

DOI: 10.7667/PSPC171607

## 500 kV UPFC 对工频变化量方向保护的影响分析

李仲青<sup>1</sup>, 曹虹<sup>1</sup>, 张和<sup>2</sup>, 简朝晖<sup>3</sup>

(1. 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; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 3. 中国电建集团贵州工程有限公司, 贵州 贵阳 550007)

**摘要:** 作为灵活交流输电系统(FACTS)的典型应用之一, 统一潮流控制器(UPFC)可对线路的有功和无功潮流进行快速调节。考虑 UPFC 保护系统在交流线路故障后可快速将 UPFC 从系统中隔离, 在 UPFC 安装处形成功率变化量源, 从而对工频变化量方向保护造成影响。以国内某实际 500 kV UPFC 工程为依托, 介绍了 UPFC 的工作原理及其保护系统设计, 依据工频变化量方向保护的動作原理, 以 UPFC 本侧保护为例, 定量分析了正反向故障时的工频变化量阻抗特征。正方向故障时, 工频变化量阻抗仍近似反映为系统阻抗与线路阻抗之和的相反数, 工频变化量保护可靠动作。反方向故障时, 故障后测量电压跌落至 0.917 p.u. 以下是工频变化量方向保护可靠不误动的充分不必要条件, 而电压变化量补偿系数  $\lambda$  的实部小于 -1 是工频变化量方向保护误动的充分必要条件。进一步地, 也提出了相邻线路保护的电压变化量补偿系数  $\lambda$  以及定量分析结果。RTDS 仿真结果验证了理论分析的有效性和准确性。

**关键词:** 统一潮流控制器; 工频变化量方向保护; 定量分析; 测量电压; 电压变化量补偿系数

### Analysis of the impact of 500 kV UPFC on impedance directional protection based on variation

LI Zhongqing<sup>1</sup>, CAO Hong<sup>1</sup>, ZHANG He<sup>2</sup>, JIAN Chaohui<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory for Security and Energy Saving (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China;  
2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;  
3. Power China Guizhou Engineering Co., Ltd., Guiyang 550007, China)

**Abstract:** As the typical representative of FACTS controllers, UPFC rapidly adjusts active and reactive power flow. Protections of UPFC would trip to isolate the UPFC from system quickly when fault occurs in the power grid. It would form power variation source located at the installation of UPFC, which has influence on impedance directional protection based on variation. In this paper, taking a domestic 500 kV UPFC project as the basis, the principle and protection system of UPFC are proposed. The principle of impedance directional protection based on variation is introduced. Quantitative analysis of the characteristics of power-frequency variation impedance calculated by the relay located at the UPFC side of line is carried out. During forward faults, power-frequency variation impedance is approximately equal to the inverse of the sum of system impedance and line impedance, directional protection could operate reliably. During reverse faults, once fault measuring voltage drops below 0.917 p.u., directional protection would not operate reliably; the real part of voltage variation compensation factor  $\lambda$  below -1 is the sufficient and necessary condition of protection malfunction. Furthermore, quantitative analysis results and  $\lambda$  of adjacent line protections are given. RTDS simulation tests verify the validity and accuracy of the theoretical analysis.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900604).

**Key words:** unified power flow controller (UPFC); impedance directional protection based on variation; quantitative analysis; measuring voltage; voltage variation compensation factor

## 0 引言

柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission

System, FACTS)技术可以大幅提升电力系统的灵活性和可靠性, 在电力系统中得到了越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。作为 FACTS 装置中最有发展前景的控制器, 统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)可以独立控制传输线路的阻抗和传输角, 有

选择性地控制线路有功和无功功率，也可以独立提供可控并联无功补偿，进而有选择性地调节 UPFC 接入母线电压<sup>[4-5]</sup>。

UPFC 的多种控制功能虽然给电力系统的运行带来了许多好处，但其接入也给交流系统继电保护带来了新的挑战。由于交流系统故障引发的暂态过程中，UPFC 电力电子器件的非线性及控制保护系统的快速调节，交流系统基于电流、阻抗等电气量的继电保护装置的动作性能将受到影响，进而威胁电力系统的安全稳定运行。因此，随着 UPFC 在高压输电系统中越来越广泛的应用，UPFC 对交流系统继电保护的影响研究显得愈发重要。

目前国内外关于 UPFC 对于交流系统继电保护的影响研究主要集中于距离保护，已有大量文献就 UPFC 接入对于距离保护的影响进行了深入的定量分析。文献[6]提供了一种含 UPFC 的系统仿真与继电保护的数字仿真相结合的研究方法，主要通过仿真计算分析 UPFC 对距离保护的影响。文献[7-8]随着 UPFC 接入位置、运行方式、过渡电阻以及故障位置的不同，对距离保护的動作边界进行在线计算，从而分析 UPFC 对距离保护的影响。文献[9]针对双电源双回线含 UPFC 系统，分析计算了附加距离阻抗。文献[10]定量分析了不同故障情形下 UPFC 的控制参数和运行方式对距离保护的影响。文献[11]则着重定量分析了系统振荡工况下 UPFC 对于距离阻抗继电器动作特性的影响。

但国内外关于 UPFC 对于其他交流保护的影响研究还较少。就工频变化量方向保护而言，UPFC 在感受到交流系统故障引起的过电压或过电流时，为避免电力电子设备的损坏，将快速退出运行，造成潮流分布的再次快速变化，UPFC 安装处也会形成功率变化量源，从而影响工频变化量方向保护的動作性能。文献[12]分析研究了 UPFC 对工频变化量方向保护的影响，但是也仅限于定性分析，没有进行类似于距离保护的深入定量分析研究。

