

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.012

## UPFC 接入对线路变化量方向元件的影响

黄涛, 赵青春, 谢华, 李奔, 谈浩

(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)可以实现线路潮流灵活控制,改善系统运行方式,但UPFC的接入改变了线路电压的均匀分布,给继电保护带来了一些问题。文中结合故障后UPFC的控制保护逻辑,研究UPFC注入电压的暂态变化特征,针对不同故障位置分析注入电压变化对变化量方向元件的影响;进而分析UPFC接入对不同变化量方向元件的影响程度,指出当保护安装处位于故障点与UPFC接入点之间时,正序变化量、工频变化量方向元件的灵敏性大幅下降,UPFC本体故障时,正序变化量、工频变化量方向元件可能误判故障方向;最后基于苏州南部电网500 kV UPFC工程实际模型及参数,搭建计及UPFC控保逻辑的实时数字仿真(RTDS)模型,验证所提方法的正确性。

**关键词:**统一潮流控制器(UPFC);串联变压器;变化量方向元件;注入电压;灵敏性

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)05-0085-07

### 0 引言

柔性交流输电技术(flexible alternating current transmission systems, FACTS)能对输电线路电压、电抗等关键参数进行灵活快速控制,对交流电网输送容量提升及安全稳定运行具有重要意义<sup>[1]</sup>。统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为第三代FACTS设备的典型代表,是目前最全面的FACTS装置,具备并联补偿、串联补偿、移相和端电压调节等多种功能<sup>[2-6]</sup>,可以快速独立地控制输电线路中的有功、无功功率,实现系统潮流优化调整。

UPFC由共用直流侧的并联、串联换流器组成。其中串联换流器通过给线路注入幅值和相角均可控的电压达到改变潮流的目的,该注入电压改变了原有输电线路的电压分布。当系统故障时,UPFC的控制保护行为可能引起注入电压突变,此时在故障附加网络中,除了故障点处的附加电势外,UPFC接入点也存在一电势,该电势会对故障点附加电势形成干扰,影响基于变化量的保护元件的动作性能。输电线路保护中常用方向元件判别故障正、反方向,而工程应用较多的方向元件主要是基于变化量的,如零序、负序、正序变化量、工频变化量方向元件<sup>[7-9]</sup>。因此,需要对UPFC接入后变化量方向元件的动作性能进行全面评估与分析。

目前有关UPFC对交流继电保护的影响研究主要集中在距离保护上<sup>[10-14]</sup>。UPFC的串入改变了线路的阻抗分布,造成距离保护范围扩大或缩小,

文献[11]提出基于输电线路微分方程模型的距离保护I段和传统距离保护II段、III段相配合的新型距离保护方案,不受UPFC运行模式、控制参数影响;文献[13]提出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的影响。在线路纵联保护方面,文献[15]指出UPFC接入可能导致工频变化量方向保护区内故障拒动或区外故障误动,但未具体分析UPFC对方向保护的影响程度。

文中基于苏州南部500 kV UPFC工程,研究UPFC接入对线路变化量方向元件的影响机理及影响程度,并通过实时数字仿真(real time digital simulation, RTDS)试验对分析结果进行验证。

### 1 故障期间UPFC的暂态行为分析

#### 1.1 苏南UPFC工程概述

建设苏州南部UPFC工程是为了解决特高压锦屏直流的送出和消纳问题。UPFC装设在500 kV木渎变和梅里变之间靠木渎侧的位置,其结构见图1。工程包含2个串变支路和1个并变支路,其中串变1、串变2的网侧绕组分别串接入梅木1、2线。网侧绕组两端安装机械旁路开关(5020、5030),阀侧绕组安装晶闸管快速旁路开关(TBS1、TBS2)及机械旁路开关(1211、1311)。正常运行时,投入梅木1、2线双线UPFC,对木渎—梅里线路潮流进行控制。

#### 1.2 故障期间UPFC的动作行为

为了保护故障时换流器的设备安全,UPFC各元件配置多种高灵敏度的控制保护<sup>[16-17]</sup>。根据故

收稿日期:2020-02-20;修回日期:2020-03-27

基金项目:国家电网有限公司科技项目“500 kV统一潮流控制器(UPFC)绝缘优化设计与运行性能评估关键技术研究”

