the static synchronous compensator and the static synchronous series compensator on the line relay protection (including distance protection and longitudinal protection) are summarized. The existing solutions and their deficiencies are analyzed, and corresponding suggestions are given for the future research.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YF0900604).

Key words: unified power flow controller (UPFC); relay protection; influence; countermeasures

0 引言

优化现有电力网络潮流分布是解决我国目前负荷快速增长、输电通道率利用不均匀的有效方法之一^[1]。柔性交流输电技术(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)是一种利用大功率电力电子器件从而快速、准确改变电气参数, 提高电网的输电能力, 保证电网安全稳定运行的技术^[2-3]。根据接入电网的方式不同, 典型的 FACTS 装置可以分为以下三类: 1) 并联型装置, 如静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM); 2) 串联型装

置, 如静止同步串联补偿器(Static Synchronous Series Compensator, SSSC)、晶闸管控制串联电容器(Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC); 3) 串/并联组合型装置, 如统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)。UPFC 在控制的作用下, 可以实现串联补偿、移相、端电压调节、潮流调节等功能^[4-8]。但 UPFC 接入线路后, 改变了传输线路均匀分布的特点, 相当于在线路中接入一个可变的阻抗, 导致测量电压、测量电流等构成继电保护判据的电气量发生了变化, 进而有可能导致电网发生故障时, 相关元件的继电保护不正确动作。

本文主要总结了国内外有关 UPFC 的接入对继电保护影响的研究现状, 分析了 UPFC 接入对不同保护

原理造成的影响及现有的解决方案，并对后续研究重点给出了相应的建议。

1 UPFC 的工作原理

UPFC 系统结构图如图 1 所示^[9-10]。UPFC 是由两个通过直流侧电容耦合的电压源换流器(Voltage Vonverters, VSC)组成,换流器 1 通过并联变压器 T_{sh} 接入系统,换流器 2 通过串联变压器 T_{sc} 接入系统。换流器 1 和并联变压器 T_{sh} 统称为并联侧,换流器 2 和串联变压器 T_{sc} 统称为串联侧。其中,换流器 1 能够通过并联变压器 T_{sh} 向系统发出或吸收无功功率,维持 UPFC 接入点的交流母线电压;向系统发出或吸收有功功率,维持直流侧电压的恒定。换流器 2 能够通过串联变压器 T_{sc} 向电力系统注入一个幅值和相位均可调、与系统同频的电压矢量,进而控制线路的有功和无功潮流^[11]。

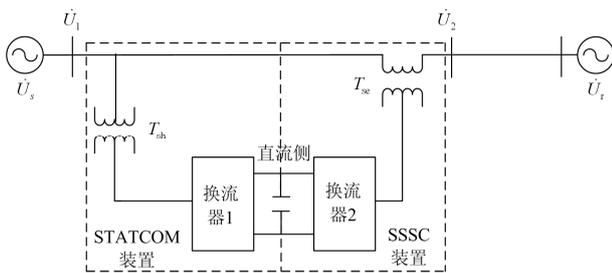


图 1 UPFC 系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of UPFC

UPFC 装置可以看做由 STATCOM 和 SSSC 并联而成,如图 1 划分区域所示。通过调整相应的控制策略,可以使 UPFC 作为 STATCOM 运行,只实现并联侧的功能;或作为 SSSC 运行,只实现串联侧的功能;也可以串并联侧整体投入运行,作为 UPFC 实现本身的功能。所以,UPFC 作为典型的第三代 FACTS 装置,结合了 STATCOM 和 SSSC 的优点:可以调节系统的有功功率、无功功率和电压,也可以提高线路的输送能力,改善系统潮流分布,并且可以提高系统的暂态稳定性,抑制低频振荡^[12-13]。