针对此，本文以国内某实际 500 kV UPFC 工程为依托，以 UPFC 本侧保护为例，定量分析了正反向故障时的工频变化量阻抗特征。正向故障时，工频变化量阻抗仍近似反映为系统阻抗与线路阻抗之和的相反数，工频变化量保护可靠动作；反向故障时，故障后测量电压跌落至 0.917 p.u. 以下是工频变化量方向保护可靠不误动的充分不必要条件，而电压变化量补偿系数  $\lambda$  的实部小于 -1 是工频变化量方向保护误动的充分必要条件。进一步地，也给出了相邻线路保护的定量分析结果。RTDS 仿真结果验证了理论分析的有效性和准确性。

## 1 UPFC 工作原理及保护系统设计

### 1.1 工作原理

UPFC 的基本结构示意图如图 1 所示。其主回路由两个共用直流侧电容的电压源换流器组成，串联换流器通过串联变压器串联接入系统，并联换流器通过并联变压器并联接入系统。串联换流器的功能是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  $\dot{U}_{sc}$ ，其幅值和相角由 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自动潮流控制、相角控制以及线路电抗控制等<sup>[13-14]</sup>；并联换流器的功能是通过并联变压器向电网提供无功功率以维持 UPFC 接入母线的电压  $\dot{U}_{sc}$  稳定，同时从电网吸收有功功率，向串联换流器提供有功并补偿电路器件的有功损耗，以避免因直流侧电容电压跌落造成的系统崩溃。

UPFC 装置可以看作是由一台静止同步串联补偿器(SSSC)装置和一台静止同步补偿器(STATCOM)装置并联构成的<sup>[15-17]</sup>。但 UPFC 装置不仅同时具有 STATCOM 和 SSSC 装置的优点，而且可以在四个象限运行，既可以吸收、发出无功功率，又可以吸收、发出有功功率。

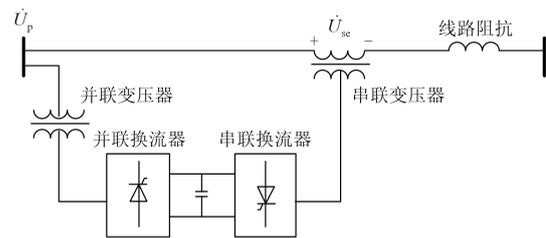


图 1 UPFC 基本结构示意图

Fig. 1 UPFC schematic representation

UPFC 的等值电路如图 2 所示。UPFC 的串联部分等效为可控电压源  $\dot{U}_{sc}$  和等值阻抗  $Z_{sc}$ ，并联部分等效为可控电流源  $i_{sh}$ <sup>[18-19]</sup>。 $Z_{pq}$  为线路 PQ 的等效阻抗。 $\dot{U}_p$  为 UPFC 接入母线电压， $i_p$  为线路电流。

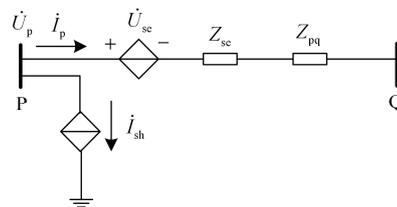


图 2 UPFC 等值电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit of UPFC

## 1.2 保护系统

以 500 kV 实际工程为例, UPFC 接入系统示意图如图 3 所示。UPFC 位于线路首端, 串联变压器串联接于线路 PQ 的首端, 并联变压器并联接于母线 P。晶闸管旁路开关(TBS)接于串联变压器阀侧绕组之间, 用来在紧急工况下快速旁路串联侧换流器, 避免交流系统和阀区故障的相互影响, 提高系统的可靠性。QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub> 为线路 PQ 首末端开关, QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub> 为串联变压器高、低压侧旁路开关, QF<sub>5</sub>、QF<sub>6</sub> 为并联侧进、出线开关。

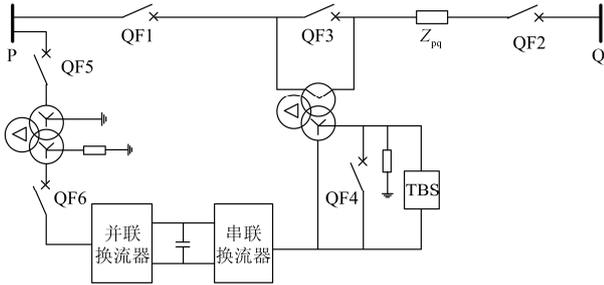


图 3 UPFC 接入系统示意图

Fig. 3 Detailed structure of UPFC

UPFC 保护系统保护 UPFC 本体的安全, 其换流器区按照直流极保护区、换流阀保护区和交流保护区进行分区保护配置。一般来说, 直流极保护区配置有直流欠压过流保护、直流低电压保护、直流过电压保护和直流电压不平衡保护等; 换流阀保护区配置有阀侧过流保护、阀侧过电压保护、阀差动保护、桥臂过流保护等; 交流保护区配置有交流过压保护、交流欠压保护、零序过流保护、短引线差动保护等<sup>[12]</sup>。

当 UPFC 本体故障时, 相应分区保护动作切除故障, 动作结果一般有告警、控制系统切换、闭锁换流器、触发 TBS 导通、QF<sub>3</sub> 合闸、QF<sub>4</sub> 合闸、QF<sub>5</sub> 分闸、QF<sub>6</sub> 分闸等。

