

# 南京西环网 UPFC 保护系统及配合策略

林金娇, 李 鹏, 孔祥平, 高 磊, 袁宇波, 黄浩声, 王 业  
(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘 要:**概述了南京西环网统一潮流控制器(UPFC)继电保护配置情况及动作策略,在分析 UPFC 接入后对交流保护影响的基础上,优化了南京西环网 UPFC 线路保护配置。分析了 UPFC 保护与交流保护配合策略,并阐述了南京西环网 UPFC 保护与各类交流保护动作配合原则。作为国内首套 UPFC 工程,南京西环网 UPFC 的保护系统配置与动作策略为后续柔性输电系统保护的研究和应用提供了指导与借鉴。

**关键词:**UPFC;继电保护;交直流相互作用;动作策略

**中图分类号:**TM771

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2015)06-0056-05

随着电网负荷的不断增长,作为南京城网的主要负荷中心的南京西环网发电和负荷分布不均衡的问题日益凸显,主要表现为南北通道潮流分配不均,晓庄下送断面潮流过重、东善桥断面输电能力未被充分利用。然而由于区域相关输电通道资源的稀缺等因素,电网建设难度较大。针对这一问题,江苏省电力公司经过前期的研究,提出在铁北—晓庄 220 kV 双回线路建设南京西环网统一潮流控制器(UPFC)示范工程,设备安装地点为铁北变电站。建成后,示范工程将提高电网潮流控制能力,解决晓庄下送断面输电容量瓶颈,充分发挥现有电网的输电能力,对提高电网安全稳定性有着重要的意义。

南京西环网 UPFC 示范工程是我国第一个、世界上第四个 UPFC 工程,目前对 UPFC 工程介绍的文献比较少,特别是对 UPFC 保护系统的介绍。然而,作为 UPFC 工程“大脑”的控制保护系统对于维护 UPFC 系统免受故障损害等方面具有重要意义。并且 UPFC 通过对接入点电压、参数(如线路阻抗)、功率等电气量的连续调节,实现对电网潮流的控制,同时诸如电网的阻抗、电压、相角等电气量也是当前电网继电保护装置的判断依据,UPFC 的接入可能对交流系统继电保护产生影响<sup>[1]</sup>。另一方面,UPFC 接入交流电网后,作为其中一个设备组,需要与相邻设备间进行动作策略配合。因此对实际工程 UPFC 保护配置、动作策略以及与系统的相互影响的研讨对于 UPFC 工程应用技术的提升具有指导作用。

## 1 UPFC 基本结构及作用

本工程在铁北—晓庄 220 kV 双回线路上安装一套 UPFC,设备安装地点为铁北变电站。UPFC 方案原理如图 1 所示。3 个换流器分别通过隔离刀闸连接至串联变压器,再通过 2 个串联变压器接入铁北—晓庄

220 kV 双回线路;同时,3 个换流器可分别通过开关场接线连接至启动电阻做并联侧运行;并联换流器通过 2 台变压器接入燕子矶站内 35 kV 两段母线;3 个换流器采用背靠背的连接方式,连接至公共直流母线上。

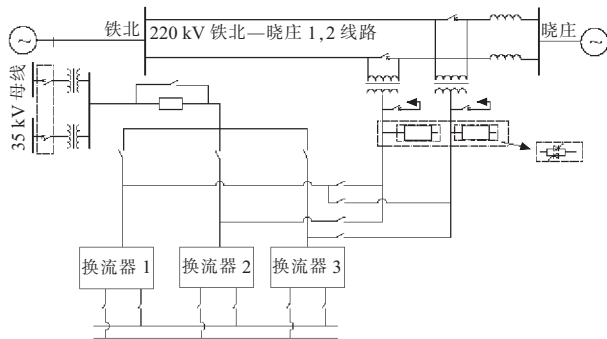


图 1 UPFC 主回路拓扑方案示意图

为了分析方便,对 220 kV 铁北—晓庄双回线路及 UPFC 等值化简,将 UPFC 的并联换流器等效为可控电流源、串联换流器等效为可控电压源,且忽略线路原有阻抗和导纳后,可得如图 2 所示的 UPFC 等值电路。