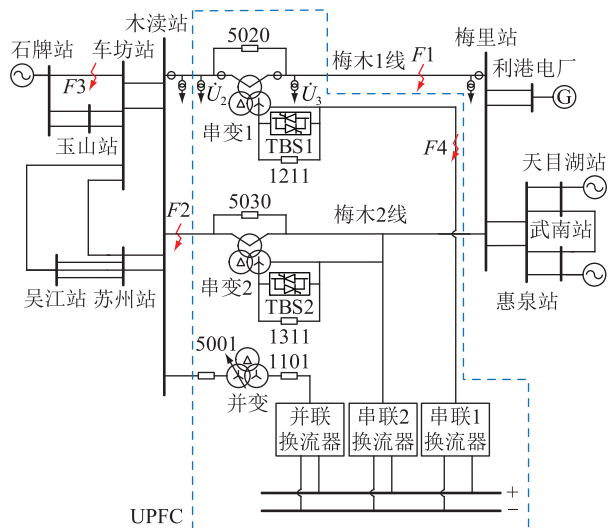


图1 苏南UPFC工程结构

Fig.1 Southern Suzhou 500 kV UPFC project

障严重程度的不同,UPFC 动作行为可分为2类。

(1) 故障较严重。UPFC 本体保护动作,首先触发 TBS 导通,闭锁各桥臂子模块,将换流器从交流系统隔离,然后分别合上网侧机械旁路开关、阀侧机械旁路开关,将 UPFC 彻底切除。其中 TBS 导通速度非常快,一般在 3 ms 以内,机械旁路开关稍慢,在 TBS 动作后 40 ms 左右闭合。

(2) 故障轻微。UPFC 本体保护不动作,TBS 及机械旁路开关均不闭合,UPFC 根据故障前的控制指令及策略继续对线路潮流进行调节。

### 1.3 UPFC 注入电压的暂态变化特征

UPFC 通过串联变压器向线路注入幅值、相位可调的电压改变线路功率,定义该电压为注入电压  $\dot{U}_{se}$ ,由图 1 可得:

$$\dot{U}_{se} = \dot{U}_2 - \dot{U}_3 \quad (1)$$

式中:  $\dot{U}_2$  为串变网侧绕组木湊侧电压;  $\dot{U}_3$  为串变网侧绕组梅里侧电压。

当系统故障时,串变注入电压可能发生突变,假设故障前的注入电压为  $\dot{U}_{se|0|}$ ,故障后的注入电压为  $\dot{U}_{sef}$ 。则注入电压变化量为:

$$\Delta \dot{U}_{se\Sigma} = \dot{U}_{sef} - \dot{U}_{se|0|} \quad (2)$$

$\Delta \dot{U}_{se\Sigma}$  可以看成由 2 部分组成:一是故障点电压跌落造成,记为  $\Delta \dot{U}_{sef}$ ;二是 UPFC 本体控制保护动作造成,记为  $\Delta \dot{U}_{se}$ 。UPFC 接入对变化量方向元件的影响取决于  $\Delta \dot{U}_{se}$  的特性。

详细推导不同情况下的  $\Delta \dot{U}_{se}$  非常困难,此处仅定性分析其变化特征。根据故障期间 UPFC 的动作

行为分 2 种情况讨论。

(1) UPFC 本体保护动作。UPFC 本体保护动作 TBS 迅速闭合,同时闭锁换流器各桥臂子模块,换流器输出电压为 0。注入电压可认为由故障前的初始值瞬间变为 0,即:

$$\Delta \dot{U}_{se} = 0 - \dot{U}_{se|0|} = -\dot{U}_{se|0|} \quad (3)$$

$\Delta \dot{U}_{se}$  的幅值和相位取决于故障前 UPFC 的运行工况,故障前 UPFC 对功率的控制作用越大,  $\Delta \dot{U}_{se}$  的幅值越大。

(2) UPFC 本体保护不动作。如果故障后 UPFC 仍然按照故障前的指令值和控制方式运行,由于故障后流过线路的功率必然发生变化,偏离指令值,UPFC 会通过改变输出电压将功率重新拉回指令值。此时  $\Delta \dot{U}_{se}$  为:

$$\Delta \dot{U}_{se} = \dot{U}'_{se} - \dot{U}_{se|0|} \quad (4)$$

式中:  $\dot{U}'_{se}$  为故障后 UPFC 输出的注入电压。

此时,  $\dot{U}'_{se}$  的幅值和相位取决于故障后线路的功率变化,其幅值最大出现在故障前后潮流控制方向相反且满控的情况。比如故障前线路大潮流,UPFC 运行在限制功率模式下,故障后线路有功下降,低于正常运行的指令值,UPFC 提升功率。因此,  $\dot{U}'_{se}$  与  $\dot{U}_{se|0|}$  的相位可能相反,使得  $\Delta \dot{U}_{se}$  的幅值比 UPFC 本体保护动作时更大。