当交流线路故障且威胁到 UPFC 本身安全时, UPFC 串联换流器区阀侧、桥臂过流保护动作, 2~3 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; 40 ms 以内 QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub> 闭合, 等效于将整个 UPFC 从系统隔离。而 UPFC 并联换流器区保护不动作, 并联支路仍以 STATCOM 方式运行。

## 2 工频变化量方向保护

工频变化量方向元件利用故障电压、故障电流的工频变化量算得的工频变化量阻抗的相角来判别故障方向。传统双端电源系统的故障附加网络如图

4 所示。 $Z_{sm}$ 、 $Z_{sn}$  分别为两端系统阻抗,  $Z_{mp}$ 、 $Z_{pq}$ 、 $Z_{qn}$  分别为线路 MP、PQ、QN 的等值阻抗,  $\Delta\dot{U}_p$ 、 $\Delta\dot{I}_p$  分别为 P 侧保护安装处测量电压、电流的工频变化量。

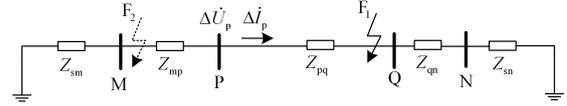


图 4 传统双端电源系统的故障附加网络示意图

Fig. 4 Fault additional network of double-end source system

对于 PQ 线路的 P 侧保护, 其正方向 F<sub>1</sub> 点故障时, 工频变化量阻抗经电压电流的工频变化计算为 m 侧系统阻抗与线路 MP 阻抗之和的相反数, 其表达式如式(1)所示。

$$\Delta Z = \frac{\Delta\dot{U}_p}{\Delta\dot{I}_p} = -(Z_{sm} + Z_{mp}) \quad (1)$$

反方向 F<sub>2</sub> 点故障时, 工频变化量阻抗为 n 侧系统阻抗与线路 PN 阻抗之和, 其表达式如式(2)所示。

$$\Delta Z = \frac{\Delta\dot{U}_p}{\Delta\dot{I}_p} = (Z_{pq} + Z_{qn} + Z_{sn}) \quad (2)$$

工频变化量阻抗值不受过渡电阻、负荷电流以及系统振荡的影响<sup>[20-21]</sup>, 也不受测量电压跌落程度的影响。

假设系统阻抗与线路阻抗的阻抗角相等且均为  $\varphi_z$ , 那么正方向时工频变化量阻抗相角为  $\varphi_z + 180^\circ$ , 反方向故障时相角为  $\varphi_z$ 。考虑一定的裕度, 得到正、反方向故障判据分别如式(3)以及式(4)所示。

$$\varphi_{sen} + 90^\circ < \arg \frac{\Delta\dot{U}_p}{\Delta\dot{I}_p} < \varphi_{sen} + 270^\circ \quad (3)$$

$$\varphi_{sen} - 90^\circ < \arg \frac{\Delta\dot{U}_p}{\Delta\dot{I}_p} < \varphi_{sen} + 90^\circ \quad (4)$$

式中,  $\varphi_{sen}$  为最大灵敏角,  $\varphi_{sen} = \varphi_z$  时, 正、反方向元件处于最灵敏状态, 可靠性最高。上述正反方向故障判据可用图 5 所示动作特性表示, 其中左下方阴影部分表示正方向故障范围, 右上方无阴影部分表示反方向故障范围。

## 3 UPFC 对工频变化量方向保护的影响分析

交流系统发生故障时, UPFC 保护动作, TBS 在 2~3 ms 内触发导通, 旁路串联换流器的等效串联电压源, 引起交流系统的电压电流量再次快速变化, 影响工频变化量方向保护的正确动作, 下面以 UPFC 本侧保护为例对影响进行定量分析。

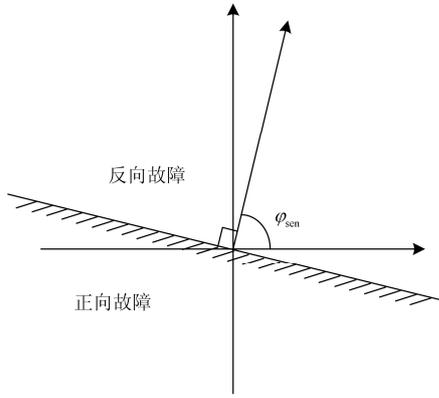


图 5 工频变化量方向保护动作特性

Fig. 5 Operation characteristics of impedance directional protection based on variation

传统电网的故障附加网络如图 4 所示，该网络中各元件阻抗角基本相等，工频变化量方向元件方向性明确。但是 UPFC 包含非线性的电力电子装置，故障附加网络中 UPFC 串并联支路阻抗的具体形式尚不明确，不能直接得到工频变化量阻抗<sup>[22]</sup>。故按照传统工频变化量的提取算法，保护安装处提取的工频变化量阻抗可计算如式(5)所示。

$$\Delta Z = \frac{\dot{U}'_p - \dot{U}_p}{\dot{I}'_p - \dot{I}_p} = \frac{\Delta \dot{U}_p}{\Delta \dot{I}_p} \quad (5)$$

式中， $\dot{U}_p$ 、 $\dot{U}'_p$  和  $\dot{I}_p$ 、 $\dot{I}'_p$  分别为故障发生前后保护安装处测量电压、电流相量。接入 UPFC 后的双端电源系统等值电路如图 6 所示。 $\dot{E}_m$ 、 $\dot{E}_n$  为两端系统电势。其他各量含义与图 2 及图 4 相同。