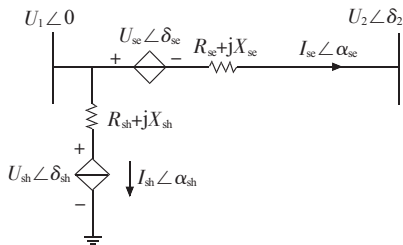


图 2 UPFC 等值电路模型

图 2 中,以铁北—晓庄双回线路铁北站侧电压为相位参考点,并联侧换流器的注入电流为  $I_{sh} \angle \alpha_{sh}$ ,相应输出电压为  $U_{sh} \angle \delta_{sh}$ 。串联侧换流器的输出电压为  $U_{sc} \angle \delta_{sc}$ ,流过串联侧电流为  $I_{sc} \angle \alpha_{sc}$ , $X_{sh}$  和  $X_{sc}$  分别为并联变压器和串联变压器的漏抗。 $R_{sh}$  为包括并联侧换流器和变压器损耗的等效电阻, $R_{sc}$  为包括串联换流器和变压器损耗的等效电阻。UPFC 等效电路的电压、电流向量图如图 3 所示。

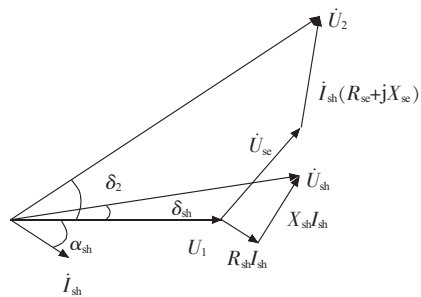


图3 UPFC 等值电路向量图

UPFC 串联换流器通过调节其输入电压的幅值和相角  $U_{sc} \angle \delta_{sc}$ , 等效改变铁北—晓庄双回线路电气距离, 实现有功和无功的调节, 进而对南京西环网潮流进行合理化分布; 并联侧通过  $I_{sh} \angle \alpha_{sh}$  调整注入的有功和无功, 从而实现稳定 UPFC 直流电容电压和调节交流接入点电压。

## 2 UPFC 保护配置以及动作策略

### 2.1 保护配置

UPFC 保护系统的保护范围为并联变压器和串联变压器阀侧之间的区域, 其目的是防止危害 UPFC 系统和设备的过电压、过应力, 以及接地、断线、开关失灵等故障。南京西环网 UPFC 示范工程保护系统采用三重化配置, 配置三套相互独立的保护设备, 出口采用三取二逻辑判别, 保障设备动作的可靠性。该“三取二”逻辑同时实现于独立的“三取二主机”和“控制主机”中。UPFC 保护系统按照串、并联换流器分区进行保护, 换流器区按照交流保护区、换流阀保护区和直流保护区分区进行保护配置。由于串、并联换流器侧的交流系统结构不同, 串、并联侧配置不同的保护功能。南京西环网 UPFC 示范工程串、并联侧换流器的主要保护配置如图 4、图 5 所示。

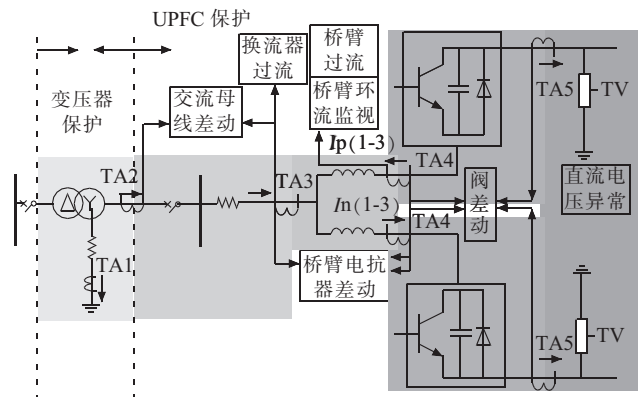


图4 并联侧保护分区及配置

UPFC 系统可能发生故障的位置和类型有多种, 根据设备相对位置, 大致可分为外部交流系统故障、UPFC 站内故障, 站内故障包括联接变压器故障、站交流母线故障、换流阀故障、直流侧故障等。不同区域设

