

## 统一潮流控制器与串补对线路保护影响的比较分析

谢 华, 潘 磊, 赵青春, 戴光武, 徐晓春

(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(UPFC)通过串联变压器在输电线路注入幅值和相角均可控的电压矢量,等效串联接入电容或电感,从而提高电网输送效率。与此相似,输电线路通过接入串补可提升线路的输送能力。目前串补在超高压输电线路有着广泛应用,串补对保护的影响有完备的处理措施,而UPFC这一全新电力电子设备接入系统后对周边系统及保护的影响尚无深入研究。本文通过比较分析UPFC与串补接入系统后电气特征、对保护的影响及相应的保护配置等方面的异同,明确UPFC在各种运行情况下的等效特性以及保护适应性解决策略,为UPFC接入后系统的稳定可靠运行奠定基础。

**关键词:**UPFC, 串补, 等效特性, 保护配置

**中图分类号:**TM77

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2017)04-0137-06

### 0 引言

随着电力系统输电走廊的日趋饱和,依靠建设新的输电线路增加输送容量将会越来越困难,大型互联网络提高电网输送功率、降低损耗等需求成为迫切需要解决的难点,采用新型柔性交流输电系统(FACTS)装置改善系统运行工况,提高电网输送容量是一个现实且理想的选择。第三代FACTS设备的典型代表统一潮流控制器(UPFC)是迄今为止功能最全面的FACTS装置,能分别实现并联补偿、串联补偿、移相和端电压调节等多种基本功能<sup>[1]</sup>。随着2015年南京220 kV西环网UPFC工程的成功投运<sup>[2]</sup>,国内正逐步开展UPFC技术的规模性以及更高电压等级系统中推广应用的各项研究,UPFC接入系统后带来的影响成为当前的研究热点之一<sup>[3-6]</sup>。

目前国内外针对UPFC研究多集中在对UPFC本体的控制策略、系统架构的研究<sup>[7]</sup>;譬如通过对UPFC充电策略的控制以及串联侧换流器零功率闭锁等措施,实现UPFC的平滑启停,降低对交流系统干扰<sup>[8]</sup>;针对南京西环网UPFC保护系统架构和配置进行研究,给出适合工程应用的最终方案架构<sup>[9]</sup>。但是,针对UPFC电气特性以及对系统带来的影响分析研究相对较少。

UPFC设备接入系统后,其通过串联变压器向线路注入幅值和相角均可控的电压矢量,UPFC设备的接入改变了输电线路阻抗均匀分布的基本特征,在UPFC接入点出现了电气量的跃变点,等效于在UPFC接入点串联特性可变的阻抗,从而对系统

中的继电保护设备带来影响<sup>[10]</sup>。与目前系统中广泛应用的串联电容补偿设备相比,UPFC在某些运行情况下特性与串补相似,且对于继电保护设备而言,一般更为关注UPFC等效呈现容抗特性时对系统的影响。现场运维和管理人员对UPFC接入系统后的外在特性以及对线路保护的影响尚未建立直观的认识。本文以此为出发点,描述UPFC与串补接入系统后的特性及对保护影响的异同,给相关人员提供参考。

### 1 UPFC与串补基本系统结构

#### 1.1 串补系统结构

串补设备通过串联在高压输电线路,可以补偿线路电抗,缩短交流传输的电气距离,提高线路送电能力,同时降低线路输送损耗。串补在区域联络线等重要线路上得到了广泛应用,如特高压示范工程扩建工程、锡盟—北京东特高压双回输电线路、天生桥—平果超高压线路等,均安装了串补。一般而言,串联电容器容抗是应用于补偿输电线路电抗的40%~60%左右。串补系统的整体结构如图1所示。

