

DOI: 10.7667/PSPC160055

统一潮流控制器对线路纵联保护的影响分析

孔祥平, 李鹏, 黄浩声, 高磊, 袁宇波

(国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 外部交流系统故障时, 统一潮流控制器的保护可能动作于使统一潮流控制器退出运行。这将引起交流系统中电气量的再一次快速变化, 与交流故障造成的扰动形成“电气竞争”, 可能给线路纵联保护带来不利的影响。对南京西环网统一潮流控制器示范工程进行了介绍。并在分析统一潮流控制器保护系统设计原则的基础上, 通过理论分析和数字仿真研究了统一潮流控制器对纵联零序保护、纵联距离保护和工频变化量方向保护的影响。研究表明统一潮流控制器的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, 有必要对相关线路的保护进行改造。

关键词: 统一潮流控制器; 纵联零序保护; 纵联距离保护; 工频变化量方向保护; 影响分析

Impact analysis of unified power flow controller on transmission line pilot protection

KONG Xiangping, LI Peng, HUANG Haosheng, GAO Lei, YUAN Yubo

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: When the AC fault occurs in the power grid, the protection of unified power flow controller (UPFC) would trip to make the UPFC out of operation. It would cause the electrical quantities in the power grid change suddenly once again. Subsequently, the competition between the disturbance caused by AC fault and that caused by the trip of UPFC protection would have adverse influence on the transmission line pilot protection. The demonstrative project of UPFC in the western Nanjing grid is introduced. Moreover, based on the discussion about the UPFC protection system, the impacts of UPFC on the performances of pilot zero-sequence protection, pilot distance protection and superimposed component direction protection are studied with theoretical analysis and simulation study. It points out that the mal-operation or fail-to-trip of the superimposed component direction protection would occur due to the impact of UPFC, and it is necessary to improve the relevant protection schemes.

Key words: unified power flow controller (UPFC); pilot zero-sequence protection; pilot distance protection; superimposed component direction protection; impact analysis

0 引言

统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)由串联换流器和并联换流器等两个电压源型换流器组成, 且串、并联换流器的直流侧通过公共直流母线构成背靠背接线方式。一方面, 串联换流器通过变压器串联接入电网, 并可控制注入的串联电压的幅值和相位以调节线路潮流; 另一方面, 并联换流器则通过变压器或连接电抗并联接入系统, 并通过与交流系统交换有功、无功以维持直流电压

恒定和实现无功调节^[1]。因此, UPFC能够同时实现对多个电气量的控制, 在众多柔性交流输电设备(如静止同步串联补偿器^[2]、静止同步补偿器^[3-5]等)家族中具有更强的灵活性和更广泛的应用前景。美国电力公司与美国电力研究院、西屋公司合作, 研制了世界首套UPFC装置(额定电压138 kV、额定容量320 MVA), 安装在东肯塔基州的Inez变电站, 于1998年6月投运, 大幅提高了电网输送能力和电压稳定性^[6-7]。2003年, 韩国电力公司和韩国电科院在朝鲜半岛南半部的Kangjin变电站安装了一台UPFC(额定电压154 kV、额定容量40 MVA)^[8-9]。纽约电力公司和美国电科院、西门子公司合作, 研制了世界上第一套可转换静止补偿器(Convertible Static

基金项目: 国家电网公司南京西环网 220 kV 统一潮流控制器(UPFC)重大科技示范工程

Compensator, CSC), 安装在纽约州Marcy变电站, 于2004年6月投运, 以解决电力输送瓶颈问题, 促进电力经济调度的实现。该套CSC装置额定电压为345 kV, 额定容量为200 MVA, 兼具UPFC、静止同步串联补偿器和线间潮流控制器等多种功能^[10-11]。2015年12月, 南京西环网220 kV统一潮流控制器(UPFC)示范工程成功投运。

众所周知, UPFC是基于全控型电力电子器件(如绝缘栅双极型晶体管、门极可关断晶闸管等)的, 过载能力十分有限。因此, 为了避免串、并联换流器等设备的损坏, UPFC在感受到电网故障引起的过电流或过电压时将快速退出运行^[12], 从而造成交流系统中电气量再一次快速变化。这不仅将对交流系统带来巨大冲击, 同时也将对基于纯交流系统运行工况和时序配合关系的传统继电保护提出挑战。

目前, 基于UPFC接入改变了线路阻抗均匀分布特性的观点, 国内外学者针对UPFC对基于单端电气量信息的距离保护的影响进行了广泛的研究^[13-16]。但是, 尚未有文献分析UPFC接入对基于线路双端电气量信息的纵联保护的影响。针对此, 本文在分析UPFC保护系统设计原则的基础上, 开展了UPFC对线路纵联保护的影响研究, 并利用PSCAD/EMTDC搭建了含UPFC接入的区域电网仿真模型, 对理论分析结果进行了验证。

