

· 统一潮流控制器技术应用专题 ·

## 500 kV 苏南 UPFC 接入对距离保护的影响及应对策略

瞿峰<sup>1</sup>, 邓凯<sup>1</sup>, 张贇<sup>1</sup>, 钱伟<sup>1</sup>, 周强<sup>1</sup>, 孔祥平<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 210002;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**在苏州南部地区接入统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)可以提升电网供电能力,但是UPFC的接入会对输电线路保护的可靠性、选择性和灵敏性产生影响。文中基于500 kV 苏南UPFC工程,结合线路故障后UPFC系统的控制保护逻辑,通过建立含UPFC的电力系统故障等值模型,分析了UPFC接入对线路两侧距离保护动作特性的影响并提出应对性策略。

**关键词:**苏南UPFC;距离保护;故障等值模型;应对策略

**中图分类号:**TM721

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2018)02-0027-06

### 0 引言

近年来,柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)设备快速发展,而作为第三代FACTS的典型代表,统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)是迄今为止功能最全面的FACTS装置,能分别或同时实现并联补偿、串联补偿、移相和端电压调节等多种基本功能<sup>[1-5]</sup>。利用UPFC可以均衡电网的潮流分布,将潮流从重载线路转移至轻载线路,从而提升电网的输电能力,可推迟或避免新建输电线路<sup>[6-7]</sup>。220 kV 南京UPFC是我国将UPFC应用于工程实践的第一次尝试,运行经验表明,其在电网潮流精准控制、提供无功电压支撑、提高系统电压稳定性方面具有十分明显的技术优势<sup>[8-10]</sup>,应用前景广阔。

苏南电网面临着如下问题:特高压锦屏直流接入苏南电网后,对其提供了有效的电力支撑,但该电源为水电直流,受季节影响较大,冬季枯水期送电大幅减少(出力约20%),因此苏南电网的电力受进随季节变化潮流分布影响较大,在送电小方式下梅里至木渎断面存在电力受进“卡脖子”的问题。同时苏南电网以特高压锦苏直流为主要电源,其它常规电源相对较少,而锦苏直流不能向地区提供无功支撑,导致该地区存在动态无功电压支撑能力不足的问题<sup>[11]</sup>。经过研究开发、技术论证、工程设计等环节的工作,全球首创500 kV UPFC于2017年12月19日在苏州南部正式投运,以均衡苏南电网各输电通道潮流,提升苏南电网的供电能力。

距离保护是反应输电线路一侧电气量变化的

保护,以其较好的稳定性、较高的灵敏度、不易受电网运行方式变化影响等优点在继电保护设备中得到了广泛应用<sup>[12-13]</sup>。随着特高压直流输电、交直流混联、柔性交流输电等设备接入电网,导致常规距离保护的测量阻抗值无法真实反应故障位置,从而影响了保护的灵敏性、准确性。基于此,众多学者针对不同装置接入对距离保护的影响展开了深入研究<sup>[14-19]</sup>。文献[14]分析了风电接入系统对距离保护的影响;文献[15]介绍了直流馈入对输电线路距离保护影响的机理;文献[16]叙述了交直流互联系统对距离保护动作特性的影响及对策。FACTS装置的接入改变了线路阻抗的均匀分布,文献[17]详细介绍了不同FACTS元件对距离保护的影响;文献[18]着重对比分析了UPFC与串补对距离保护的影响;文献[19]则提出了一种适用于UPFC接入的新型距离保护方案。

在前人的研究基础上,文中详细分析了苏南500 kV UPFC的接入对两侧线路距离保护的影响,并提出了合理的定值整定方法以确保动作行为的正确性,满足电网安全稳定运行的要求。

### 1 500 kV 苏南 UPFC 工程简介

500 kV 苏南 UPFC 工程的一次系统结构如图1所示,3个换流器采用基于绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术。并联交流侧通过1台并联变压器接入500 kV 木渎变电站的第4串;2个串联交流侧各安装1台串联变压器,通过其高压侧绕组串联接入500 kV 线路;串联变压器网侧、阀侧各配置1台机械旁路断路器,即高压侧旁路断路器(high voltage breaker, HVB)和