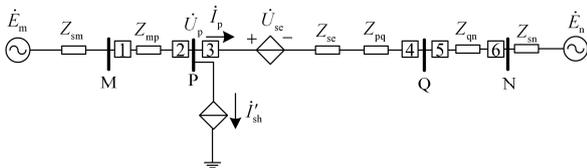


图 6 含 UPFC 双端电源系统等值电路

Fig. 6 Equivalent circuit of double-end source system with UPFC

### 3.1 正方向故障

假设故障点位于线路 PQ 的末端，即对于 UPFC 本侧保护 3，其正方向发生故障时，故障后的系统等值电路如图 7 所示。 $\dot{I}'_{sh}$  为故障后 UPFC 并联支路电流， $\dot{U}'_{sc}$  为故障后 UPFC 等效串联电压源电压， $R_f$  为故障过渡电阻。其他各量含义与图 2 及图 4 相同。

正常运行状态下，由图 6，依据基尔霍夫定律，可得：

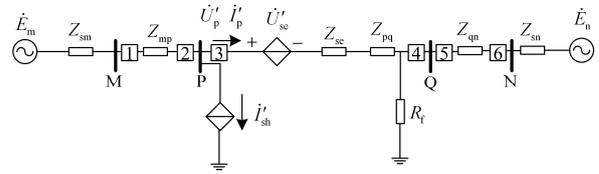


图 7 正方向故障时接入 UPFC 的双端电源系统等值电路

Fig. 7 Equivalent forward fault circuit of double-end source system with UPFC

$$\dot{E}_m - \dot{U}_p = (\dot{I}_p + \dot{I}'_{sh})(Z_{sm} + Z_{mp}) \quad (6)$$

正方向故障时，由图 7，有式(7)成立。

$$\dot{E}'_m - \dot{U}'_p = (\dot{I}'_p + \dot{I}'_{sh})(Z_{sm} + Z_{mp}) \quad (7)$$

式(7)减式(6)，由电压、电流工频变化量的定义可得

$$\Delta \dot{U}_p = -(Z_{sm} + Z_{mp})(\Delta \dot{I}_p + \Delta \dot{I}'_{sh}) \quad (8)$$

式中， $\Delta \dot{I}'_{sh} = \dot{i}'_{sh} - \dot{i}_{sh}$ 。

故 UPFC 本侧看入的工频变化量阻抗如式(9)所示。

$$\Delta Z = \frac{\Delta \dot{U}_p}{\Delta \dot{I}_p} = -(Z_{sm} + Z_{mp})(1 + \frac{\Delta \dot{I}'_{sh}}{\Delta \dot{I}_p}) \quad (9)$$

令  $\eta = 1 + \frac{\Delta \dot{I}'_{sh}}{\Delta \dot{I}_p}$ ，则有

$$\Delta Z = -(Z_{sm} + Z_{mp}) \times \eta \quad (10)$$

由实际工程参数可知，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，且并联换流器在故障发生后仍以 STATCOM 方式运行，不提供短路电流，因此故障电流变化量幅值  $|\Delta \dot{I}_p|$  远大于并联支路电流变化量幅值  $|\Delta \dot{I}'_{sh}|$ 。继而有  $\eta \approx 1$  成立，即工频变化量阻抗仍近似反映为 m 侧系统阻抗与线路 MP 阻抗之和的相反数。工频变化量阻抗相角近似为  $\varphi_z + 180^\circ$ 。由正方向故障判据(3)可得，工频变化量方向保护可靠动作，灵敏度高。

### 3.2 反方向故障

假设故障点位于线路 MP 的 M 侧母线处，即对于 UPFC 本侧保护 3，其反方向发生故障时，故障后的系统等值电路如图 8 所示。其中， $\dot{U}_p''$  为保护安装处故障电压， $\dot{I}_p''$  为保护安装处故障电流， $\dot{i}_{sh}''$  为 UPFC 并联支路电流， $\dot{U}_{sc}''$  为故障后 UPFC 等效串联电压源电压。其他各量含义与图 2 及图 4 相同。

正常运行状态下，由图 6，依据基尔霍夫定律，可得

$$\dot{U}_p = \dot{E}_n + \dot{U}_{sc} + \dot{I}_p Z_\Sigma \quad (11)$$

式中， $Z_\Sigma = Z_{sc} + Z_{pq} + Z_{qn} + Z_{sn}$ 。

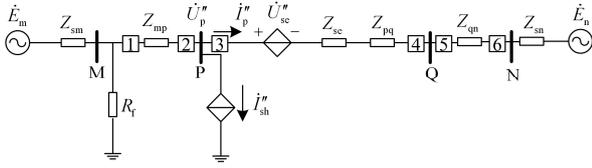


图 8 反方向故障时接入 UPFC 的双端电源系统等值电路  
Fig. 8 Equivalent reverse fault circuit of double-end source system with UPFC

当反方向故障时, 由图 8, 有式(12)成立。

$$\dot{U}_p'' = \dot{E}_n + \dot{U}_{se}'' + \dot{I}_p'' Z_\Sigma \quad (12)$$

考虑交流侧线路故障引起 UPFC 保护动作, TBS 在 2~3 ms 内动作, 从而串联换流器的输出电压为 0, 即  $\dot{U}_{se}'' = 0$ 。式(12)减式(11), 由电压、电流工频变化量的定义可得

$$\Delta \dot{U}_p' = -\dot{U}_{se} + \Delta \dot{I}_p' Z_\Sigma \quad (13)$$

故 UPFC 本侧看入的工频变化量阻抗如式(14)所示。

$$\Delta Z' = \frac{\Delta \dot{U}_p'}{\Delta \dot{I}_p'} = \frac{\Delta \dot{U}_p'}{\Delta \dot{U}_p' + \dot{U}_{se}} Z_\Sigma \quad (14)$$