2 UPFC 对线路继电保护的影响及对策

UPFC 接入线路后,改变了原有的线路参数,有可能使故障电流减小,或使故障电压不致降低太多^[14]。此外,UPFC 受电力电子器件控制作用的影响,其故障期间的暂态过程与传统电气设备的故障特性不同,会对 UPFC 接入系统的继电保护带来影响。

由于 UPFC 可以看作是由 STATCOM 和 SSSC

组成,因此关于 STATCOM 和 SSSC 对线路继电保护的影响及相应对策的研究具有一定的参考价值。

2.1 UPFC 接入产生的谐波对线路继电保护的影响及对策

FACTS 在稳态运行和动态调节过程中都会向电网注入谐波,给继电保护设备带来干扰,影响电网的安全运行。文献[15]指出 FACTS 的安装位置越靠近母线,产生的谐波对继电保护的影响越大,具体分析了谐波对保护用铁芯元件传变特性的影响,以及对序分量元件、突变量元件和比相式阻抗继电器、工频变化量阻抗继电器的影响,表明 FACTS 装置产生的谐波会引起继电保护的相关元件误动作。文献[16-18]分别说明了 STATCOM、SSSC 以及 UPFC 在投入使用的过程中会产生谐波,进而影响 FACTS 装置接入线路的继电保护的正常工作。

针对 UPFC 接入的情况,文献[19]指出正常运行时,UPFC 安装在线路的不同位置引起电流谐波的特征不同;不同故障类型引起的电流谐波特征也不同。分析正常和故障时电流的谐波特征,有助于避免 UPFC 产生的谐波使保护不正确动作。文献[20]重点研究了 UPFC 的谐波对工频突变量阻抗继电器的影响,指出各次谐波分量,尤其是低次谐波对突变量保护的動作影响较大,它会增加保护动作时间,引起突变量阻抗继电器的误启动。因此,对于含 UPFC 线路产生的谐波,可以通过比较采取滤波器、多电平、脉宽调制技术的优缺点,从中选择合适技术或方法减小和抑制 UPFC 接入引起的谐波^[14,20]。

2.2 UPFC 动态调节对距离保护的影响及对策

距离保护通过比较测量阻抗值与整定阻抗值的大小及相位关系,从而有选择性的切除故障^[21]。当 STATCOM、SSSC 及 UPFC 接入线路后,受控制策略的影响,线路发生故障时,该类装置动态调节过程中,会使测量阻抗发生变化,进而可能影响距离保护的正确动作。

2.2.1 STATCOM 对距离保护的影响及对策

STATCOM 不同控制策略对继电保护的影响不同。文献[22]基于双回线路,将 STATCOM 接入其中一回线路,分析分别采用对称和不对称控制策略时,STATCOM 对距离保护的故障相和非故障相的影响,在此基础上提出了一种改进的测量阻抗算法。但存在的问题是,该文献只讨论了双回线中接有 STATCOM 的线路距离保护受到的影响,并未讨论对另一回线距离保护的影响,亦未讨论双回线发生跨线故障时的保护方式。另外,文献[22]仅分析了 STATCOM 安装在线路中间时的情况,并未分析将 STATCOM 安装在其它地点时的情况。文献[23-24]

将 STATCOM 安装在线路首端、中间、末端,分析了在这三种安装位置时,测量阻抗和附加阻抗的表达式,表明 STATCOM 的安装地点会影响距离保护的動作。根据电网不同的运行状况和故障状态而实时调节保护的性、逻辑过程、整定值的保护叫做自适应保护^[25]。文献[23]提出了一种通过识别 STATCOM 是否位于故障回路而自适应调整测量阻抗值,从而消除 STATCOM 对距离保护影响的方案,该方案对于消除 UPFC 对距离保护的影响具有一定的借鉴意义。