## 2 变化量方向元件工作原理

变化量方向元件根据保护安装处电压和电流变化量之间的相位关系来确定故障方向。正方向故障时,故障附加网络中保护测量阻抗为背侧系统阻抗的相反数;反方向故障时保护测量阻抗为线路阻抗与对侧系统阻抗之和。由此可得正、反方向故障判据分别如式(5)、式(6)所示。

$$-180^\circ < \arg \frac{\Delta \dot{U}}{\Delta \dot{I}} < 0^\circ \quad (5)$$

$$0^\circ < \arg \frac{\Delta \dot{U}}{\Delta \dot{I}} < 180^\circ \quad (6)$$

式中:  $\Delta \dot{U}$ ,  $\Delta \dot{I}$  分别为保护安装处的电压、电流变化量。

根据所采用的变化量不同,  $\Delta \dot{U}$ ,  $\Delta \dot{I}$  可取零序、负序、正序变化量、工频变化量,分别对应零序、负序、正序变化量、工频变化量方向元件。

式(5)、式(6)是在故障附加网络中仅故障点存在电势时得到的,而在接入 UPFC 的线路中,UPFC

接入点因注入电压突变也会存在一电势,并对故障点电势形成干扰,影响变化量方向元件的正确动作。

### 3 UPFC对变化量方向元件的影响分析

#### 3.1 UPFC对变化量方向元件的影响机理

假设本侧为  $M$  侧,梅里侧为  $N$  侧,梅木 1 线区内故障时的等效故障附加网络如图 2 所示。 $X_M$ ,  $X_N$  分别为  $M, N$  侧系统阻抗;  $X_{LM}$ ,  $X_{LN}$  分别为母线  $M, N$  到故障点的线路阻抗;  $\Delta\dot{U}_f$  为故障点叠加电势;  $\Delta\dot{U}_{fM}$ ,  $\Delta\dot{I}_{fM}$ ,  $\Delta\dot{U}_{fN}$ ,  $\Delta\dot{I}_{fN}$  分别为  $\Delta\dot{U}_f$  单独作用时  $M, N$  侧保护测得的电压、电流;  $\Delta\dot{U}_{seM}$ ,  $\Delta\dot{I}_{seM}$ ,  $\Delta\dot{U}_{seN}$ ,  $\Delta\dot{I}_{seN}$  分别为  $\Delta\dot{U}_{se}$  单独作用时  $M, N$  侧保护测得的电压、电流。

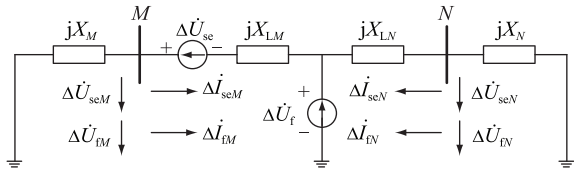


图 2 UPFC 系统故障附加网络(区内故障)

Fig.2 Fault additional network of grid with UPFC (internal fault)

由图 2 可得:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{fM} = -jX_M \Delta\dot{I}_{fM} \\ \Delta\dot{U}_{seM} = -jX_M \Delta\dot{I}_{seM} \end{cases} \quad (7)$$

可得  $M$  侧保护电压、电流变化量满足:

$$\frac{\Delta\dot{U}_M}{\Delta\dot{I}_M} = \frac{\Delta\dot{U}_{fM} + \Delta\dot{U}_{seM}}{\Delta\dot{I}_{fM} + \Delta\dot{I}_{seM}} = -jX_M \quad (8)$$

式中:  $\Delta\dot{U}_M$ ,  $\Delta\dot{I}_M$  分别为  $M$  侧保护电压、电流总的变化量。

$\Delta\dot{U}_M$  与  $\Delta\dot{I}_M$  的相位差满足式(5),此情况下  $M$  侧方向元件始终能正确判断故障方向,同理  $N$  侧方向元件也不受 UPFC 影响。 $N$  侧区外故障时,UPFC 系统等效故障附加网络如图 3 所示。