令  $\dot{U}_{se} = \dot{U}_p \gamma e^{j\theta}$ ,  $\Delta \dot{U}_p' = \dot{U}_p h e^{j\delta}$ , 将 UPFC 串联电压源电压与保护安装处测量电压变化量的比值设为电压变化量补偿系数  $\lambda$ , 有式(15)成立。

$$\lambda = \frac{\dot{U}_{se}}{\Delta \dot{U}_p'} = \frac{\gamma}{h} e^{j(\theta-\delta)} = \frac{\gamma}{h} e^{j\phi} \quad (15)$$

故式(14)可表示如式(16)所示。

$$\Delta Z' = \frac{1}{1 + \lambda} Z_\Sigma \quad (16)$$

据欧拉公式, 有式(17)成立。

$$\mu = 1 + \lambda = 1 + \frac{\gamma}{h} \cos \phi + j \frac{\gamma}{h} \sin \phi \quad (17)$$

假定线路阻抗与串联变压器阻抗  $Z_{sc}$  的阻抗角相等且均为  $\varphi_z$ , 那么有式(18)成立。

$$\varphi' = 0 - \varphi_\mu + \varphi_z \quad (18)$$

式中:  $\varphi'$  为工频变化量阻抗  $\Delta Z'$  的相角;  $\varphi_\mu$  为  $\mu$  的相角。

由反方向故障判据(4)可知, 当  $|\varphi_\mu| < 90^\circ$  时, 保护可靠不动作, 当  $|\varphi_\mu| > 90^\circ$  时, 保护误动。故工频变化量方向保护不误动的充分必要条件为  $|\varphi_\mu| < 90^\circ$  成立, 即  $\mu$  的实部大于零。由式(17)推得式(19)。

$$\frac{\gamma}{h} \cos \phi > -1 \quad (19)$$

即反方向故障时, 保护 3 不误动的充分必要条件为  $\text{Re}(\lambda) > -1$  成立。

进一步地, 当  $h > \gamma$  时, 不论  $\phi$  取任意值, 式(19)恒成立, 保护不会误动。即保护安装处测量电压跌落幅值大于 UPFC 串联电压源幅值是保护可靠不误动的充分条件。保护安装处测量电压为 UPFC 接入母线电压, 其额定值为 525 kV。而 UPFC 串联电压源幅值代表了 UPFC 对交流系统的调节电压的大小, 由 UPFC 运行方式来决定, 由实际 500 kV 工程参数可知, UPFC 串联电压源幅值最大为串联变压器网侧绕组额定电压 43.5 kV。设置测量电压跌落幅值的百分比为  $\varepsilon$ , 则  $525\varepsilon > 43.5$  是  $h > \gamma$  的充分条件, 那么  $525\varepsilon > 43.5$  也是保护可靠不误动的充分条件。即  $\varepsilon > 8.3\%$  或  $1 - \varepsilon < 91.7\%$  时, 任意 UPFC 运行方式下,  $h$  一定大于  $\gamma$ , 保护可靠不误动。故任意 UPFC 运行方式下, 故障后 UPFC 接入母线电压跌落至 0.917 p.u. 以下是工频变化量方向保护可靠不误动的充分条件。

当  $h < \gamma$ , 即保护安装处测量电压跌落幅值小于 UPFC 串联电压源幅值, 且两者的相角差  $\phi$  满足电压变化量补偿系数的实部小于 -1 时, 保护误动。

对于 UPFC 相邻线路的工频变化量方向保护, 其分析过程与保护 3 类似, 不再赘述, 同理可得如下结论。注意  $\lambda$  分别为 UPFC 串联电压源电压与各保护安装处的测量电压变化量的比值。

1) 对于保护 1, 正方向故障时, 保护可靠动作; 反方向故障时, 保护误动的充分必要条件为  $\text{Re}(\lambda) < -1$ 。

2) 对于保护 2, 正方向故障时, 保护拒动的充分必要条件为  $\text{Re}(\lambda) < -1$ ; 反方向故障时, 保护可靠不动作。

3) 对于保护 4, 正方向故障时, 保护可靠动作; 反方向故障时, 保护误动的充分必要条件为  $\text{Re}(\lambda) > 1$ 。

4) 对于保护 5, 正方向故障时, 保护拒动的充分必要条件为  $\text{Re}(\lambda) > 1$ ; 反方向故障时, 保护可靠不动作。

5) 对于保护 6, 正方向故障时, 保护可靠动作; 反方向故障时, 保护误动的充分必要条件为  $\text{Re}(\lambda) > 1$ 。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真模型

参照国内 500 kV UPFC 工程技术参数, 在 RTDS 小步长(ns 级)模块中, 搭建如图 6 所示的含 UPFC 双端电源系统实时仿真模型。UPFC 采用 MMC 换流器, 并联、串联换流器容量为 250 MVA,