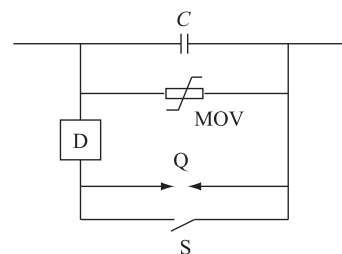


图1 固定串联电容补偿设备结构

Fig.1 Structure of fixed series capacitor compensation equipment

串联电容补偿装置主要由电容器组及其附加的保护、控制等设备组成。电容器组  $C$  是串补装置的主要设备,通常由多个电容器元件按照一定的规律串并联连接而成。MOV 是一个金属氧化锌非线性电阻器,构成电容器的过电压保护,有稳定的限压及能量特性。Q 模块是为 MOV 提供保护的强制触发放电间隙(GAP),其主要功能是在一定的条件下(如当 MOV 两端压降或其吸收的能量超过预定值)迅速击穿以旁路电容器组和 MOV,防止 MOV 过热损坏,也保护电容器组免受过电压的损害。旁路断路器 S 用于手动投退串联电容器组,方便电容及其保护设备的维护检修。其另一个作用是在旁路间隙击穿以后,由旁路断路器短路间隙使其灭弧。阻尼电路 D 用于抑制在串补保护动作过程中所产生的高频高能放电电流,其结构为由电感和电阻构成的阻尼装置。当旁路开关闭合或电容重投时,会产生大量高频暂态电流,阻尼回路可在较短时间内消除这些高频分量。

在正常运行情况下,串补装置呈现固定的容抗值,等效减小了整条线路的电抗,从而起到改变潮流分布的作用,提升本线路的输送功率。串补电容没有复杂的控制环节,其运行特性相对较为简单。

## 1.2 UPFC 系统结构

实现单回线路控制的 UPFC 系统整体架构如图 2 所示,它由 2 个背靠背的电压源换流器构成,2 个背靠背的换流器共用直流母线,二者都通过联接变压器接入系统,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。

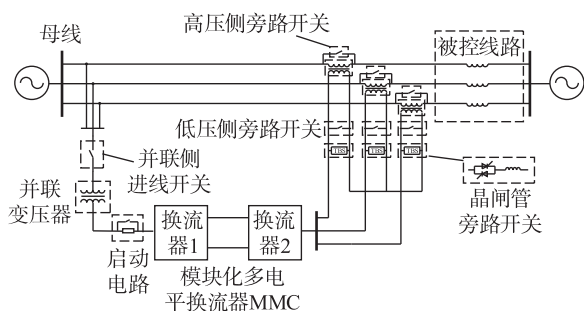


图 2 UPFC 系统结构

Fig.2 Structure diagram of UPFC system

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;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。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。

UPFC 配置了完备的保护措施应对交流系统故障<sup>[11,12]</sup>,当交流系统发生故障,阀侧感受到的电流大于 UPFC 保护动作定值时,将触发高压侧旁路开关、低压侧旁路开关闭合,触发晶闸管旁路开关导通闭合,晶闸管旁路开关闭合时间一般小于 2 ms。

串联换流器串联注入电压总是直接或间接影响输电线路潮流,其串联注入电压的幅值和相位由 UPFC 在潮流控制时所选择的控制方式来确定,其控制方式主要包括<sup>[13]</sup>以下几种。

(1) 线路端电压控制:控制串联变压器注入与线路端电压相位相同、幅值可调的交流电压,改变线路端电压的幅值,可以调节线路端电压运行在正常的范围内,与调节变压器分接头的作用相同,但其为平滑调节,变压器分接头为有级调节。

(2) 线路电抗控制:控制串联变压器注入的电压向量与线路电流垂直,等效于在线路中串联恒定电抗,可以是容抗或感抗,可连续调节,在合适控制下不会发生 LC 振荡,对补偿线路感抗、增强系统传输功率极限、提高电力系统稳定性等非常有效。

(3) 相角控制:理想的移相控制器,在不必要调控输电线路两端母线电压的情况下,可连续调控输电线路传输有功功率的大小,使电力系统潮流方向以及大小经济合理。

(4) 自动潮流控制:串联变压器注入的电压幅值和相位都是可控的,能使线路产生期望的有功和无功功率。含有 UPFC 的线路对电力系统的其他部分而言,可视为一种高阻抗电源,能输出或吸收有功和无功功率。这种运行模式是其他 FACTS 装置无法实现的。

## 2 UPFC 与串补运行特性差异比较

为了有效评估 UPFC 和串补设备接入系统后对系统电气特性的影响,进而研究相关线路保护受到的影响,须重点分析在各种运行情况下此类串联接入设备等效外在特性。

### 2.1 串补系统各种运行方式下等效特性

对于含串补的输电线路,在正常输送潮流时,MOV 中基本不会流过电流,串补设备整体呈现容抗特性,且该容抗值相对固定。当系统发生故障,串补设备流过的电流增大时,随着串补两端电压降的变化,MOV 呈现出非线性阻抗的特征,两端电压降越大,MOV 等效阻抗越小,计及 MOV 特性的整体等效阻抗可以等效为电阻与电容串联的形式,该电阻