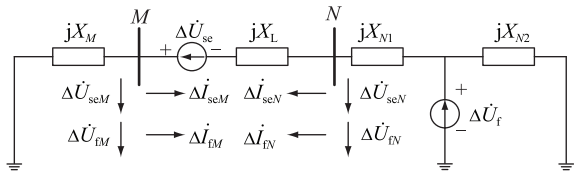


图 3 UPFC 系统故障附加网络(区外故障)

Fig.3 Fault additional network of grid with UPFC (external fault)

图中,  $X_{N1}$ ,  $X_{N2}$  分别为故障点到母线  $N, N$  侧系统中性点的阻抗;  $X_L$  为线路阻抗。对于  $M$  侧,仍可

推得式(8),方向元件可以正确动作。对于  $N$  侧,  $\Delta\dot{U}_f$  单独作用时,有:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{fN} = (X_M + X_L) \frac{\Delta\dot{U}_f}{X_M + X_L + X_{N1}} \\ \Delta\dot{I}_{fN} = \frac{\Delta\dot{U}_f}{j(X_M + X_L + X_{N1})} \end{cases} \quad (9)$$

$\Delta\dot{U}_{se}$  单独作用时,有:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{seN} = -X_N \frac{\Delta\dot{U}_{se}}{X_M + X_L + X_N} \\ \Delta\dot{I}_{seN} = \frac{\Delta\dot{U}_{se}}{j(X_M + X_L + X_N)} \end{cases} \quad (10)$$

可得  $N$  侧保护电压、电流变化量满足:

$$\frac{\Delta\dot{U}_N}{\Delta\dot{I}_N} = \frac{\Delta\dot{U}_{fN} + \Delta\dot{U}_{seN}}{\Delta\dot{I}_{fN} + \Delta\dot{I}_{seN}} = j \frac{(X_\Sigma - X_N)X_\Sigma \Delta\dot{U}_f - (X_\Sigma - X_{N2})X_N \Delta\dot{U}_{se}}{X_\Sigma \Delta\dot{U}_f + (X_\Sigma - X_{N2}) \Delta\dot{U}_{se}} \quad (11)$$

式中:  $\Delta\dot{U}_N$ ,  $\Delta\dot{I}_N$  分别为  $N$  侧保护电压、电流总的变化量;  $X_\Sigma = X_M + X_L + X_N$ 。

由式(11)可知,因  $\Delta\dot{U}_{se}$  存在,  $\Delta\dot{U}_N$ ,  $\Delta\dot{I}_N$  间的相位关系变得复杂,式(6)中的反方向故障判断未必能满足。定义  $\alpha$  为:

$$\alpha = \arg \frac{(X_\Sigma - X_N)X_\Sigma \Delta\dot{U}_f - (X_\Sigma - X_{N2})X_N \Delta\dot{U}_{se}}{X_\Sigma \Delta\dot{U}_f + (X_\Sigma - X_{N2}) \Delta\dot{U}_{se}} \quad (12)$$

结合式(11)、式(12)可知,  $\Delta\dot{U}_N$ ,  $\Delta\dot{I}_N$  间的相位差在最大灵敏角  $90^\circ$  处偏移了  $\alpha$  角。为研究  $\alpha$  特性,作图 4 所示的相量图进行分析。

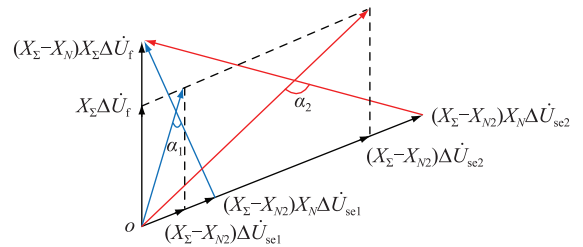


图 4 UPFC 对方向元件影响原理

Fig.4 Impact mechanism of UPFC on direction relay

由图 4 可知,  $\alpha$  的大小取决  $\Delta\dot{U}_{se}$  相对于  $\Delta\dot{U}_f$  的大小。若  $\Delta\dot{U}_{se}$  相对  $\Delta\dot{U}_f$  很小,如图中的  $\Delta\dot{U}_{se1}$ ,相应的  $\alpha_1$  也较小,  $\Delta\dot{U}_N$  与  $\Delta\dot{I}_N$  的相位差不会偏移最大灵敏角太多,式(6)依然能够满足,但灵敏度会下降;若  $\Delta\dot{U}_{se}$  很大,如图中的  $\Delta\dot{U}_{se2}$ ,相应的  $\alpha_2$  也很大,甚