收稿日期:2017-11-09;修回日期:2017-12-14

基金项目:国家科学青年基金资助项目(51707090)

中压侧旁路断路器(low voltage breaker, LVB),其上后能够隔离换流器与串联线路。同时,串联变压器阀侧与中性点间配置1台三相晶闸管旁路开关(thyristor bypass switch, TBS),可对换流器进行快速保护。苏南UPFC共有3种运行方式,分别是双线UPFC运行,单线UPFC运行和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)运行。

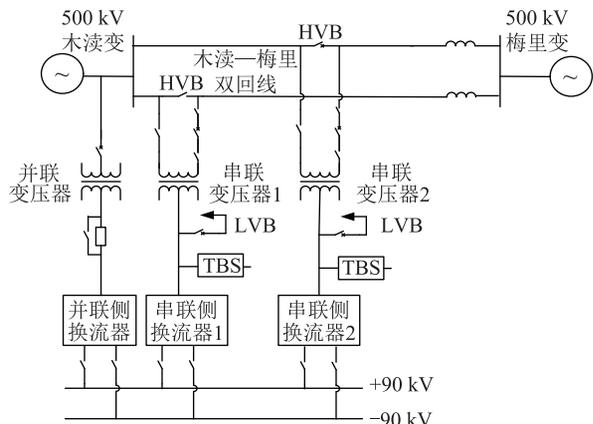


图1 500 kV 苏南 UPFC 工程一次系统结构

Fig.1 Structure diagram of 500 kV UPFC project in Southern Suzhou

## 2 500 kV 苏南 UPFC 接入对距离保护的影响

UPFC 具有对线路潮流的实时调整功能,接入系统以后,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,可同时或有选择性地调节线路上的电压、阻抗和相角。此外,在线路发生故障时,UPFC 既可以通过串联变压器向线路提供一定的补偿电压以减小故障电流<sup>[20]</sup>,也能够利用串联变压器网侧漏抗来限制故障电流<sup>[21]</sup>,因此起到了故障限流的作用。

UPFC 可等效于一个串联元件接入到电力系统中,并且随着系统参数的实时变化,等效串联元件的参数随之变化,将会影响周边输电线路保护的可靠性、选择性和灵敏性。对于线路保护而言,UPFC 设备的引入改变了输电线路阻抗均匀分布的基本特征,导致线路中距离、方向等元件均受到影响,也就无法定量分析距离保护的故障特点。在工程实际中,UPFC 的控制保护逻辑直接决定了交流系统故障的外在特性,需要结合 UPFC 本体的控制保护逻辑分析 UPFC 对交流系统距离保护的影响。

### 2.1 UPFC 故障后控制保护逻辑

由图1可知,UPFC 装置主要由换流器本体及与线路连接的串、并联变压器构成,因此装置内保护主要由换流器保护、变压器保护构成,并配合线

路保护进行动作以保证系统无保护死区。

换流器内发生故障,UPFC 保护动作结果为闭锁3个换流阀、触发晶闸管旁路开关 TBS 并发信号合2个串联变压器的网侧、阀侧旁路断路器 HVB 和 LVB。并联侧换流器故障时跳开并联变压器的进线侧开关,且整个 UPFC 站停电。如果故障发生在串联换流器阀侧的交流连接线处,则仅闭锁相应换流器并合串变两侧开关,若故障切除且满足重启条件则会重启 UPFC。

变压器保护分为串变保护和并变保护。串变保护动作会合相应串的 TBS、高中压侧旁路断路器、闭锁相应换流阀、闭锁线路重合闸。高压侧旁路断路器 HVB 合闸失灵时,保护二时限动作跳两侧线路开关;并变保护动作时,会跳并变三侧断路器且闭锁并联换流器,同时2个串联换流器陪停;并变网侧断路器跳闸失灵时,则远跳木渎侧边中开关。

### 2.2 故障分析模型建立

为了从理论上分析 UPFC 对距离保护动作特性的影响,首先要建立含 UPFC 的电力系统线性化模型,具体方法如下:

将具有实时性、快速性和非线性特性的注入电压源  $\dot{U}_{se}$  设为时间的函数,每一个时刻对应一个电压值(可视为恒压源),这样每一个时刻的 UPFC 系统均可视为线性网络,可利用叠加原理进行故障分析。每一时刻的电压值可表示如下:

$$\dot{U}_{se} = U_{se}(t) \angle \theta(t) \quad (1)$$

式中,注入电压源幅值和相角都是时间的函数且相互独立。根据苏南 UPFC 串联侧的潮流调节特性,式中幅值可以取 0~43.5 kV 的任意值,相角可以取 0~360°的任意值,对距离保护的影响分析基于图2所示的 UPFC 等值电路模型结构。

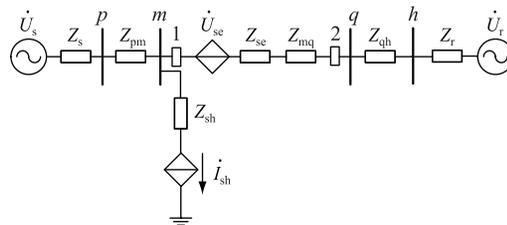


图2 含 UPFC 系统等值结构

Fig.2 Equivalent structure diagram of UPFC

其中  $m$  为 500 kV 木渎变电站母线;  $q$  为 500 kV 梅里变电站母线;  $\dot{U}_s$ ,  $\dot{U}_i$  分别为两端系统电势;  $Z_s$ ,  $Z_r$  分别为两端系统阻抗;  $Z_{pm}$ ,  $Z_{mq}$ ,  $Z_{qh}$  分别为线路  $mp$ 、 $mq$ 、 $qh$  的等值阻抗;  $\dot{U}_{se}$  为 UPFC 串入系统的等效受控电压源;  $Z_{se}$  为 UPFC 串联变压器漏抗。

### 2.3 对距离保护的影响分析

图2中保护1测量的电压电流均为本溪母线侧电气量。系统不同位置发生故障对于距离保护的影响不同,文中分为上级线路、本线路以及下级线路故障对UPFC线路两侧距离保护影响进行讨论。

#### 2.3.1 对UPFC线路本侧距离保护影响

(1) UPFC接入线路上级线路故障。

图3中UPFC接入线路的上级线路 $f_1$ 处发生故障,该故障为保护1的反方向故障,此时分析UPFC是否影响保护1的反向故障识别能力。故障回路中仅包含UPFC并联单元的注入电流 $i_{sh}$ ,不需考虑UPFC本体保护逻辑对串联单元投退的影响。

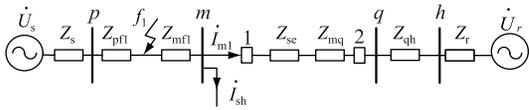


图3 上级线路故障时系统等值结构

Fig.3 Equivalent structure diagram of a superior line fault

在 $f_1$ 处发生故障时,保护1处的测量阻抗表达式为:

$$Z_1 = \frac{-i_{m1}Z_{mf1} - i_{sh}Z_{mf1}}{i_{m1}} = -Z_{mf1} - \frac{i_{sh}}{i_{m1}}Z_{mf1} \quad (2)$$

由式(2)可知,UPFC并联侧注入电流与测量电流的比值影响保护1处测量阻抗。根据实际,并联换流器按STATCOM方式运行,不能提供短路电流, $I_{sh}$ 控制在额定电流范围内;而500 kV UPFC串联变压器网侧额定电流约为并联变压器网侧额定电流的10倍,且短路电流 $I_{m1}$ 明显大于串联变压器网侧额定电流。故UPFC并联单元注入电流 $I_{sh}$ 远小于短路电流 $I_{m1}$ ,故测量阻抗化简为:

$$Z_1 \approx -Z_{mf1} \quad (3)$$

由式(3)可得,UPFC接入几乎不影响反方向故障时保护1的测量阻抗,保护1的测量阻抗为线路阻抗的相反数,距离保护可靠不动作。

(2) UPFC接入线路故障。

UPFC接入线路发生故障,则保护1的故障回路中包含了UPFC系统的串联单元,需要结合UPFC本体保护逻辑具体分析其对保护1距离I段的影响。由于串联变压器阀侧为经高阻接地系统,因此线路不同故障类型时,阀侧感受到的故障电流不同,UPFC保护可能动作也可能不动作,即TBS、HVB可能都动作合闸也可能都拒动。由于TBS动作时间小于2 ms, HVB动作时间小于40 ms,因此当UPFC保护动作时,2 ms内TBS导通闭合,旁路串联