和电容随着串补两端电压变化而发生改变。串补电流定值达到 GAP 击穿定值的情况下, GAP 导通从而将电容两端旁路, 此时串补的整体等效阻抗基本为 0。在系统各种运行方式下串补整体主要呈现如下 3 种状态。

(1) 线性方式: 当电容器两端电压小于 MOV 的导通电压时, 串补装置可以认为是一线性电容器;

(2) MOV 导通方式: MOV 处于导通状态, 串补装置的容抗减小, 其特性为与电流相关的非线性阻抗;

(3) 旁路方式: 满足一定的条件触发间隙将串补电容器组旁路, 或者旁路断路器动作闭合, 串补装置被旁路。

(4) 串补在各种运行方式下其整体等效容抗值小于等于电容器组整体容抗, 且根据当前电流值能够基本推知串补整体的等效特性。

## 2.2 UPFC 各种运行方式下等效特性

在电力系统应用中, UPFC 的主要目的是进行有功功率的调整控制, 通过串联变压器输入附加串联电动势改变线路电压的大小和相位, 相当于在线路中间串联接入可变的电感或者电容, 通过改变线路参数实现对潮流的控制。串联接入设备改变了线路阻抗随长度均匀变化的特征, 对于线路保护影响较大。一般情况下, 如果串联接入设备呈现电感特性, 将对后备距离保护等动作灵敏度带来影响; 而串联接入设备呈现电容特性, 则会造成主保护动作灵敏度下降、后备保护拒动或误动等一系列问题。因此, 一般更为关注 UPFC 在等效呈现电容特性时的特征。

UPFC 可以等效为可变电压源串联接入线路, 等效阻抗值取决于其注入电压源的大小以及当前线路的电流值, 下面推导正常运行情况下 UPFC 提升输送功率时等效容抗与线路阻抗的相对关系。

以两端无穷大系统为例, 忽略串联变压器的漏抗以及串联的换流器损耗和变压器损耗的等效电阻, 系统等效示意如图 3 所示<sup>[14,15]</sup>。图中,  $\dot{U}_s$ ,  $\dot{U}_r$  分别为线路首端电压和线路末端电压;  $\dot{U}_{se}$  为 UPFC 注入的旋转同步电压;  $X_1$  为线路等效电抗。忽略电阻作用, 可以推知线路首端的有功功率计算公式如下:

$$P_s = \frac{U_s U_r}{X_1} \sin \delta + \frac{U_s U_{se}}{X_1} \sin(\theta - \delta) \quad (1)$$

根据有功功率表达式, 注入的电压超前首端电压, 可以提升线路的输送功率, 当超前  $90^\circ$  时, 提升有功功率的效率最高, 采用串联补偿的方式下, 串

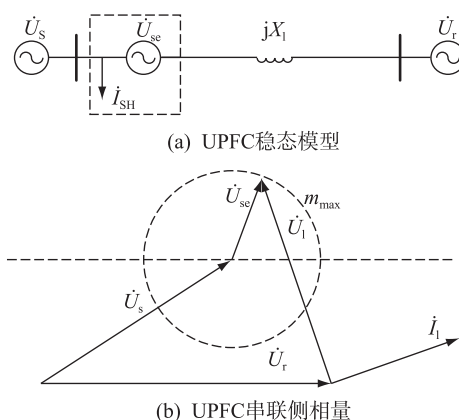


图 3 功率提升示意图

Fig.3 Phasor diagram of power lifting

联变压器不向系统中注入有功功率。

假定按照线路电抗控制模式调节功率, 即控制串联变压器注入的电压向量与线路电流垂直, UPFC 等效阻抗可按如下方式进行计算。

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{jX_1} = \frac{\dot{U}_{se} + \dot{U}_s - \dot{U}_r}{jX_1} \quad (2)$$

$$Z = -\frac{\dot{U}_{se}}{\dot{I}_1} = -\dot{U}_{se} \frac{jX_1}{\dot{U}_{se} + \dot{U}_s - \dot{U}_r} = -\frac{1}{1 + \Delta\dot{U}/\dot{U}_{se}} jX_1 \quad (3)$$