2.2.2 SSSC 对距离保护的影响及对策

文献[17, 26]从距离保护中常用的两种继电器入手,分别讨论了 SSSC 对基于工频量的欧姆继电器和基于突变量的工频变化量距离继电器的影响,分析结果表明工频变化量继电器受 SSSC 的影响较小,但是也可能造成距离保护的误动。文献[27-28]公式推导了 SSSC 接在线路中点时测量阻抗表达式,表明当故障发生位置、SSSC 补偿方式、注入电压等方面不同时,测量阻抗也会不同,并且仿真分析得到了阻抗继电器的动作特性,即:当 SSSC 在故障范围之内,距离保护可能会误动作;当 SSSC 在故障范围之外,距离保护几乎不受影响。

现有文献给出了几种解决 SSSC 对线路保护影响的方案:一种方案是根据故障发生在 SSSC 接入点前、后的小波包熵值的不同,来判断故障发生的位置,提出测量阻抗的修正方案,从而消除了 SSSC 对距离保护的影响,该方法不受故障位置、故障初相角、SSSC 补偿度及过渡电阻等影响,但是该方法存在下述问题:用来判断故障位置的小波包熵整定值是根据大量仿真,由具体的 SSSC 仿真系统得到的,是否适用于其他 FACTS 装置,譬如 UPFC,仍需进一步的理论研究^[27,29]。还有一种方案是利用不受工频分量影响的暂态量保护。根据区内、外故障时线路小波奇异熵值的不同,提出一种单端暂态量保护的判据,可以有效区分区内、外故障,不受故障位置、故障类型、串补度等影响,但该方法的不足之处是单端暂态量沿高压输电线路传播时会衰减,当故障点远离保护装置时,可能丢失故障信息,造成保护误判^[17]。文献[27,30]对文献[17]进行了改进,根据区内、外故障时线路两端小波包熵值之差的,提出了一种双端暂态量保护新方案,同样可以有效区分区内、外故障,不受故障位置、故障初相角、串补度、过渡电阻等影响。但该方法利用双端高频暂态分量进行区内、外故障判别,对线路两端保护的采样率和通信都有较高的要求。

SSSC 会对其接入交流系统的线路保护产生影

响,另外,还需要考虑 SSSC 本体保护的動作情况,因此,SSSC 的本体保护和线路保护需要协调配合,共同保证 SSSC 装置和系统的安全可靠运行。

2.2.3 UPFC 对距离保护的影响及对策

1) UPFC 对距离保护的影响

当 UPFC 投入运行后,由于其串、并联分支的影响,使得距离保护的测量阻抗值发生变化,当电网故障时,可能引起接入线路的距离保护误动作。

文献[31]对含 UPFC 的线路发生故障后,保护的動作行为进行了仿真分析。通过比较含 UPFC 线路的保护動作行为,发现反方向短路不会对含 UPFC 的线路造成影响,而当正方向短路时,可能缩小或扩大保护范围。文献[32]改变 UPFC 自身参数、安装位置、短路类型、过渡电阻等因素进行仿真,得出距离保护的保護跳闸区域与上述因素都有关系。文献[33]通过仿真实验得到测量阻抗变化轨迹,分析了 UPFC 接入线路的不同位置、不同短路类型、不同故障位置引起的测量阻抗和保护动作的变化。文献[34]仿真 UPFC 作为 STATCOM 和 UPFC 运行时,分别对距离保护的影响。比较发现当 UPFC 运行时,由于 STATCOM 和 SSSC 两者共同注入有功和无功,距离保护受到的影响要明显高于仅采用 UPFC 的 STATCOM 部分的系统。

UPFC 对距离保护的影响主要体现在测量阻抗上,通过画出含 UPFC 的故障等效电路图,可以得到测量阻抗表达式,从不同角度分析阻抗增量的表达式会得到不同的结论。文献[34-38]分析了正常和故障、有无 UPFC、各种故障类型、不同故障位置的测量阻抗表达式,表明阻抗增量是 UPFC 串联侧注入电压和并联侧的无功电流引起的。长距离输电时通常采用双回线,双回线中的非故障回线零序互感也会引起故障回线的阻抗增量^[32,37-10]。文献[32,39-40]表明阻抗增量是 UPFC 安装位置、UPFC 的并联支路电流、故障位置与故障前的系统状态引起的。文献[14, 20]分析了正常和故障时的测量阻抗表达,表明故障情况下阻抗增量与调节参数有关,以及分析了阻抗增量分别是感性和容性的情况下,测量阻抗值和线路阻抗的大小关系。