1 UPFC 工程及原理

1.1 南京西环网 UPFC 工程

南京西环网网架结构如图1所示。

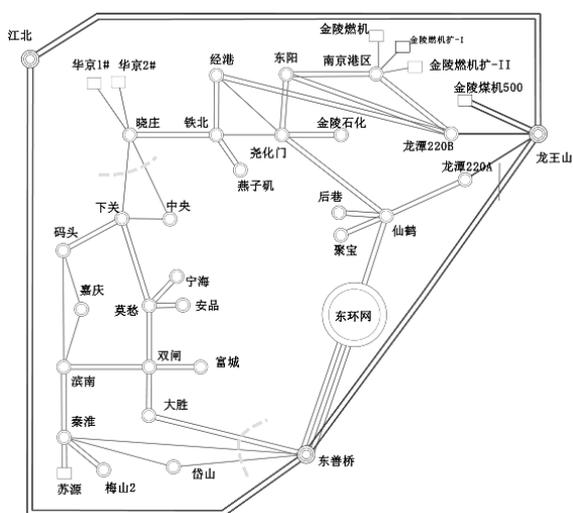


图1 南京西环网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the western Nanjing grid

南京西环网是南京城网的主要负荷中心。目

前, 该区域主要由500 kV东善桥变电站、龙王山变电站从南北两端共同供电。由于南京主城环网的电网结构及电源、负荷分布特点, 至2016年, 上述西环网供电的主要输电通道存在较严重的潮流分布不均情况。其中, 500 kV龙王山变电站向西环网供电的220 kV输电通道潮流偏重, 尤其是西环网内220 kV晓庄南送下关、中央断面潮流过重情况尤为突出, 存在N-1过负荷的情况; 500 kV东善桥变电站向西环网供电的220 kV输电通道潮流较轻, 从而影响了南京电网向西环网的整体供电能力和安全可靠水平^[17]。

由于南京西环网地处南京中心城区, 无论是新建输电通道还是对现有通道实施增容改造, 均存在投资巨大、实施难度大等问题; 故为解决南京西环网近期和远景年存在的输电“瓶颈”问题, 线路增容、新建输电通道等输电网加强方案的可行性和经济性均不高。UPFC装置可双向快速地动态调节系统潮流, 对西环网近期及远景年的适应性均较好; 同时, UPFC装置安装在变电站内, 无需对途经南京中心城区的输电通道施工, 工程可实施性综合较优; 因此, 为提高南京江南城区西环网供电可靠性、加强220 kV网架, 建设UPFC工程是十分必要的。

南京西环网UPFC工程具体安装方案为: 在220 kV铁北-晓庄双回线的铁北开关站侧各加装一套UPFC装置, 即每条线路各串入一台UPFC换流器, UPFC安装位置和方式如图2所示^[18]。

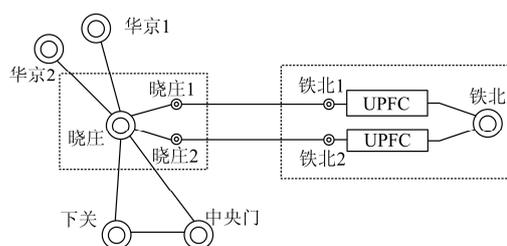


图2 UPFC 的安装方案

Fig. 2 Installation of UPFC

工程新建UPFC和相关线路, 换流器容量为 3×60 MVA, 站址在铁北220 kV开关站, 其中串联换流器2组, 容量为 2×60 MVA, 并联换流器1组, 容量为60 MVA^[19]。

1.2 UPFC 的调节作用

UPFC结构原理图如图3所示, 其中, T_1 、 T_2 分别代表并联变压器和串联变压器, \dot{U}_1 为并联变压器接入的交流母线电压, \dot{U}_2 为串联变压器接入点的线路侧交流电压。

如图3所示, UPFC装置可以看作是一台静止

同步补偿器装置与一台静止同步串联补偿器在直流侧并联构成的。因此，UPFC 装置实际上是一种串并联混合型的柔性交流输电系统装置，集并联补偿、串联补偿、移相等多种功能于一身。此外，UPFC 的串、并联换流器既可以独立运行，也可以联合运行，为多种功能的组合与切换提供了可能性。