在实际系统中, 若考虑两端系统阻抗, 则 UPFC 等效阻抗表示为:

$$Z = -\frac{1}{1 + \Delta E/\dot{U}_{se}} j(X_1 + X_s + X_r) \quad (4)$$

基于式(4)可知, 系统提升功率时, UPFC 串联接入系统中的电抗等效呈现电容特性, 其等效容抗值有如下规律:

(1) 在固定系统运行方式下, UPFC 串联接入系统的电势越高, UPFC 等效容抗值越大, 相应提升的线路功率也越高;

(2) 考虑线路两侧系统等效阻抗情况下, 提升功率运行时, UPFC 等效容抗会出现大于线路阻抗的情况。

在降低输送功率时, UPFC 整体呈现电感特性, 此处不加赘述。

系统故障情况下, 若流过 UPFC 阀侧的电流大于保护动作定值, 则晶闸管旁路开关(TBS)将在 2 ms 左右闭合, TBS 闭合后等效于将串联变压器漏抗串联接入系统中, 对于保护影响相对较小。当网侧旁路开关闭合后, UPFC 彻底与系统隔离, 其等效阻抗接近于 0。

若在远离 UPFC 安装线路发生故障或者发生高阻等接地故障, 此时 UPFC 阀侧感受到的电流相对



较小,将仍按照设定的控制目标进行调节,此时 UPFC 等效阻抗与故障时刻的电流密切相关。

基于此,UPFC 在各种运行情况下,将呈现如下几种特征:

(1) UPFC 正常提升线路输送功率,呈现容抗特性;

(2) UPFC 正常限制线路输送功率,呈现感抗特性;

(3) UPFC 流过较大电流,阀侧晶闸管旁路开关动作,一般在 2 ms 以内,此时等效于将串联变压器漏抗串联接入系统中;

(4) UPFC 网侧旁路开关动作,一般在 100 ms 以内,网侧旁路开关动作后将 UPFC 彻底与系统隔离。

### 2.3 UPFC 与串补等效特性差异

结合上文的分析,UPFC 与串补在各种运行方式下等效特性上主要有如下差异:

(1) 对于常规串补,串联电容补偿度一般为 40%~60%左右,即小于线路阻抗,因此在非串补线路故障时,除串补安装线路之外的所有线路将不受串补影响;而 UPFC 等效容抗可能大于线路阻抗,从而造成接入后对周边系统影响范围难以明确;

(2) 串补电容在故障期间的容抗值相对固定,而 UPFC 的电力电子器件在暂态期间调节的快速性难以用解析表达式进行展现,造成 UPFC 等效阻抗时变特征明显。因此,暂态期间 UPFC 等效呈现的特性需要结合实际系统的仿真分析才能有较为明确的结论。

## 3 UPFC 与串补对保护影响差异及功能配置

### 3.1 UPFC 与串补影响范围分析方法比较

串联设备接入线路以后,将会对本线及相邻一级或者几级输电线路保护装置存在影响,是相关继电保护专业人员重点关注的问题,这涉及到对周边输电线路保护的改造、定值调整等工作,将直接影响整个区域电网的稳定可靠运行<sup>[16]</sup>。

设计单位在工程前期阶段对于串补本线及相邻一级或者几级线路进行计算,明确影响范围。根据目前实际工程中的经验,串补本线及相邻一级线路的保护设备必需配置带串补功能的保护,对于相邻两级及以上线路,先评估超越动作的可能性再确定是否需要配置带串补功能的线路保护。

以图 5 为例,若  $L2$  线路为短线路,且  $S3$  系统电源相对较弱,此情况下,当  $L3$  线路串补出口附近故

障时,串补等效容抗值大于  $L2$  线路阻抗,此时需向外延伸一级线路,即  $L1$  线路需要配置带串补功能的保护。

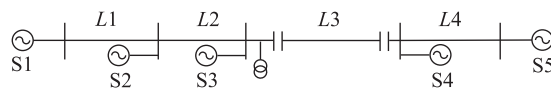


图 4 串补系统影响范围

Fig.4 Diagram of influence range of series compensation system

而在 UPFC 系统中,由于 UPFC 的等效容抗随着控制目标以及当前电流变化,难以采用解析表达式描述 UPFC 等值阻抗。另外,UPFC 提升功率情况下等效容抗可能大于本线阻抗,从而造成影响范围扩大,因此,对于 UPFC 接入系统后对周边线路的影响,建议结合 UPFC 本体的保护措施及相关定值进行评估。