本体保护与系统保护协调配合是 UPFC 接入交流系统稳定运行的重要前提条件^[41]。文献[42-44]考虑了本体保护的晶闸管旁路开关(Thyristor Bypass Switch, TBS)、串联侧高压侧旁路开关(High Voltage Breaker, HVB)正确動作与否对距离保护的影响。文献[44]把线路故障点分成 UPFC 上级线路故障、UPFC 接入线路故障、UPFC 下级线路故障,在这三种情况下根据 TBS 和 HVB 是否動作,分别建立

故障等值模型,对 UPFC 线路本侧和 UPFC 线路对侧距离保护影响进行了理论分析和公式推导,由公式可以看出,TBS 和 HVB 是否动作会导致测量阻抗表达式的不同,因此对距离保护的影响也不同。文献[42]指出 TBS 导通后,电压互感器的安装位置可能使距离保护 I 段保护范围缩小,严重情况下需要将 I 段退出运行,利用 UPFC 保护与距离保护 II 段、III 段相配合。

2) 消除 UPFC 对距离保护影响的对策

对于 UPFC 接入对距离保护的影响,不少文献给出了相应的对策。当故障不太严重时,可以改变 UPFC 的控制策略^[33],调节系统的参数^[39];当故障比较严重时,可以通过在 UPFC 上装设继电保护装置,使 UPFC 退出运行,确保保护的正确动作和 UPFC 本身安全^[14,20,39],但 UPFC 在退出时会增加保护动作的延时,不利于系统的暂态稳定;对此可以采用自适应技术,诸如改变 TA、TV 的安装位置^[33]和使用模糊技术、人工神经网络等人工智能技术开发的具有自适应功能的保护。利用模糊技术,开发保护模糊逻辑控制,解决 UPFC 的非线性、不确定性问题^[20,39-40];利用人工神经网络,可以使 UPFC 的控制与线路保护相配合^[14,20,39-40,45-47]。

针对并联侧注入电流和串联侧注入电压引起的测量阻抗的阻抗增量,有两种自适应保护方案。一种是自适应修正整定阻抗值^[20],测量阻抗值不发生变化,而使整定阻抗圆变成可变圆;另一种是自适应调整测量阻抗值^[14],而整定阻抗值不发生变化,这两种方案都是用多次迭代的算法修正阻抗值。仿真实验表明这两种方案对于各种短路故障都适用,克服了含 UPFC 线路的传统距离保护不能正确动作的缺点,保证电力系统安全运行^[35-36]。文献[37-38]提出在自适应调整测量阻抗值时,考虑到发生短路时保护安装处到短路点的故障距离不能提前知道,故令故障距离为迭代变量,反复多次计算,当故障距离最终被算出时,得到最终的各个附加分量以及自适应测量阻抗值。仿真分析,验证了算法的简单可靠性,消除了附加阻抗给距离保护带来的影响。但是不足之处是这两种自适应保护方案都仅考虑了金属性故障,未对过渡电阻存在的情况加以分析。

考虑本体保护与系统保护的配合,提出如下解决方案消除 UPFC 对距离保护的影响。当 TBS 正确触发导通、HVB 无法合闸导致距离保护范围缩小时,可以在整定计算时将变压器的等效漏抗考虑在内^[42-43];当 TBS 无法触发、HVB 正常合闸导致距离保护 I 段不能正确动作时,可以采用一种由基于 R-L 微分方程算法的距离保护 I 段和传统距离保