换流器,等效于仅将变压器漏抗接入一次系统中;若UPFC本体保护不动作,则相当于故障回路中串联UPFC注入电压 $\dot{U}_{se}$ 。故在此结合TBS的动作情况进行分类讨论。

① TBS动作对保护1距离I段影响。在本线路 $f_2$ 点发生故障且UPFC保护动作,2 ms内TBS触发将串联换流阀系统隔离,UPFC也不再向交流系统注入受控电压源,仅将变压器漏抗接入一次系统中,如图4所示。

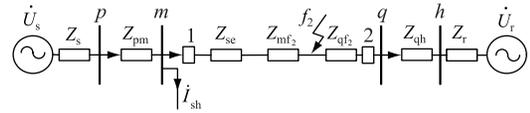


图4 本线路故障且TBS动作时的故障模型

Fig.4 Fault model of local line faults and TBS acts

保护1处的测量阻抗表达式为:

$$Z_1 = Z_{se} + Z_{mf2} \quad (4)$$

可见,保护1的测量阻抗与原来相比增加了变压器漏抗 $Z_{se}$ ,如果按照原始线路长度整定,在保护范围末端故障时,将发生区内拒动,即保护1距离I段的保护范围缩小。

② TBS不动作对保护1距离I段影响。当线路 $f_2$ 点发生故障且UPFC保护不动作时,故障回路仍串入UPFC注入电压 $\dot{U}_{se}$ ,系统故障示意图5。

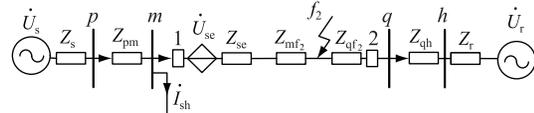


图5 本线路故障且TBS不动作时的故障模型

Fig.5 Fault model of local line faults and TBS fails to act

保护1处的测量阻抗表达式为:

$$Z_1 = Z_{se} + Z_{mf2} + \frac{\dot{U}_{se}}{i_{m1}} \quad (5)$$

由于实际UPFC系统参数的限制,注入电压源的影响不能忽略。在故障稳态过程中,由于线路电流增大,UPFC控制系统起到限流的作用,即呈现感性特性,则保护1处测量阻抗相较于原来增大,如果按照原始线路长度整定,在保护范围末端故障时,将发生区内拒动,即保护范围缩短。

(3) UPFC下级线路故障。

UPFC下级线路故障时主要考虑UPFC对于保护1距离后备段的影响。由系统图可知,保护1的故障回路中包含了UPFC系统的串联单元,需要结合UPFC本体保护逻辑具体分析其对保护1距离后

备段的影响。此处同样按照本体保护动作和不动作两种情况进行分析,并结合 HVB 的动作情况进行分类讨论。

① HVB 动作对保护 1 距离后备段的影响。HVB 动作后,UPFC 串联支路被旁路,HVB 将 UPFC 串联侧从交流系统中隔离,消除了 UPFC 对距离 II、III 段的影响。对于保护 1,故障回路中不再包含 UPFC 支路,距离 II、III 段不受影响。

② HVB 不动作对保护 1 距离后备的影响。HVB 不动作,UPFC 串联注入电压存在故障回路中,分析此情况下对距离 II、III 段的影响,下级线路  $f_3$  故障且 HVB 不动作时故障简化模型如图 6 所示。

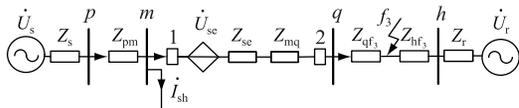


图 6 下级线路故障且 HVB 不动作时的故障模型

Fig.6 Fault model of inferior line faults and HVB fails to act

保护 1 处的测量阻抗表达式为:

$$Z_1 = Z_{se} + Z_{mq} + Z_{qf_3} + \frac{\dot{U}_{se}}{\dot{I}_{m1}} \quad (6)$$