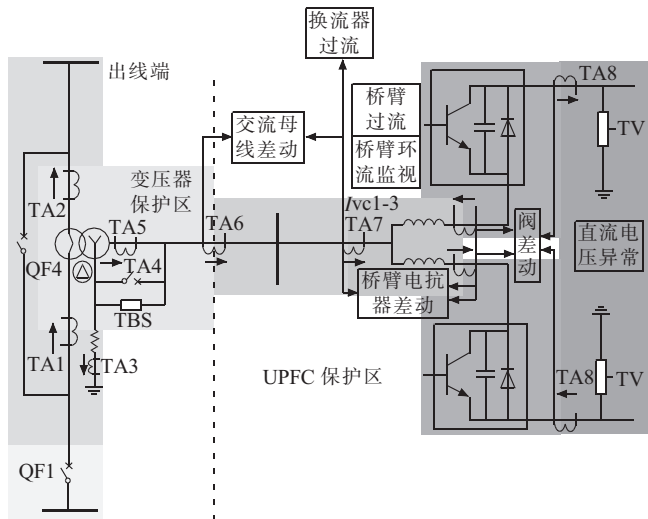


图5 串联侧保护分区及配置

备的故障, 根据自身电气量的变化特征构成了上图 UPFC 保护判据, 其原理与传统保护无异。

### 2.2 UPFC 自身保护动作策略

针对外部交流系统故障, UPFC 系统在确保任何设备不受损害条件下, 由交流快速保护切除, UPFC 系统应保持稳定运行。当出现影响 UPFC 运行的交流故障时, UPFC 设备采取故障时短时退出, 故障切除后恢复运行措施。当检测到可能危及 UPFC 设备运行安全的电网故障时, UPFC 保护动作, 闭锁换流阀、跳交流侧进线开关、触发 TBS、合串联侧旁路开关, 为简述方便, 将这一系列动作称为 UPFC 停运动作。

与传统交流输电技术不同, UPFC 对控制系统具有显著的依赖性。控制通过给定参考值、偏差调节等手段, 控制着功率转换、调节的全部过程。保护系统的动作策略充分考虑了与控制系统的配合, 对于涉及控制系统调节量, 诸如交流线路过电压、阀侧过电压、过电流等保护, 首先进行控制系统切换, 防止由控制系统故障造成的误动。

## 3 UPFC 接入对交流系统的影响

UPFC 的接入点包括并联侧交流母线和串联变压器一次绕组。UPFC 通过串联变压器给线路注入幅值和相角均可控的电压矢量, 改变了输电线路阻抗均匀分布的基本特征。因此 UPFC 接入可能劣化交流保护性能, 需进行分析。考虑到南京西环网网架结构紧密, UPFC 接入对电流差动保护等影响较小, 可通过定值小幅度调整配合接入。对于纵联保护的影响, 主要与方向判别原理相关, 对于方向纵联保护和差动纵联保护基本无影响, 对距离纵联保护和采用突变量方向判别的纵联保护方向判别的影响与对距离保护和突变量方向一致。因此本文主要对 UPFC 对距离保护和突变量保护的影响进行研究。

### 3.1 对距离保护的影响

UPFC 保护在检测到输电线路故障时,可在 2 ms 内迅速导通 TBS 以旁路串联变压器二次侧绕组,此时等效于将变压器的等效漏抗串联在线路中运行;待 40 ms 后串联侧高 / 低压侧旁路开关合闸,串联变压器一、二次侧绕组均被旁路,对线路阻抗无影响。在故障发生后、TBS 触发导通前,UPFC 仍在运行,可能对保护的测量电压、电流造成影响,但是此过程仅持续 2 ms,对于基于傅里叶算法的距离保护的测量阻抗的影响很小,可以忽略。