至会大于  $90^\circ$ , 此时式(6)将不再满足,  $N$  侧方向元件会误动作。

### 3.2 不同变化量方向元件的影响程度分析

UPFC 串变低压侧装有平衡绕组, 故障时零序电流以平衡绕组为回路, 零序网络中不包含 UPFC 换流器, 故零序方向元件不受 UPFC 影响。

UPFC 换流器只对正序分量进行控制, 故障时不提供负序源, 注入电压变化量中的负序分量与 UPFC 控制无关, 故负序方向元件也不受影响。

对于正序变化量和工频变化量方向元件, UPFC 控制保护动作造成的注入电压变化将对其动作特性造成干扰, 且这种干扰程度取决于  $\Delta \dot{U}_{se}$  相对  $\Delta \dot{U}_f$  的大小。若故障严重,  $\Delta \dot{U}_f$  较大, UPFC 本体保护动作, 由于  $\dot{U}_{se|0|}$  不会超过线路额定电压的  $1/10$ , 故  $\Delta \dot{U}_{se}$  相对  $\Delta \dot{U}_f$  较小; 若故障轻微, 则  $\Delta \dot{U}_f$  很小, 此时线路上的潮流变化也很小,  $\Delta \dot{U}_{se}$  的值同样不会太大。综上, 外部电网故障时,  $\Delta \dot{U}_{se}$  相比  $\Delta \dot{U}_f$  偏小, 方向元件误动可能性不大, 但灵敏性下降较明显。

## 4 试验验证

在 RTDS 中搭建如图 1 所示的仿真模型, 模型参数采用实际苏南 500 kV UPFC 系统参数, 部分参数见表 1, 在模型中搭建与实际工程一致的 UPFC 控制保护逻辑。

表 1 模型参数  
Table 1 Model parameters

参数	数值/ $\Omega$
梅木 1、2 线正序阻抗	$0.441+j10.143$
梅木 1、2 线零序阻抗	$5.7054+j23.5659$
车木 1、2 线正序阻抗	$0.6615+j11.5487$
车木 1、2 线零序阻抗	$7.2214+j29.8226$
石车线正序阻抗	$0.6339+j10.2533$
石车线零序阻抗	$6.7252+j26.0741$
串变暂态电抗	$j1.2615$

梅木 1、2 线设置小潮流、大潮流 2 种运行方式, 其中小潮流方式下功率由木渎站流向梅里站, 有功功率为 409 MW, 无功功率为 25 Mvar; 大潮流方式下功率由梅里站流向木渎站, 有功功率为 1 810 MW, 无功功率为 240 Mvar。UPFC 可以工作在 6 种模式: 小潮流不投; 小潮流不控; 小潮流提功率; 大潮流不投; 大潮流不控; 大潮流限功率。以梅木 1 线为对象, 根据图 1 设置 4 种不同的故障仿真工况。

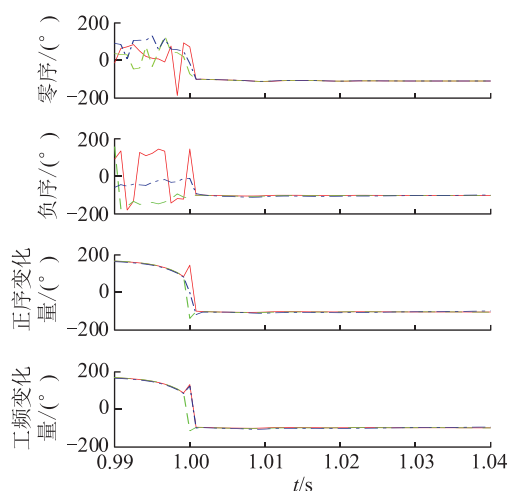
工况一: 大潮流运行方式, 区内  $F1$  点在 1 s 时发生 A 相经  $15 \Omega$  过渡电阻接地故障。