### 2.3.2 对 UPFC 线路对侧距离保护影响

保护 2 为 UPFC 对侧的保护,在系统不同位置发生故障时,由于 UPFC 位置 and 实际参数的设置,会对距离保护产生不同的影响,需要具体分析。

#### (1) UPFC 上级线路故障。

当 UPFC 上级线路  $f_1$  点发生故障时,UPFC 包含在故障回路中。需要结合 UPFC 本体保护动作情况进行详细分析。

① HVB 动作对保护 2 距离后备段的影响。当在 UPFC 线路  $f_1$  点发生故障时,若 UPFC 本体保护动作,则 HVB 在 40 ms 内动作,将 UPFC 串联部分从线路中隔离。可得故障简化模型如图 7 所示。

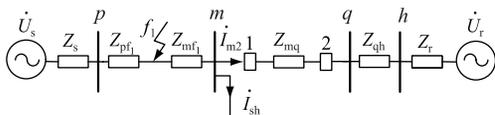


图 7 上级线路故障且 HVB 动作的故障模型

Fig.7 Fault model of superior line faults and HVB acts

保护 2 处的测量阻抗为:

$$Z_2 = Z_{mq} + Z_{mf_1} + Z_{mf_1} \left( \frac{-\dot{I}_{sh}}{\dot{I}_{m2}} \right) \approx Z_{mq} + Z_{mf_1} \quad (7)$$

由式(7)可知,HVB 动作情况下 UPFC 接入对

于保护 2 的测量阻抗基本没有影响。

② TBS 和 HVB 都不动作对保护 2 距离后备段的影响。HVB 动作时间约为 40 ms,因此距离后备保护的動作情况与 HVB 是否动作息息相关,当 TBS 和 HVB 均不动作时,相当于 UPFC 不退出运行。可得故障简化模型如图 8 所示。

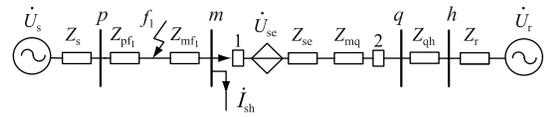


图 8 上级线路故障且 HVB 不动作的故障简化模型

Fig.8 Fault simplification model of superior line faults and HVB fails to act

保护 2 处的测量阻抗为:

$$Z_2 = Z_{mq} + Z_{se} + Z_{mf_1} + \frac{\dot{U}_{se}}{\dot{I}_{m2}} + Z_{mf_1} \left( \frac{-\dot{I}_{sh}}{\dot{I}_{m2}} \right) \approx Z_{mq} + Z_{se} + Z_{mf_1} + \frac{\dot{U}_{se}}{\dot{I}_{m2}} \quad (8)$$

#### (2) UPFC 线路故障。

当故障发生在 UPFC 线路的架空线路段时,保护 2 的故障回路中不包含 UPFC,因此保护 2 的動作情况不受影响。当故障发生在母线  $m$  附近时,保护 2 的故障回路包含 UPFC,测量阻抗受到 UPFC 本体保护动作结果的影响。在此结合 TBS 的動作情况进行分类讨论。

① TBS 动作对保护 2 距离 I 段影响。在 500 kV 木渎变近母线  $m$  处发生故障且 UPFC 串联换流器阀侧电流大于动作门槛时,2 ms 内 TBS 触发将串联换流器旁路,此时 UPFC 不再向交流系统注入受控电压,仅将变压器漏抗接入一次系统中,如图 9 所示。

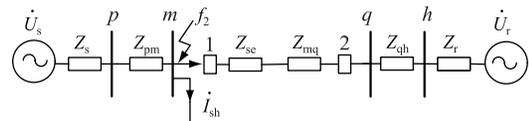


图 9 近母线  $m$  处故障且 TBS 动作时的故障模型

Fig.9 Fault model of line faults near bus  $m$  and TBS acts

保护 2 处的测量阻抗表达式为:

$$Z_2 = Z_{mq} + Z_{se} \quad (9)$$

可见,保护 2 的测量阻抗与原来相比增加了变压器漏抗  $Z_{se}$ ,即  $f_2$  故障时,保护 2 距离 I 段不会误动。

② TBS 不动作对保护 2 距离 I 段影响。当木渎变近母线  $m$  处发生故障且 UPFC 保护不动作时,故障回路仍串入 UPFC 注入电压  $\dot{U}_{se}$ ,系统故障如