#### 3.1.1 对距离保护 I 段的影响

在 TBS 触发导通后,等效于将 UPFC 串联变压器的等效漏抗串联在线路中运行,如图 6 所示。且分别分析 UPFC 对线路两侧距离保护 I 段的性能造成影响。

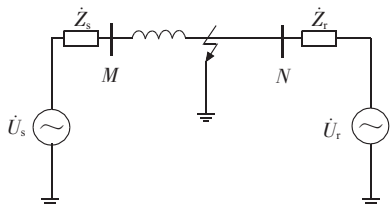


图 6 TBS 导通后 UPFC 线路故障示意图

UPFC 线路母线 M 侧距离保护 I 段的性能与电压互感器(TV)安装位置有关。若采用线路侧 TV,则 TV 安装位置正向的线路均匀分布,因此正方向故障时,测量阻抗特性不受 UPFC 影响,从而能够有效保证距离保护 I 段的保护范围和动作的正确性。在发生反向故障时,距离保护 I 段也将可靠不动作。若采用母线侧 TV,发生反向故障时,距离保护 I 段能正确识别区外故障,可靠不动作。发生正向故障时,由于串联变压器等效漏抗的影响,距离保护 I 段的保护范围将会缩小。

对于母线 N 侧的距离保护 I 段而言,TV 安装位置不会对其性能造成影响。当发生反向区外或 UPFC 线路区内故障时,母线 N 侧的距离保护 I 段的测量阻抗不受 UPFC 影响,距离保护 I 段的动作行为不受影响;当发生正向区外故障时,距离保护 I 段也将可靠不动作。

因此 UPFC 接入可能导致采用母线侧 TV 时本线 UPFC 侧距离保护 I 段保护范围缩小,而铁北—晓庄双回路为短线路,UPFC 的接入将对其距离保护 I 段产生较大影响,因此将距离保护 I 段退出运行。利用该线路距离保护 II 段、III 段与 UPFC 保护配合,保护系统安全。

#### 3.1.2 对距离保护 II 段和 III 段的影响

故障发生 40 ms 后串联变压器高 / 低压侧旁路开关合闸,因此正常情况下 UPFC 不会对距离保护 II 段、III 段的动作行为造成影响。

而当 TBS 正确导通、仅串联变压器高压侧旁路开关无法合闸时,串变失灵保护不动作,串联变压器一次

绕组将始终串接在线路中,可能对距离保护的 II 段、III 段造成影响。以图 7 所示线路故障示意图为例,UPFC 安装于 L3 线路 M 侧,分析 TBS 正确导通、旁路开关无法合闸时 UPFC 对距离保护 II 段、III 段的影响。

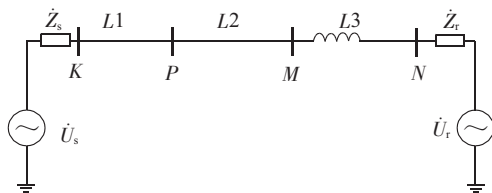


图 7 TBS 导通后 UPFC 线路故障示意图

南京西环网 UPFC 线路采用母线侧 TV。发生反向故障时,距离保护 II 段、III 段能正确识别区外故障,可靠不动作。发生正向故障时,由于串联变压器的等效漏抗的影响,距离保护 II 段、III 段的保护范围将会缩小,甚至可能发生拒动的情况,需要在距离 II 段、III 段定值中考虑串变漏抗的影响。对于 UPFC 线路的母线 N 侧的距离保护而言,当发生反向区外或 UPFC 线路区内故障时,母线 N 侧的距离保护 II 段、III 段的测量阻抗不受 UPFC 影响,距离保护 II 段、III 段的动作行为不受影响;当发生正向区外故障时,由于串联变压器的等效漏抗的影响,距离保护 II 段、III 段的保护范围将会缩小,甚至可能发生拒动的情况。