UPFC 设定阀侧过流保护定值用于保证在交流一次系统故障情况下可靠旁路避免损坏换流器,该过流定值相对比较灵敏,一般为 1.5 倍 UPFC 额定电流值,远小于本线故障时的故障电流。因此,初步分析 UPFC 接入后的影响范围可考虑采取如下方式进行:根据实际系统网架结构构建仿真模型,模拟各种运行方式下 UPFC 安装线路附近几级输电线路故障情况下 UPFC 线路感受到的故障电流值,分析其能否达到 UPFC 设定的阀侧过流保护定值。一般情况下,对于相对密集的城市 220 kV 电网,附近 4 级左右线路发生金属性故障时 UPFC 保护均能够可靠动作。在实际运行中,由于 UPFC 可靠的故障重启策略,附近线路故障时 UPFC 临时退出并不影响其对系统的潮流控制效果。

UPFC 本体快速保护一定程度上减小了交流故障时 UPFC 对于周边系统的影响,同时结合实际仿真分析,研究附近线路故障时 UPFC 未旁路且呈现容抗特性的可能性,可进一步明确周边的输电线路是否需要考虑 UPFC 接入的影响。

### 3.2 UPFC 与串补同交流系统保护配合关系比较

相比 UPFC 设备,串补本体的设备较少,与线路保护之间的配合关系较为简单:

(1) 线路保护跳闸接点输出至串补本体控制设备,用于联动串补旁路;

(2) 串补保护判别合闸失灵信号输出至断路器保护,跳开相应断路器,同时启动失灵;

(3) 串补与线路重合闸之间主要通过设定固定时间进行配合,在采取重合闸前投入串补的方式时会出现带串补合闸于故障的情况。

对于 UPFC 设备,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。由于 UPFC 自身具备完整的控制保护逻辑,同时采集了相应的测量电压互感器、电流互感器、断路器位置等关键信息,UPFC 设备与线路保护、串联变压器保护通过信息交互形成更为紧密的配合关系,从而尽可能保障 UPFC 系统安全运行<sup>[17]</sup>。UPFC 与线路保护的具体配合关系主要如下:

(1) 输电线路两侧任一线路保护动作输出相应信号给 UPFC 保护设备,用于联动旁路开关;

(2) UPFC 配置的串联变压器保护动作信号传输给线路保护,用于闭锁线路保护重合闸;

(3) 线路保护需要判别 UPFC 旁路断路器处于合闸位置时,才允许重合闸;

(4) UPFC 控制设备监视系统电压和电流已经恢复,才开始解锁启动重投策略。

通过上述配合,可以有效避免线路故障对 UPFC 本体带来的影响,提高 UPFC 设备的使用寿命,增强整体系统动作可靠性。

### 3.3 UPFC 与串补接入后保护适应性解决方案

串补接入系统后线路保护适应性解决方案有相对成熟的经验,但是 UPFC 接入后线路保护改进措施目前尚未完全定型。相比串补保护,UPFC 接入系统后线路保护的适应性解决措施可以从如下几方面加以考虑:

(1) 串补系统继电保护整体解决方案中一般引入了“正向保护级电压”参数,即引入 MOV 作用下串补两端可能出现的最大电压值,而在 UPFC 系统中,受限于 UPFC 的控制调节能力,其通过串联变压器注入系统中的电势存在最大值,基本可考虑为串联变压器的网侧额定电压值。可以考虑将该电压值引入保护装置中,系统故障时假设 UPFC 两端能够达到该额定电压,保守考虑对距离保护等范围进行调整。

(2) 考虑到 UPFC 本体保护的快速隔离效果,长时段的后备保护可以不考虑由于 UPFC 呈现容抗特性带来的影响。

(3) 结合 UPFC 本体的控制保护,模拟系统故障情况下 UPFC 整体等效特性,才能准确评估其对系统带来的影响。

## 4 结语

本文对串补以及 UPFC 的本体结构,在各种运行情况下外在特性以及对系统影响差异方面进行了详细比较。提出 UPFC 对周边系统影响分析的基本方法,借鉴串补与系统的配合措施,形成了 UPFC