图 10 所示。

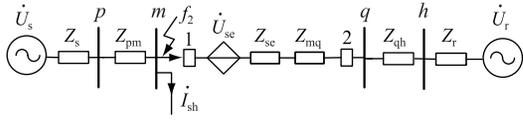


图 10 近母线  $m$  处故障且 TBS 不动作时的故障模型

Fig.10 Fault model of line faults near bus  $m$  and TBS fails to act

保护 2 处的测量阻抗表达式为:

$$Z_2 = Z_{mq} + Z_{se} + \frac{\dot{U}_{se}}{I_{m2}} \quad (10)$$

同前分析,保护 2 处测量阻抗相较于原来增大,则母线  $m$  故障时保护 2 的距离 I 段不会误动。

(3) UPFC 下级线路故障。

当故障发生在 UPFC 下级线路时,保护 2 的故障回路中不包含 UPFC,因此保护 2 的动作情况基本不受影响。

### 3 应对策略

#### 3.1 UPFC 本侧保护

对于 I 段定值,虽然理论分析故障稳态过程中距离 I 段不会误动,甚至会缩短保护范围,但是考虑故障暂态的影响及梅木双线的重要性,应做保守考虑,即应适当减小可靠系数  $K_{rel}$ 。减小可靠系数  $K_{rel}$  会进一步减小保护范围,而距离 I 段保护范围以不小于 50% 为宜。系统实际参数为:线路阻抗  $Z_L = Z_{mq} = 10.14 \Omega$ , UPFC 串联漏抗  $Z_{se} = 1.26 \Omega$ ,考虑线路串入变压器漏抗情况下,线路 I 段保护范围为 50%,可计算得距离 I 段整定值为  $Z_{set,1}^I = 50\% Z_L + Z_{se} = 6.3 \Omega$ ,即  $K_{rel}$  约为 0.6。

对于 II 段定值,UPFC 接入使得测量阻抗增大,导致 II 段灵敏度降低甚至区内拒动,考虑适当提高 II 段整定值以保证灵敏度系数满足要求。保护 1 距离 II 段原有整定值为  $Z_{set,1}^{II} = 1.7Z_L$ ;考虑线路串入变压器漏抗情况下,线路末端故障时,保护测量阻抗增大了约 12%,为保证距离 II 段灵敏度系数保持不变,将 II 段定值也增大 12%,即  $Z_{set,1}^{II} = 1.7Z_L(1 + 12\%) = 1.9Z_L$ 。

对于 III 段定值,同样 UPFC 接入会使得测量阻抗增大,导致 III 段灵敏度降低,考虑适当提高 III 段整定值以保证灵敏度系数  $K_{sen}$  满足要求。距离 III 段原有整定值为  $Z_{set,1}^{III} = 2Z_L$ ,同样考虑到线路串入变压器漏抗情况下,线路末端故障时测量阻抗增大了约 12%,为保证距离 III 段  $K_{sen}$  保持不变,将 III 段定值也增大约 12%,即  $Z_{set,1}^{III} = 2Z_L(1 + 12\%) \approx 2.3Z_L$ 。

#### 3.2 UPFC 对侧保护

对于距离 I 段,虽理论分析故障稳态过程中距离 I 段不会误动,但是考虑故障暂态的影响,保守考虑,适当减小可靠系数  $K_{rel}$ 。为简便起见,与 UPFC 本侧保护可靠系数保持一致,缩小至 0.6。

对于距离 II 段,UPFC 接入使测量阻抗增大,导致 II 段灵敏度降低甚至区内拒动,可适当提高 II 段整定值以保证灵敏度系数满足要求。可与 UPFC 本侧保护的 II 段定值保持一致,即  $Z_{set,2}^{II}$  为  $1.9Z_L$ 。