护 II 段、III 段构成的新型距离保护方案。该方案通过计算短路点到保护安装处的距离和波动程度,来正确判断区内、外故障,保证了保护动作的可靠性,并且不受 UPFC 运行模式和控制参数变化的影响^[43],但电力系统发生振荡等特殊情况还有待研究。

2.3 UPFC 对纵联保护的影响及对策

纵联保护在高电压等级的输电线路中应用广泛,通过反映线路两端的电气量,可以准确区分区内、外故障,实现线路全长的无时限切除故障,具有绝对的选择性^[48]。由于当 UPFC 本体外部故障时,TBS 将会导通,把串联变压器低压侧绕组旁路,引起交流系统中电气量的再一次突变,影响线路的纵联保护^[49]。因此,本节主要分析 UPFC 对纵联零序保护、纵联距离保护和工频变化量方向保护的影响以及相应的解决方案^[42,49-50]。

纵联零序保护是超高压线路保护不可缺少的一部分,原理简单,易于实现,动作时间快,不受系统振荡和过渡电阻的影响,已经在高压线路中广泛应用^[51]。根据故障后 TBS 导通前后的两个阶段以及实际工程 UPFC 串并联变压器绕组的接法,可以分析故障时的零序网络,发现 UPFC 在零序网络中呈现感性特征,零序方向元件不会误判断故障方向,UPFC 不会影响线路的纵联零序保护^[49]。

纵联距离保护是指经过通道,传送线路两端正方向距离判别的信号,实现全线速动的保护^[52]。功率倒向是影响纵联距离保护的重要因素之一,由于系统短路容量一般远大于 UPFC 的容量,所以 TBS 导通使 UPFC 从交流系统中切除一般不会有功率倒向的问题。假设在极端情况下,出现功率倒向,纵联距离保护通常采用的傅式算法可以避免保护的误动作^[49]。

工频变化量方向保护结构简单,动作速度快,适应性广,不受系统振荡和过渡电阻的影响,不存在常规方向元件的电压死区问题^[53]。当 UPFC 外部的交流系统发生严重故障导致 UPFC 不能安全运行时,UPFC 的本体保护会自动动作,把 UPFC 从交流系统中切除。从而使交流系统中的电气量再一次突变,与交流故障带来的电压、电流分量的突变进行“电气竞争”,影响线路工频变化量方向保护的正确动作^[49]。非 UPFC 线路故障时,会引起 UPFC 线路的保护误动,或非 UPFC 线路的保护拒动^[42]。文献[50]从基于工频突变量方向元件的基本原理入手,根据故障前后电压、电流的突变量,用公式定性推导阻抗突变量的表达式,同时考虑到 UPFC 的本体保护动作,得出如下结论:基于工频突变量的

方向元件仍能识别含 UPFC 线路的正方向故障, 但不确定能否识别含 UPFC 线路的反方向故障。当故障前后继电器测得的工频电压突变量大于 UPFC 串联侧注入电压时, 方向元件可以正确动作; 反之, 方向元件可能误动作。

针对 UPFC 接入给纵联保护带来的影响, 文献[49]指出可以改进含 UPFC 线路和相邻线路的保护, 不再采用工频变化量方向保护, 但是并未给出具体的线路保护改进方案。

3 后续研究重点及建议

1) UPFC 通过调整串联变压器输出, 可以改变接入线路电压的大小和相位, 不同潮流下串联电动势的幅值、相位不同, 从而对距离保护产生不同的影响, 因此有必要研究在不同潮流水平下, UPFC 对距离保护的影响。STATCOM、SSSC 为减小本身对距离保护的影响而提出测量阻抗修正算法、单端/双端暂态量保护等方法, 对减小 UPFC 给距离保护造成的影响有一定的借鉴意义。

2) 纵联方向保护作为超高压线路的主保护, 可以无时限切除线路全长范围内任意一点的故障, 针对 UPFC 接入线路后, 对基于工频突变量的方向元件可能造成的影响, 可以采取自适应的方向保护。