工况二: 小潮流运行方式, 区外  $F2$  点在 1 s 时发生 A 相经  $20 \Omega$  过渡电阻接地故障。

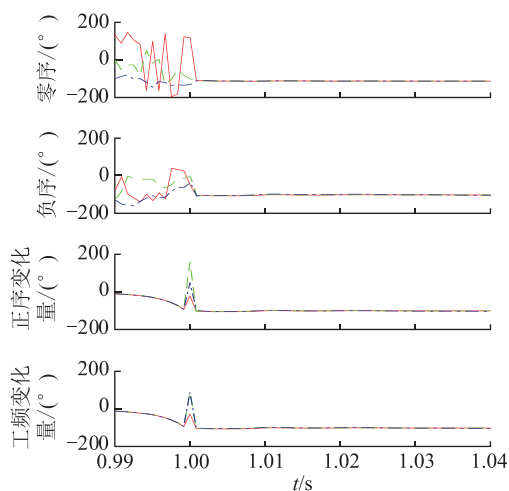
工况三: 大潮流运行方式, 区外  $F3$  点在 1 s 时发生 B 相经  $15 \Omega$  过渡电阻接地故障。

工况四: 小潮流运行方式, 梅木 1 线串变阀侧  $F4$  点在 1 s 时刻发生 C 相金属性接地故障。

工况一的仿真结果如图 5 所示。



(a) 木渎站电压变化量与电流变化量相位差



(b) 梅里站电压变化量与电流变化量相位差

— UPFC不投 — UPFC不控 - - - UPFC限功率

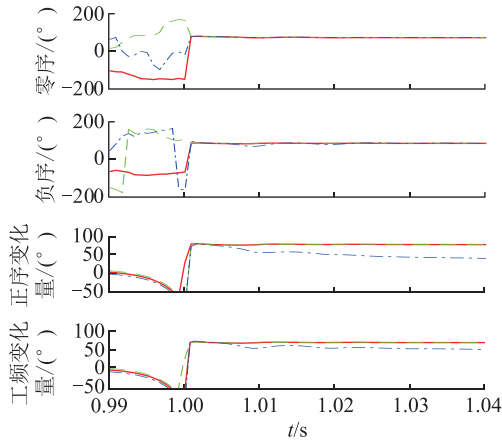
图 5 工况一方向元件动作特性仿真结果

Fig.5 Performance of directional relay in case 1

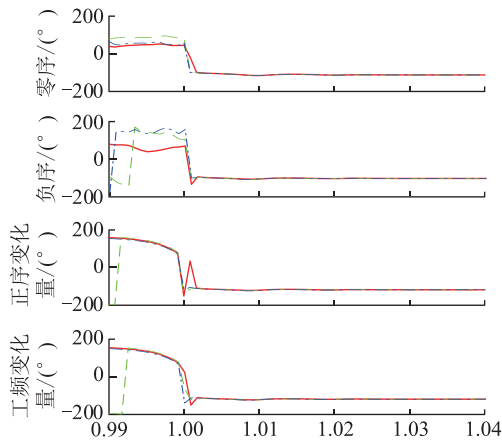
由图 5 可知, 在 UPFC 不投、不控、限功率 3 种方式下, 线路两侧的零序、负序、正序变化量、工频变化量方向元件比相结果均为  $-100^\circ$  左右, 各方向元件可以灵敏地判断故障发生在正方向, 说明当 UPFC 接入点与故障点位于保护同一侧时, UPFC 对方向元件基本无影响。

工况二的仿真结果如图 6 所示。由图 6 可知, 木渎站零序、负序方向元件均可判为反方向故障, 梅里站零序、负序方向元件均可判为正方向故障, 说明系统故障时零、负序方向元件不受 UPFC

影响。木渎站的正序变化量方向元件、工频变化量方向元件在提功率模式下比相结果向  $0^\circ$  发生偏移, 原因为提功率时 UPFC 注入电压较大, 该注入电压对故障点电势形成较大的干扰, 造成与正序相关的方向元件灵敏性下降。梅里站的正序变化量、工频变化量方向元件均不受 UPFC 影响, 说明当保护位于 UPFC 接入点与故障点之间时, 方向元件可能受 UPFC 影响。



(a) 木渎站电压变化量与电流变化量相位差



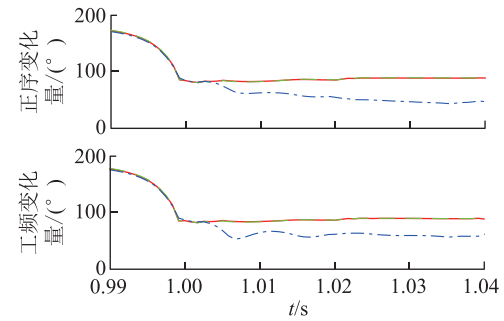
(b) 梅里站电压变化量与电流变化量相位差  
— UPFC不投 — UPFC不控 — UPFC提功率