并联变压器变比为 505/94/35 kV, 容量为 300 MVA, 接线型式为 YnYD 接法, 串联变压器变比为 43.5/105/10 kV, 容量为 300/300/100 MVA, 接线型式为 IIIYD 接法。送、受端系统等值电势分别为 525 kV、500 kV, 等值阻抗角均为 85°。线路 MP、PQ、QN 参数相同,  $r_1=0.0196 \Omega/\text{km}$ ,  $x_1=0.28 \Omega/\text{km}$ ,  $b_1=4.24 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ ,  $r_0=0.1828 \Omega/\text{km}$ ,  $x_0=0.86 \Omega/\text{km}$ ,  $b_0=2.89 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。线路 MP、QN 长度为 100 km, 线路 PQ 长度为 40 km。

由仿真参数, 系统阻抗以及线路阻抗相角  $\varphi_z$  为 85°, 那么正、反方向故障判据分别如式(20)以及式(21)所示。

$$-185^\circ < \arg \frac{\Delta \dot{U}_p}{\Delta \dot{I}_p} < -5^\circ \quad (20)$$

$$-5^\circ < \arg \frac{\Delta \dot{U}_p}{\Delta \dot{I}_p} < 175^\circ \quad (21)$$

由于篇幅限制, 仅列出保护 3 的仿真结果, UPFC 相邻线路保护的仿真结果类似, 不再赘述。

#### 4.2 正方向故障

模拟保护 3 的正方向故障, 在线路 PQ 末端设置不同类型、不同过渡电阻故障。UPFC 并联支路电流变化量、串联支路电流变化量以及工频变化量阻抗相角如表 1 所示。

表 1 PQ 末端故障时的仿真结果

Table 1 Simulation results when fault occurs at the end of PQ

故障类型	UPFC 并联支路 电流变化量/kA	串联支路电流 变化量/kA	工频变化量 阻抗相角
CG(0 Ω)	0.3	7.8	-96°
CG(100 Ω)	0.04	0.98	-100°
CG(300 Ω)	0.01	0.1	-95°
ABG(0 Ω)	0.4	12.5	-94°
ABG(100 Ω)	0.04	0.7	-95°
AB(0 Ω)	0.45	12.4	-95°
AB(25 Ω)	0.32	7.5	-96°
ABC(0 Ω)	0.25	7.2	-92°
ABC(100 Ω)	0.66	0.8	-94°

由表 1 数据可知, 在保护正方向发生各类型经不同过渡电阻故障时, 串联支路电流变化量幅值远大于并联支路电流变化量幅值, 工频变化量阻抗的相角均位于 -92°~ -100° 之间, 满足正方向动作判据(19), UPFC 本侧保护可靠动作。

#### 4.3 反方向故障

##### 1) 不同电压跌落程度

正常运行时, UPFC 限制潮流在 696 MW, UPFC 串联注入电压为 29.2 ∠ -53° kV(以保护安装处测量电压相角为 0°)。

模拟保护 3 的反方向故障, 设置不同电压跌落程度的故障, 即在线路 MP 首端分别设置经 0 Ω、10 Ω、50 Ω 过渡电阻的 AB 两相接地故障, TBS 在故障后 2 ms 导通。则三种情况下保护安装处测量电压跌落百分比、电压变化量补偿系数幅值、电压变化量补偿系数实部以及工频变化量阻抗相角分别如图 9—图 12 所示。

经 0 Ω、10 Ω 过渡电阻接地故障发生时, 电压跌落百分比均大于 8.3%, 即保护安装处测量电压跌落至 91.7% 以下; 电压变化量补偿系数幅值均小于 1, 即  $h > \gamma$ ; 电压变化量补偿系数实部  $\text{Re}(\lambda) > -1$ ; 工频变化量阻抗相角均满足反方向判据(21), 工频变化量方向保护可靠不动作。经 50 Ω 过渡电阻接地故

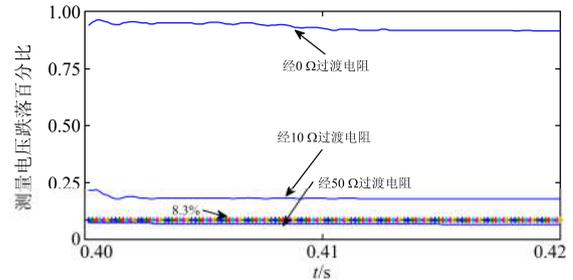


图 9 各故障情况下测量电压跌落百分比

Fig. 9 Degree of relay voltage drop under different fault conditions

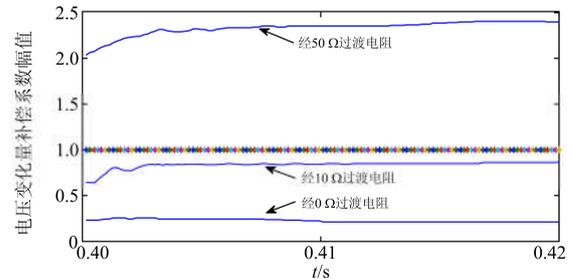


图 10 各故障情况下电压变化量补偿系数幅值

Fig. 10 Magnitude of voltage variation compensation factor under different fault conditions

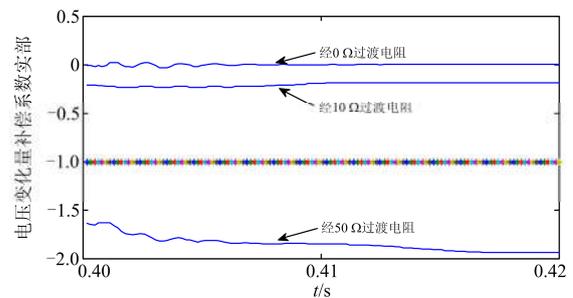


图 11 各故障情况下电压变化量补偿系数实部

Fig. 11 Real part of voltage variation compensation factor under different fault conditions