3) MMC-UPFC 本体外部故障时, 串并联侧 MMC 闭锁, UPFC 从线路中退出。当采取不同的故障渡越策略, 串并联侧的 MMC 闭锁情况不同, 对保护的影响各不相同, 相应对策也就各不相同。分析采取不同的故障渡越策略时, 对保护造成的影响及相应的解决方案是未来需要进一步研究的内容之一。

4 结论

UPFC 可以调节潮流, 提高电网的输送能力, 有着广阔的应用前景。但 UPFC 受电力电子器件的影响, 当其接入电网后, 可能会造成继电保护的误动作。本文对现阶段 UPFC 以及 STATCOM、SSSC 接入电网给继电保护带来的影响以及相应的对策进行了比较全面的分析和总结。

1) UPFC 接入线路, 会改变保护的测量阻抗值, 而 TBS 与 HVB 是否动作, 对保护的测量阻抗值影响不同。对此, 提出多种对策: 如改变控制策略, 将 UPFC 退出运行, 采用自适应保护, 采用由基于 R-L 微分方程算法的距离保护 I 段构成的新型距离保护方案等。

2) UPFC 接入线路可能会影响工频变化量方向

保护的正确动作, 然而目前并未有可供参考的解决方案, 因此建议对此展开进一步的研究。

3) UPFC 采取不同的故障渡越策略时, 对保护造成的影响不同。未来研究需考虑 UPFC 的故障渡越策略与线路保护的协调配合。

参考文献

- [1] 周正宇. 含 UPFC 电力系统潮流优化及预防控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
ZHOU Zhengyu. Research on power flow optimization and preventive control in the power system with UPFC[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [2] GYUGYI L, SCHAUDER C D, TORGERSON S L, et al. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 10(2): 1088-1097.
- [3] 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.
MA Fan. Research on the operation characteristics and control strategies of UPFC[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [4] 祁欢欢, 陆振纲, 陈静, 等. 基于模块化多电平的统一潮流控制器换流器和直流侧故障特征分析及保护配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 59-68.
QI Huanhuan, LU Zhengang, CHEN Jing, et al. Converter and DC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 59-68.
- [5] 周绍元, 李志勇, 陈卓, 等. 适用于 UPFC 多个控制策略间平滑切换的建模[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 97-102.
ZHOU Shaoyuan, LI Zhiyong, CHEN Zhuo, et al. Modeling of smooth handoff suitable for UPFC between multiple control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 97-102.
- [6] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.
- [7] GYUGYI L, SCHAUDER C D, TORGERSON S L, et al. The unified power flow controller: a new approach to