对线路 L2 的距离保护 II 段、III 段而言,UPFC 线路上发生故障时,线路 L2 的母线 M 侧的距离保护 II 段、III 段可靠不动作;但由于串联变压器的等效漏抗的影响,母线 P 侧的距离保护 II 段、III 段的保护范围将会缩小。对线路 L1 的距离保护 II 段、III 段而言,UPFC 线路上发生故障时,线路 L1 的母线 P 侧的距离保护 II 段、III 段不动作;经过合理的整定,母线 K 侧的距离保护 II 段也不动作;由于串联变压器的等效漏抗的影响,母线 K 侧的距离保护 III 段的保护范围将会缩小。

由此可见,UPFC 的接入可能导致本线及相邻线路的距离保护 II 段、III 段的保护范围缩小,需在整定时加以考虑。

### 3.2 对突变量方向元件的影响

#### 3.2.1 影响定性分析

以图 8 所示线路故障示意图分析 UPFC 接入对突变量方向元件的影响。

假设 UPFC 线路发生故障,则对于任意一条线路上的突变量方向元件而言,感受到的都是同一方向的故障和 TBS 导通引起的突变量,能正确识别正、反方向故障,从而保障基于突变量方向的纵联保护的動作行为的正确性。

假设线路 L1 上发生故障,UPFC 检测到故障后将触发 TBS、合串联侧旁路开关。因此对于安装在线路

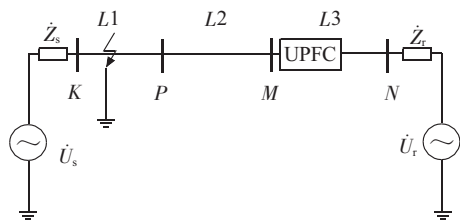


图8 TBS 导通后 UPFC 相邻线路故障示意图

$L1$  母线  $P$  侧的突变量方向元件而言,其几乎同时感受到正向区内故障和反向区外 TBS 导通引起的突变量,可能错误判断为反向故障,引起基于突变量方向的纵联保护拒动。对于安装在线路  $L2$  两侧的突变量方向元件而言,其几乎同时感受到正向区外故障和反向区外 TBS 导通引起的突变量,可能错误判断为正向故障,从而引起基于突变量方向的纵联保护误动。

### 3.2.2 南京西环网算例仿真及措施

利用 PSCAD/EMTDC 构建了南京西环网的仿真模型,为了简化 UPFC 串联换流器的故障暂态模型,并考虑极端情况,利用一幅值为 1.2 倍串联变压器一次侧额定电压、相位超前负荷电流  $90^\circ$  的电压源对 UPFC 注入线路的电压进行了等效替代。在下关—中央门线路的下关侧发生 A 相经  $50\ \Omega$  过渡电阻接地故障时,由于故障后 2 ms 时 UPFC 等效电压源被旁路退出,导致中央门侧突变量方向元件误判为反方向故障,从而使得基于突变量方向元件的纵联保护拒动。通过仿真算例验证了上述的理论分析结果,即基于突变量方向元件的纵联保护的動作行为会受到 UPFC 接入的影响。

UPFC 安装位置四级线路内,原配置南瑞 RCS-901A 保护装置,其采用工频变化量方向原理构成纵联保护。目前已确定将相关线路从联保护,更换为基于纵联距离保护的 RCS-902A 装置,从而保障了 UPFC 接入系统后的安全。

## 4 交流保护与 UPFC 保护的配合策略

UPFC 的串入会对原有交流保护产生影响,除两者独立保护逻辑的判别外,需要考虑 UPFC 保护与交流保护的配合。两者配合关系主要体现在 3 个方面。

(1) 当 UPFC 相邻元件动作时,包括并联变压器保护、串联变压器保护、铁北—晓庄 220 kV 线路、燕子矶 35 kV 母线保护动作时,由相关交流保护与 UPFC 保护交互,完成 UPFC 保护的停运。这一策略出于 2 个考虑:① 相邻元件故障对 UPFC 影响较大,为保障 UPFC 系统和设备安全运行。② 交流故障时,避免 UPFC 系统对交流系统运行性能的影响以及故障判别的劣化。