对于距离 III 段,同样 UPFC 接入使得测量阻抗增大,导致 III 段灵敏度降低,考虑适当提高 III 段整定值以保证灵敏度系数满足要求。可与 UPFC 本侧保护的 II 段定值保持一致,即  $Z_{set,2}^{III}$  为  $2.3Z_L$ 。

### 4 结语

本文基于 500 kV 苏南 UPFC 工程,对 UPFC 接入系统后,距离保护受到影响进行理论分析,并就线路实际情况,提出了应对性策略,通过合理整定距离保护各段定值,在不失距离保护灵敏度的情况下,最大限度消除 UPFC 对距离保护的影响,保障了电力系统安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘建坤,李群. 计及统一潮流控制器的可用输电能力计算方法[J]. 陕西电力,2017,45(2):49-53,77.  
LIU Jiankun, LI Qun. Calculation method for available transfer capability considering UPFC[J]. Shanxi Electric Power, 2017, 45(2):49-53,77.
- [3] 赵渊,杨晓嵩,谢开贵. UPFC 对电网可靠性的灵敏度分析及优化配置[J]. 电力系统自动化,2012,36(1):55-60.  
ZHAO Yuan, YANG Xiaosong, XIE Kaigui. Parameter sensitivity and optimal allocation of UPFC in bulk power systems reliability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(1):55-60.
- [4] 钱锋,王永,胡剑锋,等. 基于 PSS/E 的统一潮流控制器仿真建模[J]. 广东电力,2017,30(11):61-66.  
QIAN Feng, WANG Yong, HU Jianfeng, et al. Simulation modeling for unified power flow controller based on PSS/E[J]. Guangdong Electric Power, 2017,30(11):61-66.
- [5] 张曼,张春朋,姜齐荣,等. 统一潮流控制器多目标协调控制策略研究[J]. 电网技术,2014,38(4):1008-1013.  
ZHANG Man, ZHANG Chunpeng, JIANG Qirong, et al. Study on multi-objective coordinated control strategy of unified power flow controller[J]. 2014, 38(4):1008-1013.
- [6] 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 of power grid [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(11): 92-96.
- [7] 付俊波, 朱炳铨, 田杰, 等. UPFC在浙江金华电网的应用研究[J]. 浙江电力, 2015(7): 1-4.
- FU Junbo, ZHU Bingquan, TIAN Jie, et al. Application research of UPFC in Zhejiang Jinhua power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2015(7): 1-4.
- [8] 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.
- LU Jiang, QIN Jian, PAN Lei, et al. Study on architecture and configuration for control and protection system of Nanjing UPFC project[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 1-5.
- [9] 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.
- [10] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网UPFC示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
- QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing western power grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
- [11] 蔡晖, 张文嘉, 万振东, 等. 苏州南部电网的电压稳定问题及无功补偿策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 110-116.
- CAI Hui, ZHANG Wenjia, WANG Zhendong, et al. Study on voltage stability and reactive compensation strategy in southern power grid of Suzhou[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 110-116.
- [12] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- XU Zhengya. New distance protection of transmission line[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 2002.
- [13] 贺家李, 李永丽, 郭征, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案(一)特高压输电线路的结构与运行特点[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 1-6.
- HE Jiali, LI Yongli, GUO Zheng, et al. Relay protection for UHV transmission lines: Part one construction and operation characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 1-6.
- [14] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 10-15.
- WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of distance protection in power system integration with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.
- [15] 张璞, 王钢, 李海锋, 等. 直流馈入下的输电线路距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 56-62.
- ZHANG Pu, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Performance of distance protection for transmission lines in an HVDC/AC inter-connected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 56-62.
- [16] 申洪明, 黄少锋, 费彬, 等. 交直流互联系统对距离保护动作特性的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 58-63, 82.
- SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, FEI Bin, et al. Effect analysis of AC/DC interconnected network on distance protection performance and countermeasures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 58-63, 82.
- [17] 刘青, 王增平. 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, WANG Zengping. Affection and solving methods of protection by FACTS component [J]. Electric Power, 2004, 37(10): 18-21.
- [18] 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.
- [19] 孔祥平, 袁宇波, 高磊, 等. 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, 5403.
- KONG Xiangping, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. Study of distance protection scheme for transmission line including UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5219-5226, 5403.
- [20] 徐帅, 杜钦君, 张晓飞, 等. 新型限流式统一潮流控制器限流分析与参数设计[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 558-565.
- XU Shuai, DU Qinjun, ZHANG Xiaofei, et al. Current limiting analysis and parameter design of a novel UPFC with fault current limiter [J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 558-565.
- [21] 莫育杰, 江道灼, 田中山, 等. 新型固态限流器中饱和型耦合变压器的设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 103-108.
- MO Yujie, JIANG Daozhuo, TIAN Zhongshan, et al. Design of saturated coupling transformer in a new bridge type solid state fault current limiter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 103-108.