- power transmission control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 10(2): 1088-1097.
- [8] LIU Y, YANG S, WANG X, et al. Application of transformerless UPFC for interconnecting two synchronous AC grids with large phase difference[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6092-6103.
- [9] PADIYAR K R. FACTS controllers in power transmission and distribution[M]. New Delhi: New Age International Publishers, 2007.
- [10] ARUN K R K, SINGH S P. Congestion mitigation using UPFC[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(10): 2433-2442.
- [11] FUJITA H, AKAGI H, WATANABE Y, et al. Dynamic control and performance of a unified power flow controller for stabilizing an AC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 1013-1020.
- [12] 王宇. 统一潮流控制器(UPFC)的模型与仿真研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- WANG Yu. Study on modeling and simulation for UPFC[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008.
- [13] 姚蜀军, 宋晓燕, 汪燕, 等. 基于 PSASP 的统一潮流控制器潮流建模与仿真[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(5): 11-16.
- YAO Shujun, SONG Xiaoyan, WANG Yan, et al. Power flow modeling of unified power flow controller based on power system analysis software package (PSASP)[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 11-16.
- [14] 张勇. 统一潮流控制器及其对保护设备的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- ZHANG Yong. Unified power flow controller and its effects on relay protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [15] 吴振杰. STATCOM 对距离保护影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.
- WU Zhenjie. Research on distance relay in the presence of STATCOM[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.
- [16] 张媛. STATCOM 谐波分析及其对输电线路保护的影响[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(5): 27-31.
- ZHANG Yuan. Analysis of harmonics and effect with STATCOM in the transmission line protection[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(5): 27-31.
- [17] 郑振华. 静止同步串联补偿器及其对继电保护影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- ZHENG Zhenhua. The study on the static synchronous series compensator and its effect on relay protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [18] 石红芹. 基于等面积算法的谐波抑制技术在 UPFC 中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2004.
- SHI Hongqin. The restraining harmonics technology based on equal area algorithm and its application in UPFC[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2004.
- [19] 刘思宇. 含 UPFC 线路的谐波特性仿真分析[J]. 黑龙江电力, 2016, 38(3): 218-221.
- LIU Siyu. Harmonic simulation and analysis of transmission line with UPFC[J]. Heilongjiang Electric Power, 2016, 38(3): 218-221.
- [20] 任贤. 统一潮流控制器及其对继电保护的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- REN Xian. Unified power flow controller and its effects on protection relay[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [21] PHADKE A G, HLIBKA T, IBRAHIM M, et al. Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1977, 96(2): 635-646.
- [22] 李少飞. STATCOM 对距离保护动作特性影响及改进测量阻抗算法的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- LI Shaofei. Research on improved apparent impedance algorithm considering influence of STATCOM on distance protection[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [23] 刘青. 消除 STATCOM 对线路距离保护影响方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 93-98.
- LIU Qing. Research of a new method of eliminating the effect of STATCOM on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 93-98.
- [24] 杨德鑫. STATCOM 接入电网相关保护问题的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- YANG Dexin. Study on protection problem after STATCOM access to power system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [25] 葛耀中. 自适应继电保护及其前景展望[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 42-46.

- GE Yaozhong. Analysis of adaptive relay protection and its prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 42-46.
- [26] 刘青. 静止同步串联补偿器对距离保护影响分析的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 39-43.
LIU Qing. Study on the influence of SSSC on the distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 39-43.
- [27] 常彦彦. SSSC 串补线路的故障位置识别及保护新原理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
CHANG Yanyan. Fault position identification and new principle of protection for series compensated transmission lines with SSSC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [28] 徐岩. SSSC 对阻抗继电器动作特性的影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12): 24-33.
XU Yan. Influence of SSSC on the operation characteristics of the impedance relay[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(12): 24-33.
- [29] 刘青. 基于改进小波包熵的 SSSC 串补线路故障位置识别[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 65-70.
LIU Qing. Fault position identification for series compensated transmission lines with SSSC based on improved wavelet packet entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 65-70.
- [30] 刘青. SSSC 串补线路两端暂态保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 82-87.
LIU Qing. Research on two-end transient protection principle for series compensated transmission lines with SSSC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 82-87.
- [31] 陈超英, 陈涌, 陈礼义, 等. 统一潮流控制器对继电保护运行影响的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(7): 14-17.
CHEN Chaoying, CHEN Yong, CHEN Liyi, et al. Digital simulation of unified power flow controller regarding its effect on protective relaying operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(7): 14-17.
- [32] 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, 1(6): 43-46.
LIU Ende. Affecting of a unified power flow controller on the performances of distance relaying[J]. International Electric Power for China, 2002, 1(6): 43-46.
- [33] 吴丹. 基于 MMC 的 UPFC 接地方式及本体保护策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
WU Dan. Research on the grounding design and protective scheme of UPFC based on MMC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [34] ZHOU X, WANG H, AGGARWAL R K, et al. Performance evaluation of a distance relay as applied to a transmission system with UPFC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1137-1147.
- [35] 史志平. 含 UPFC 线路的自适应距离保护研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
SHI Zhiping. Study on auto-adaptive distance protection for transmission line with UPFC[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [36] 汪如喜, 王虎, 史志平, 等. 含 UPFC 线路的自适应距离保护研究[J]. 电气传动自动化, 2011, 33(6): 23-28.
WANG Ruxi, WANG Hu, SHI Zhiping, et al. Study on adaptive distance protection for transmission line with UPFC[J]. Electric Drive Automation, 2011, 33(6): 23-28.
- [37] 黄进. 含 UPFC 的同杆双回路单相距离保护研究[J]. 电源技术应用, 2013(11): 418-420.
HUANG Jin. Study on single-phase distance protection of double-circuit line with UPFC[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2013(11): 418-420.
- [38] 晏宇. 含 UPFC 的同杆双回路距离保护的研究[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 and Technology, 2013.
- [39] 刘青. 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, 3(12): 76-78.
LIU Qing. Analysis of distance protection in unified power flow controller[J]. Electric Power Science and Engineering, 2005, 3(12): 76-78.
- [40] 刘青. FACTS 元件对距离保护产生的影响分析[J]. 中国电力, 2004, 37(10): 18-21.
LIU Qing. Affection and solving methods of protection by FACTS component[J]. Electric Power, 2004, 37(10): 18-21.
- [41] 宋洁莹. MMC-UPFC 本体保护系统研究[J]. 智能电网, 2015, 3(10): 947-955.
SONG Jieying. Research on the control and protection system of MMC-UPFC[J]. Smart Grid, 2015, 3(10): 947-955.
- [42] 林金娇. 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. The UPFC protection system configuration and action strategy in Nanjing Western Power Grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 56-60.