(2) UPFC 动作对交流保护的影响主要体现在

UPFC 停运的系列动作中,串联或并联变压器无法正确动作时,失灵启动相邻元件完成故障切除。

(3) 基于 UPFC 设备安全考虑的特殊要求,需要交流保护与 UPFC 保护采取相应策略配合。例如 UPFC 需要与所串如线路重合闸进行配合,在交流线路瞬时故障清除后完成换流器的重新启动等。

基于以上 3 点,根据动作保护类型的不同,说明交流保护与 UPFC 保护具体配合关系。

### 4.1 并联变压器保护

并联变压保护动作首先切换备用变压器。其跳开该变压器高压侧进线开关及低压侧开关,同时发信号给 UPFC 控制保护系统中交流站层控制(ACC),ACC 中通过逻辑判别实现备自投功能,投入备用变压器。

如果 2 台并联变压器保护均动作跳闸,由 ACC 根据变压器开关位置及其他量判断为 UPFC 并联侧故障,则向 UPFC 保护发送故障停运信号,执行 UPFC 停运动作。并联变压器保护 2 时限失灵跳燕子矶 220 kV 主变 35 kV 开关及分段开关,并闭锁 220 kV 主变低压侧备自投。

### 4.2 串联变压器保护

串联变压保护动作采取停运 UPFC 的動作策略。其動作合串联变压器高、低压侧旁路开关,并送動作信号给线路保护闭锁重合闸;同时送動作信号至 UPFC 保护,UPFC 保护動作,执行 UPFC 停运动作。当串联变压器保护動作,串变高压侧开关合闸失灵时,串联变压器保护跳铁北侧线路开关,并发串变保护跳闸信号给线路保护起动线路远跳跳晓庄侧线路开关并闭锁重合闸,同时启动母差失灵。当 UPFC 保护動作时,若串联变压器高、低压侧开关均合闸失灵,则判为合闸失灵,UPFC 保护给串联变压器保护合闸失灵的信号,该信号与串联变压器保护合闸失灵判据取或构成串变失灵保护逻辑。另外串变网侧绕组对地故障合旁路开关不能隔离故障,需要跳线路开关,其動作逻辑与串变保护失灵相同。

### 4.3 UPFC 线路保护

UPFC 线路保护動作跳线路开关,同时晓庄线路保护跳闸信号发送给铁北侧,铁北侧保护用晓庄和铁北的线路保护跳闸信息合成线路跳闸信息送至 UPFC 保护;UPFC 保护经综合电压判别后,触发 TBS,同时发旁路串联变压器旁路开关指令。

220 kV 以上线路保护装置一般配置有线路重合闸功能,在交流线路故障后,跳开线路断路器,经过设定时间后(一般为  $0.8 \sim 1\text{ s}$ ),断路器重合闸,若仍检测到故障,则闭锁重合闸,永久跳开线路断路器。因此串入线路的 UPFC 需要与线路重合闸进行配合,在交流线路瞬时故障清除后完成换流器的重新启动。

线路故障时,对于换流器为区外故障,但故障电流会经串联变压器耦合到换流器,换流器阀侧电流随线路电流增大,因此线路故障时 UPFC 也需迅速动作、退出运行。在线路故障时,只有 UPFC 保护中的换流器阀侧过流保护动作,利用此特点来区分区内和线路故障,并辅助复压闭锁判据。若判断为线路故障,则允许换流器重启。在经过 1.5 s 后,若判断线路重合闸成功,则重新启动换流器;若判断线路跳闸,则不再重新启动。

#### 4.4 母差保护

母差保护动作,跳线路本侧开关,并远跳对侧。UPFC 保护判断线路开关分位且无流,则 UPFC 保护动作,停运 UPFC。交流保护与 UPFC 保护的相互配合关系如图 9 所示,图中深色箭头表示保护动作信号,浅色箭头表示不同保护装置之间的信息交互。