图6 工况二方向元件动作特性仿真结果

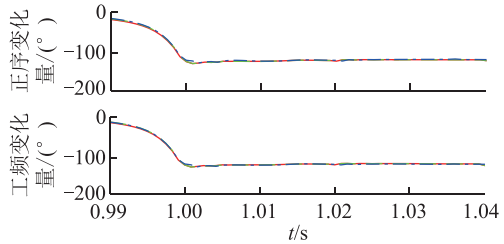
Fig.6 Performance of directional relay in case 2

工况三的正序变化量、工频变化量方向元件仿真结果如图7所示。由图7可知, 大潮流运行方式下区外故障时, UPFC 同样对反方向故障一侧的方向元件有影响。

工况四的仿真结果如图8所示。串变阀侧故障会导致 UPFC 控保动作触发旁路开关闭合, 同样造成接入点的电压突变, 由图8可知 UPFC 提功率时线路两侧的正序变化量、工频变化量方向元件比相结果均能稳定在  $-100^\circ$  左右, 判为正方向故障, 但实际线路并无故障。这一特殊情况是由于 UPFC 本体故障时, 保护测量到的电压、电流变化量全部由注入



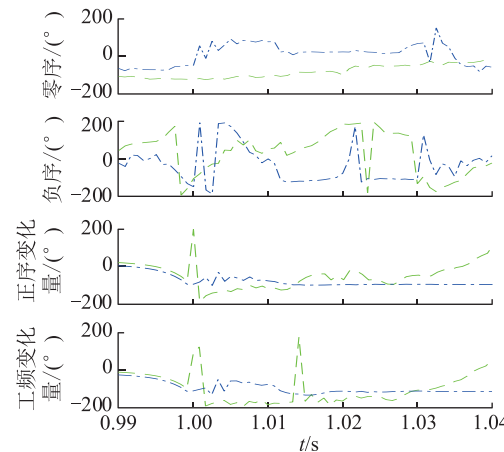
(a) 木渎站电压变化量与电流变化量相位差



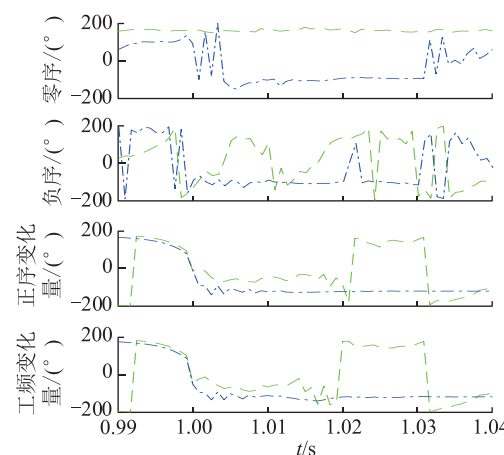
(b) 梅里站电压变化量与电流变化量相位差

图7 工况三方向元件动作特性仿真结果

Fig.7 Performance of directional relay in case 3



(a) 木渎站电压变化量与电流变化量相位差



(b) 梅里站电压变化量与电流变化量相位差

图8 工况四方向元件动作特性仿真结果

Fig.8 Performance of directional relay in case 4

电压的突变产生,线路两侧方向元件同时感受到正方向的扰动,导致误判为正方向故障。

## 5 结论

文中针对 UPFC 的接入分析了其对线路方向元件的影响,系统故障或 UPFC 本体故障时,故障前后 UPFC 的控制发生变化,造成注入电压的快速变化,对故障点电势造成干扰,影响方向元件的动作性能。主要结论及建议为:

(1) UPFC 接入对零序、负序方向元件无影响;

(2) UPFC 接入对正序变化量、工频变化量方向元件有影响,保护安装处位于故障点与 UPFC 接入点之间时,UPFC 注入电压变化造成方向元件灵敏度下降;

(3) UPFC 本体故障时,线路两侧正序变化量、工频变化量方向元件存在同时判为正方向故障的可能;

(4) 建议 UPFC 线路不采用基于正序故障分量的方向元件。

### 参考文献:

[1] 晏鸣宇,何宇斌,文劲宇,等. 考虑柔性交流输电系统设备控制的校正型安全约束最优潮流[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):63-69.  
YAN Mingyu, HE Yubin, WEN Jinyu, et al. Corrective security-constrained optimal power flow with control of flexible AC transmission system devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 63-69.