[43] 孔祥平. 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. Study of distance protection scheme for transmission line including UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5219-5226.

[44] 瞿峰. 500 kV 苏南 UPFC 接入对距离保护的影响及应对策略[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 27-32.

QU Feng. Research on the effect of 500 kV UPFC in southern Suzhou on distance protection and the countermeasures[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 27-32.

[45] SEETHALEKSHMI K, SINGH S N, SRIVASTAVA S C, et al. Synchrophasor assisted adaptive reach setting of distance relays in presence of UPFC[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 5(3): 396-405.

[46] DASH P K, PRADHAN A K, PANDA G, et al. Distance protection in the presence of unified power flow controller[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 54(3): 189-198.

[47] DASH P K, PRADHAN A K, PANDA G, et al. Adaptive relay setting for flexible AC transmission systems (FACTS)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(1): 38-43.

[48] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[49] 孔祥平. 统一潮流控制器对线路纵联保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 14-21.

KONG Xiangping. Impact analysis of unified power flow controller on transmission line pilot protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 14-21.

[50] CAO H. Impact analysis of UPFC on directional protection based on the power-frequency variation[C] // International Electrical and Energy Conference, October 25-27, 2017, Beijing, China: 308-314.

[51] 习伟. 基于无死区零序功率方向的纵联零序保护[J]. 四川电力技术, 2011, 34(6): 17-20.

XI Wei. Longitudinal zero sequence protection based on zero-sequence power direction without dead zone[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2011, 34(6): 17-20.

[52] 赵安国. 用于串联补偿线路的纵联距离保护改进方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 84-88.

ZHAO Anguo. Improvement of longitudinal distance protection for series compensated line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 84-88.

[53] 沈国荣. 工频变化量方向继电器原理的研究[J]. 电力系统自动化, 1983, 7(1): 28-38.

SHEN Guorong. A new directional relay based on the variation of power frequency components[J]. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 28-38.

收稿日期: 2018-09-26; 修回日期: 2018-11-19

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: zhengtao_sf@126.com

汤哲(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 823338011@qq.com

张滋行(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制. E-mail: 18722209639@163.com

(编辑 张爱琴)