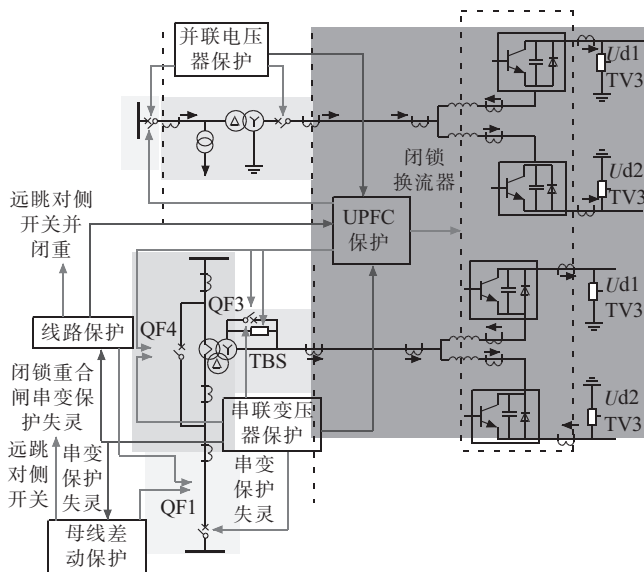


图 9 交流保护与 UPFC 保护的配合关系

## 5 结束语

针对南京西环网 UPFC 示范工程,本文介绍了 UPFC 保护配置方案、动作策略,并在分析 UPFC 接入

后对交流保护的影响的基础上,优化了线路保护配置方案,并详尽阐述南京西环网 UPFC 保护与各类交流保护动作配合策略。进一步保障了南京西环网 UPFC 接入系统的安全性,并为后续 UPFC 工程保护系统的设计提供指导和借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 刘青,魏清,王增平.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(1):76-78.
- [2] 张勇.统一潮流控制器及其对距离保护的影响[D].北京:华北电力大学,2005.
- [3] 刘建坤,李群,陈静.基于 UPFC 的供电能力提升技术及其在江苏电网中的应用[J].电气应用,2014(17):20-24,73.
- [4] 祁忠,笃竣,张海宁,等.新一代继电保护及故障信息管理主站的设计与实现[J].江苏电机工程,2014,33(4):8-12.
- [5] 陈宏君,王国栋,刘克金.直流控制保护系统中的 IED 自动建模设计[J].江苏电机工程,2015,34(4):14-16,20.
- [6] 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(6):23-28.
- [7] 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(7):14-17.

#### 作者简介:

- 林金娇(1988),女,山东栖霞人,工程师,从事高压直流输电控制保护技术工作;
- 李鹏(1982),男,陕西西安人,高级工程师,从事高压直流输电控制保护技术工作;
- 孔祥平(1988),男,江西上饶人,工程师,从事分布式电源接入的电力系统保护、高压直流输电控制保护技术工作;
- 高磊(1982),男,山东青岛人,高级工程师,从事继电保护及自动化技术工作;
- 袁宇波(1975),男,江苏丹阳人,研究员级高级工程师,从事电力系统分析、继电保护及自动化技术工作;
- 黄浩声(1979),男,浙江台州人,高级工程师,从事高压直流输电控制保护技术工作;
- 王业(1984),男,江苏南京人,工程师,从事高压直流输电控制保护技术工作。

## The UPFC Protection System Configuration and Action Strategy in Nanjing Western Power Grid

LIN Jinjiao, LI Peng, KONG Xiangping, GAO Lei, YUAN Yubo, HUANG Haosheng, WANG Ye  
(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Firstly, the protection configuration and operation strategies for the unified power flow controller (UPFC) in the Nanjing western power grid are introduced. After analyzing the effect of the UPFC on AC protection, the protection configuration for the lines with UPFC is optimized. Then, the cooperation strategy for the UPFC protection and AC protection is analyzed, and the coordination principle for the Nanjing western power grid UPFC protection and various kinds of AC protections are introduced. As the first UPFC engineering in China, the Nanjing Western Power Grid UPFC protection system configuration and action strategy provides a reference for the future study and application of Flexible HVDC transmission system protection.

**Key words:** unified power flow controller (UPFC); relay protection; interaction of AC and DC systems; action strategy