[2] 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 UPFCs in bulk power systems reliability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 55-60.

[3] 陈刚,李鹏,袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(7):121-127.  
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing western grid and its harmonic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.

[4] 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.

[5] 杨健,宋鹏程,徐政,等. 特高压直流接入背景下的 UPFC 系统级控制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):109-117.  
YANG Jian, SONG Pengcheng, XU Zheng, et al. System-level control strategy for UPFC power grids integrated with UHVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10):

109-117.

[6] 王毅,顾乔根,张晓宇,等. UPFC 串联变压器匝间故障特性分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):98-104.  
WANG Yi, GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, et al. Analysis of inter-turn fault characteristics of UPFC series transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 98-104.

[7] 裘愉涛,陈水耀,杨恢宏,等. 交直流混联系统突变量方向元件适用性研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(13):115-120.  
QIU Yutao, CHEN Shuiyao, YANG Huihong, et al. Research on applicability of directional element based on the power-frequency variation in AC-DC hybrid system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 115-120.

[8] 黄涛,陆于平,蔡超. DFIG 等效序突变量阻抗相角特征对故障分量方向元件的影响分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3929-3939.  
HUANG Tao, LU Yuping, CAI Chao. Analysis of phase angle characteristics of DFIG equivalent sequence superimposed impedances and its impact on fault components based direction relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3929-3939.

[9] 杨启帆,刘益青,朱一鸣,等. 适用于 DFIG 并网线路的改进负序方向元件[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):119-126,149.  
YANG Qifan, LIU Yiqing, ZHU Yiming, et al. Improved negative sequence directional element for transmission line connecting DFIG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 119-126, 149.

[10] MARTIN C R P, POBERTO C L, ARTURO S B. Adaptive ground distance protection for UPFC compensated transmission lines: a formulation considering the fault resistance effect[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 124-131.

[11] 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.  
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.

[12] BHUPENDRA K, ANAMIKA Y. Backup protection scheme for transmission line compensated with UPFC during high impedance faults and dynamic situations[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(6): 703-712.

[13] 瞿峰,邓凯,张赞,等. 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, DENG Kai, ZHANG Yun, et al. 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.

[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] 孔祥平,李鹏,黄浩声,等. 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, LI Peng, HUANG Haosheng, et al. Impact analysis of unified power flow controller on transmission line pilot protection [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2):14-21.
- [16] 张晓宇,顾乔根,文继锋,等. 统一潮流控制器系统串联变压器保护设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17):72-77.
- ZHANF Xiaoyu, GU Qiaogen, WEN Jifeng, et al. Series transformer protection design in unified power flow controller system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17):72-77.
- [17] 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.

作者简介:



黄涛

黄涛(1988),男,博士,工程师,从事电力系统继电保护相关工作(E-mail:huangtao4@nrec.com);

赵青春(1980),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作;

谢华(1983),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作。

## Impact of UPFC on transmission line variation direction elements

HUANG Tao, ZHAO Qingchun, XIE Hua, LI Ben, TAN Hao

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

**Abstract:** Unified power flow controller (UPFC) can realize flexible control of transmission line power flow, and improve system operation mode. However, the access of UPFC changes the uniform distribution of line voltage and brings some problems to relay protection. Based on the fault control and protection logic of UPFC, the transient variation characteristics of UPFC injection voltage are studied firstly. Then, the influence mechanism and degree of injection voltage variation on fault components based directional elements are studied. It is pointed out that when the protection locates between the fault point and the UPFC access point, the sensitivity of the direction element using positive sequence fault component and power frequency fault component can be greatly reduced. When a fault occurs in UPFC, the direction elements may misjudge the fault direction. Based on the practical model and parameters of 500 kV UPFC project in southern Suzhou grid, RTDS simulation model contained UPFC control and protection logic is built. The theoretical analysis conclusions are fully verified by RTDS tests.

**Keywords:** unified power flow controller (UPFC); series transformer; fault components-based direction element; injection voltage; sensitivity

(编辑 吴楠)