## 作者简介:



瞿峰

瞿峰(1983—),男,硕士,工程师,从事柔性交流输电技术相关工作(E-mail: 1393682474@qq.com);

邓凯(1986—),男,博士,工程师,从事柔性交流输电技术相关工作(E-mail: seudengkai@163.com);

张赟(1981—),男,本科,高级工程师,从事柔性交流输电技术相关工作。

## Reliability Research and Design Optimization of Modular Multilevel Converter

DUAN Jun , XIE Yeyuan , JIANG Tianguai , ZHU Minglian , OUYANG Youpeng

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

**Abstract:** As the key equipment of UPFC, the reliability of the modular multilevel voltage sourced converter operation directly affects the safe and stable operation of the whole AC system. An  $k$ -out-of- $n$ ; G system model of Sunan 500 kV UPFC-MMC and the basic analysis method for it are proposed in this paper. The relation between the reliability of valve and different redundancies is clearly described. The reliability value and MTTF of Sunan 500 kV UPFC-MMC are evaluated. And the optimal amount of redundant sub-module is analyzed basing on the indices obtained in forenamed study. The reliability design optimization of MMC valve could meet the engineering requirements Sunan 500 kV UPFC and would provide a reference for follow-up project.

**Key words:** UPFC; modular multilevel converter; reliability; reliability design optimization;  $k$ -out-of- $n$ ; G system

(编辑 方 晶)

(上接第 19 页)

## Comparison and Selection of MV Distribution Network Planning Schemes Considering Reliability Assessment

YANG Wenli

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China)

**Abstract:** From two aspects of the collection and calculation methods of reliability parameters and the selection of planning schemes, a formation and selection method of MV distribution network planning schemes considering reliability assessment is proposed in this paper, and the application of the guidance on the reliability evaluation of MV distribution network is furtherly enriched. This method includes parameter collection, reliability evaluation algorithm and formulation and comparison of schemes. Cooperating reliability and economy, the incremental net benefit model of investment is proposed based on "with&without comparison evaluation method", and the difference between the simplified model and the scheme comparison method based on life cycle cost minimization is analyzed under different power supply capacity and load demand. The investment cost & benefit is analyzed based on dynamic economic indicators, such as net present value and net present value rate, which can be used for multiple options. The case shows that the proposed method is feasible and effective.

**Key words:** MV distribution network; reliability assessment; with&without comparison evaluation method; life cycle cost; comparison and selection

(编辑 陈 娜)

(上接第 32 页)

## Research on the Effect of 500 kV UPFC in Southern Suzhou on Distance Protection and the Countermeasures

QU Feng<sup>1</sup>, DENG Kai<sup>1</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, QIAN Wei<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>1</sup>, KONG Xiangping<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch, Nanjing 210002, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** It is conducive to improve the power supply capacity of power grid in the southern part of Suzhou based on unified power flow Controller (UPFC). However, the integration of UPFC has an impact on the reliability, selectivity and sensitivity of transmission line protection. In this paper, the fault equivalent model of 500 kV UPFC in Southern Suzhou is built combined with the control and protection logic after line fault, then the influence on distance protection action is analyzed, as well as the coping strategies are proposed.

**Key words:** UPFC in Southern Suzhou; distance protection; fault equivalent model; coping strategies

(编辑 方 晶)