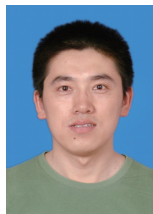
系统配合基本方案,借鉴串补系统保护适应性解决措施,提出了 UPFC 系统线路保护的适应性解决研究方向。对线路保护而言,当 UPFC 呈现容抗特性时对其影响较大,需要重点关注;UPFC 系统由于其控制保护特性相比串补电容更为复杂,造成其暂态特性难以定量的进行解析表达,需要结合仿真分析明确其暂态特性;借鉴串补系统与线路保护配合方法,UPFC 系统亦可通过与线路保护、串联变压器保护进行配合提高系统可靠性;适应 UPFC 系统的交流保护解决方案可部分参考串补解决措施,引入 UPFC 的相关参数提升保护动作性能。

### 参考文献:

- [1] 郭建波. 我国大电网技术发展研讨[C]//第二届中国电力发展和技术创新院士论坛. 北京: 中国电力科学研究院, 2011: 1-12.
- GUO Jianbo. Discussion on the development of large power grid technology in China [C]//The 2th China Electric Power Development and Technology Innovation Forum. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2011: 1-12.
- [2] 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.
- WANG Xu, QI Wanchun, HUANG Junhui, et al. Application of FACTS in Jiangsu Power Grid[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(11): 92-96.
- [3] 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: 8-9.
- State Grid Jiangsu Electric Power Company. Unified power flow controller technology and application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 8-9.
- [4] 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——潮流控制器示范工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 21-31.
- State Grid Jiangsu Electric Power Company. Unified power flow controller engineering practice [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 21-31.
- [5] 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.
- [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, 33(6): 23-28.
- WANG Ruxi, WANG Hu, SHI Zhiping, et al. Study on adaptive distance protection for transmission line with UPFC [J]. Electrical Drive Automation, 2011, 33(6): 23-28.
- [7] 李骈文. 美国 INEZ 变电站统一潮流控制器简介[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 84-87.
- LI Pianwen. A brief introduction to principle of UPFC installed in inez substation of aep system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 84-87.

- [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.  
PAN Lei, LI Jihong, TIAN Jie, et al. Smooth start and stop strategies for unified power flow controllers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 159-164.
- [9] 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.
- [10] 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.  
ZHANG Yong. Unified power flow controller and its influence on distance protection [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [11] 郑涛, 吴丹, 宋洁莹, 等. 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, et al. 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] 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.  
ZHU Pengcheng, LIU Liming, LIU Xiaoyuan, et al. Analysis and study on control strategy for UPFC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 45-51.
- [13] 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.  
LING Feng, QIN Jian, DAI Yang, et al. The operation modes for Nanjing UPFC Project[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 36-40.
- [14] 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. Simulation study on the influence of unified power flow controller on relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(7): 14-17.
- [15] 唐爱红, 程时杰. 基于 PSCAD/EMTDC 的统一潮流控制器统一潮流控制器动态仿真模型[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 6-10.  
TANG Aihong, CHENG Shijie. Dynamic simulation model of unified power flow controller based on pscad/emtcd[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 6-10.
- [16] 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: 128-135.  
ZHU Shengshi. Principle and technology of relay protection in HV power network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 128-135.
- [17] 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.

## 作者简介:



谢华

谢华(1983—),男,江苏启东人,工程师,从事电力系统继电保护研究工作(E-mail: xiehua@nrec.com);

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;

赵青春(1980—),男,湖北武汉人,高级工程师,从事电力系统继电保护研究工作;

戴光武(1984—),男,江苏盐城人,工程师,从事电力系统继电保护研究工作;

徐晓春(1984—),男,江苏南通人,工程师,从事电力系统继电保护研究工作。

## Research on the Effect of UPFC and SC on Line Protection

XIE Hua, PAN Lei, ZHAO Qingchun, DAI Guangwu, XU Xiaochun  
(Nanjing Nari-relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Unified Power Flow Controller (UPFC) injects controlled voltage into the transmission line through series transformer. UPFC is equivalent to series connection of capacitance or inductance to improve transmission efficiency of power network. Series compensation (SC) adjusts line impedance through capacitance similar to UPFC. SC is widely used in EHV transmission line and the influence of SC system on the protection is analyzed in detail. As a new power electronic device, the impact of UPFC on the surrounding system and protection hasn't been deeply studied. In this paper, the characteristics and effects of UPFC on protection and SC are analyzed. The equivalent characteristics of UPFC under various operating conditions and the solution of line protection are studied. The research improves operation reliability of UPFC system.

**Key words:** unified power flow controller (UPFC), series compensation (SC), equivalent characteristic, protection configuration

(编辑 刘晓燕)