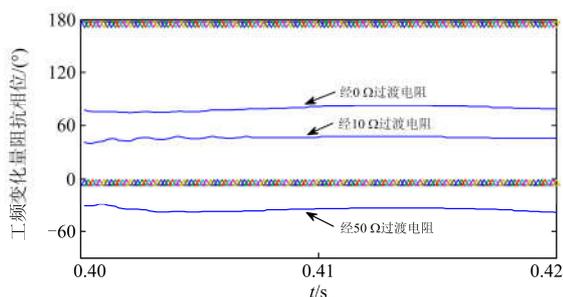


图 12 各故障情况下工频变化量阻抗相角

Fig. 12 Angle of power-frequency variation impedance under different fault conditions

障发生时, 电压跌落百分比小于 8.3%, 即测量电压跌落至 91.7%以上; 电压变化量补偿系数幅值大于 1, 即  $h < \gamma$ ; 电压变化量补偿系数实部  $\text{Re}(\lambda) < -1$ ; 工频变化量阻抗相角不满足反方向判据(21), 工频变化量方向保护误动。

## 2) 不同 UPFC 运行方式

在线路 MP 首端设置经 50  $\Omega$  过渡电阻的 AB 两相接地故障, TBS 在故障后 2 ms 导通。

正常运行时, 设置 UPFC 串联注入电压分别为  $29.2 \angle -53^\circ$  kV,  $13.2 \angle -1^\circ$  kV, 分别标记为方式一以及方式二。那么保护安装处测量电压跌落百分比、电压变化量补偿系数的幅值和实部以及工频变化量阻抗相角如图 13—图 16 所示。

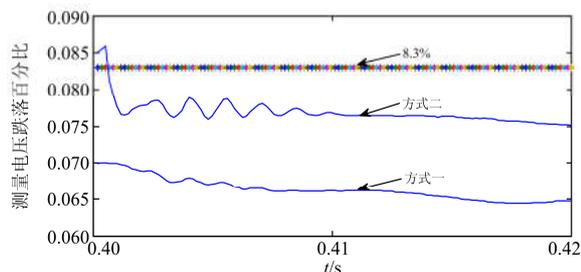


图 13 各 UPFC 运行方式下测量电压跌落百分比

Fig. 13 Degree of relay voltage drop under different UPFC operational modes

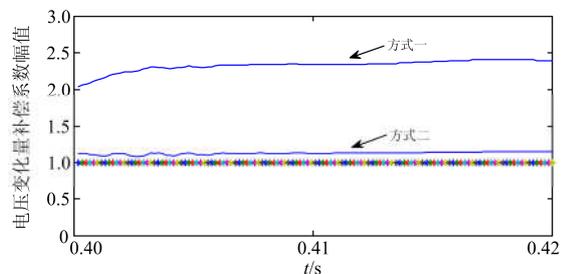


图 14 各 UPFC 运行方式下电压变化量补偿系数幅值

Fig. 14 Magnitude of voltage variation compensation factor under different UPFC operational modes

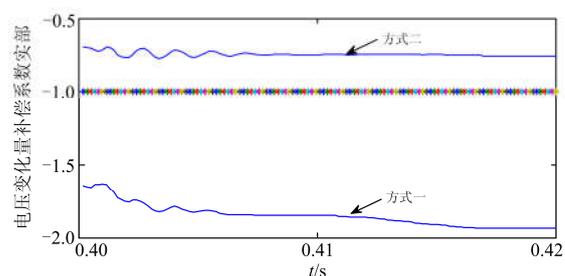


图 15 各 UPFC 运行方式下电压变化量补偿系数实部

Fig. 15 Real part of voltage variation compensation factor under different UPFC operational modes

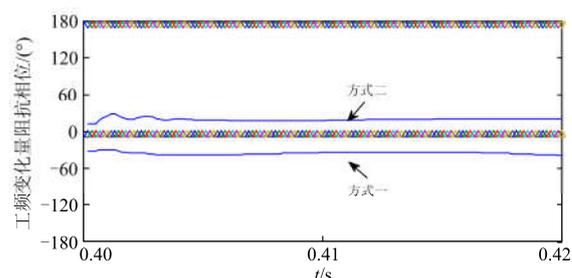


图 16 各 UPFC 运行方式下工频变化量阻抗相角

Fig. 16 Angle of power-frequency variation impedance under different UPFC operational modes

两种方式下, 电压跌落百分比均小于 8.3%, 即测量电压跌落至 91.7%以上; 电压变化量补偿系数幅值大于 1, 即  $h < \gamma$ 。但方式一下, 电压变化量补偿系数实部  $\text{Re}(\lambda) < -1$ , 工频变化量阻抗相角不满足反方向判据(21), 工频变化量方向保护误动; 方式二下,  $\text{Re}(\lambda) > -1$ , 工频变化量阻抗相角满足反方向判据(21), 工频变化量方向保护不动作。

由以上仿真结果可知, 反方向故障且 UPFC 保护动作时, 在不同的故障程度以及 UPFC 运行方式下, 有如下结论:

1) 故障后测量电压跌落至 0.917 p.u. 以下是工频变化量方向保护不误动的充分不必要条件。

2) 电压变化量补偿系数的实部小于 -1 是工频变化量方向保护误动的充分必要条件。

## 5 结论

本文以国内某实际 500 kV UPFC 工程为依托, 定量分析了 500 kV UPFC 接入对工频变化量方向保护的影响。对于 UPFC 本侧工频变化量方向保护, 经理论分析以及 RTDS 仿真验证, 正方向故障时保护可靠动作, 反方向故障且 UPFC 保护系统动作时, 有以下结论:

1) 保护安装处测量电压跌落至 0.917 p.u. 以下

是保护不误动的充分不必要条件。即在严重故障(电压跌落至 0.917 p.u.以下)时, 保护可靠不误动; 只有在轻微故障(电压跌落至 0.917 p.u.以上)时, 保护才可能误动。

2) 电压变化量补偿系数 $\lambda$ 的实部小于-1 是保护误动的充分必要条件。即在轻微故障时, 可依据电压变化量补偿系数来评判保护是否误动。

本文给出了 UPFC 本线路以及相邻线路保护的电压变化量补偿系数 $\lambda$ , 为定量评估工频变化量方向保护的動作行为提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] 何瑞文, 蔡泽祥. 基于电力系统稳定分析与控制的 FACTS 技术评述[J]. 继电器, 2004, 32(6): 70-75.  
HE Ruiwen, CAI Zexiang. A comment on FACTS based on power system stability analysis and control[J]. Relay, 2004, 32(6): 70-75.
- [2] GIBBARD M J, VOWLES D J, POURBEIK P. Interactions between, and effectiveness of, power system stabilizers and FACTS device stabilizers in multimachine systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 748-755.
- [3] 高磊, 刘玉田, 汤涌, 等. 基于多 FACTS 的网侧协调阻尼控制机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4913-4922.  
GAO Lei, LIU Yutian, TANG Yong, et al. Research on coordinated control and interaction mechanism among multiple FACTS damping controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4913-4922.
- [4] 刘青, 马朋, 邹家平. UPFC 无功潮流控制引起负交互影响的解决方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 76-81.  
LIU Qing, MA Peng, ZOU Jiaping. Solution to negative interaction caused by reactive power flow controlling of UPFC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 76-81.
- [5] 章勇高, 康勇, 刘黎明, 等. 统一潮流控制器并联变换器的改进型双环控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 40-46.  
ZHANG Yonggao, KANG Yong, LIU Liming, et al. Improved double close-loop control system for shunt inverter of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 40-46.
- [6] 陈超英, 陈涌, 陈礼仪, 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.
- [7] DASH P K, PRADHAN A K, PANDA G, et al. Adaptive relay setting for flexible AC transmission systems (FACTS)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 8-43.
- [8] DASH P K, PRADHAN A K, PANDA G, et al. Digital protection of power transmission lines in the presence of series connected FACTS devices[C] // Power Engineering Society Winter Meeting, January 23-27, 2000, Singapore, Singapore: 1967-1972.
- [9] SHATERI H, JAMALI S. Distance relay over-reaching due to UPFC presence on second circuit of a double circuit line[C] // 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, April 2-4, 2008, York, United Kingdom: 783-788.
- [10] 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.
- [11] MORAVEJ Z, PAZOKI M, KHEDERZADEH M. Impact of UPFC on power swing characteristic and distance relay behavior[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 261-268.
- [12] 孔祥平, 李鹏. 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. Impact analysis of unified power flow controller on transmission line pilot protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 14-21.
- [13] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于 RTDS 仿真的 MMC\_UPFC 串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 56-62.  
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC\_UPFC indirect current control strategy based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-62.
- [14] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. UPFC 的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 42-48.  
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Cross-coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 42-48.
- [15] 祝高乐, 刘青. 含 STATCOM 输电线路的故障选相方法[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3535-3540.  
ZHU Gaole, LIU Qing. Faulty phase selection of transmission line with STATCOM[J]. Power System

- Technology, 2014, 38(12): 3535-3540.
- [16] 刘青, 常彦彦. SSSC 串补线路双端暂态保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 82-87.  
LIU Qing, CHANG Yanyan. 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.
- [17] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. SSSC 建模、控制策略及性能[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 37-43.  
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Static synchronous series compensator modelling, control scheme and performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 37-43.
- [18] 顾伟, 黄河, 蒋平. 用于三相电力系统潮流计算的 UPFC 稳态模型[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 71-73.  
GU Wei, HUANG He, JIANG Ping. Research on the model of UPFC for three phase power flow calculation[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 71-73.
- [19] 尹璐, 舒彬, 张璞. 统一潮流控制器在电力系统中的 PSD-BPA 和 MATLAB 联合建模与仿真方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 383-388.  
YIN Lu, SHU Bin, ZHANG Pu. A PSD-BPA and MATLAB joint modelling and simulation method with UPFC for power system flow calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 383-388.
- [20] 徐岩, 刘泽锴, 应璐曼. 混合 MIDC 馈入下的工频变化量阻抗方向保护动作特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 14-20.  
XU Yan, LIU Zekai, YING Luman. Performance of impedance directional protection based on variation of power-frequency components in hybrid multi-infeed HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(5): 14-20.
- [21] 吴千, 王星洁, 夏传帮, 等. 系统合环中工频变化量方向保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 113-116.  
WU Qian, WANG Xingjie, XIA Chuanbang, et al. Analysis about a misoperation of directional protection for power-frequency variable in connection of power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 113-116.
- [22] 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.

收稿日期: 2017-10-31; 修回日期: 2018-02-08

作者简介:

李仲青(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制等; E-mail: lzqing@epri.sgcc.com.cn

曹虹(1990—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统保护与控制等; E-mail: caohong@epri.sgcc.com.cn

张和(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高压直流输电控制保护等。

(编辑 葛艳娜)