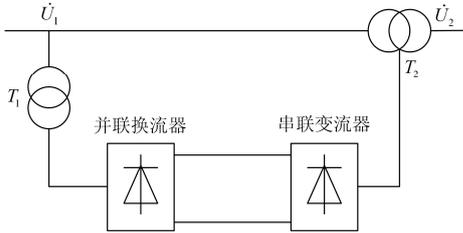


图 3 UPFC 的结构原理图

Fig. 3 Schematic diagram of UPFC

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，得到 UPFC 的等值电路如图 4 所示。

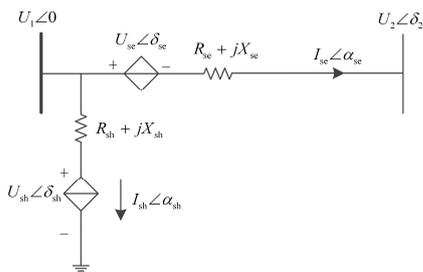


图 4 UPFC 等值电路

Fig. 4 Equivalent circuit of UPFC

在图 4 中，以并联变压器接入的交流母线电压 $\dot{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$ 为相位参考点，并联换流器吸收的电流为 $\dot{I}_{sh} = I_{sh} \angle \alpha_{sh}$ ，相应的输出电压为 $\dot{U}_{sh} = U_{sh} \angle \delta_{sh}$ ；串联换流器的输出电压为 $\dot{U}_{se} = U_{se} \angle \delta_{se}$ ，线路上流过的电流为 $\dot{I}_{se} = I_{se} \angle \alpha_{se}$ ，串联变压器接入点的线路侧交流电压 $\dot{U}_2 = U_2 \angle \delta_2$ 。 X_{sh} 、 X_{se} 分别为并联变压器 T_1 和串联变压器 T_2 的等值电抗， R_{sh} 为并联换流器损耗和并联变压器损耗的等效电阻， R_{se} 为串联换流器损耗和串联变压器损耗的等效电阻。

UPFC 等值电路的电压、电流向量如图 5 所示。

从图 5 中可以看出，通过改变串联换流器输出电压 \dot{U}_{se} 的大小和相位，可以改变串联变压器接入点的线路侧交流电压 \dot{U}_2 的大小和相位，从而实现线路潮流的调节。另一方面，通过改变并联换流器吸收的电流 \dot{I}_{sh} 的大小和相位，可以改变并联换流器与

系统交换的有功功率和无功功率，从而维持直流母线电压恒定，并实现对交流母线电压的控制。

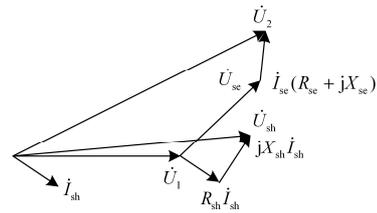


图 5 UPFC 的等值电路向量图

Fig. 5 Vector diagram of equivalent circuit of UPFC

2 UPFC 保护系统设计

如图 6 所示，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。其中，外部交流系统故障类型主要包括：UPFC 线路故障、电网故障等引起的交流电压降低或不平衡和由于雷击、线路跳合闸、故障清除等操作引起的过电压等；UPFC 站内故障则包括串联/并联变压器故障、站内交流母线故障、换流阀故障、直流侧故障等。

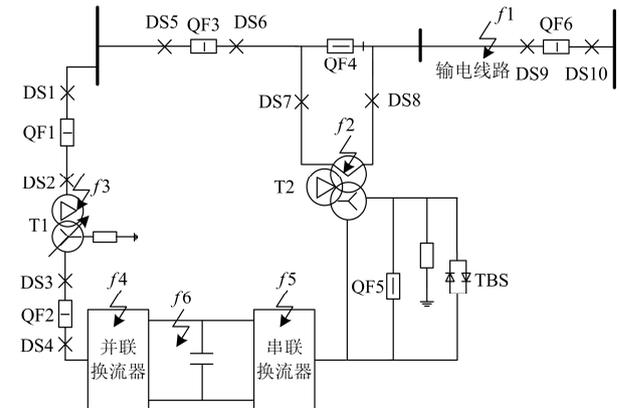


图 6 UPFC 常见故障

Fig. 6 Equivalent circuit of UPFC

在图 6 中，QF1 为并联变压器的进线交流断路器，QF2 为并联换流器的进线交流断路器，QF3、QF6 为 UPFC 线路首、末端断路器，QF4、QF5 分别为串联变压器一次侧、二次侧旁路断路器，TBS 代表晶闸管旁路开关(Thyristor Bypass Switch)，其他 DS_n 为隔离开关。

不同区域设备的故障有其自身的特点，对 UPFC 系统的影响也各不同。UPFC 保护系统的目的则是检测到所有可能致使 UPFC 系统及设备处于危险情况的，以及对于系统运行来说不能接受的故障或异常运行情况，并尽可能地通过改变控制策略或者移除最少的故障元件，使得故障对于系统和设备的影

响最小。因此, UPFC 保护系统应分区配置, 各保护分区之间应有重叠, 确保不存在保护死区。每一区域或设备至少应采用相同原理的双主双备保护或者不同原理的一主一备保护配置。此外, 保护系统应采取冗余配置, 防止在单个保护系统失效的情况下不能切除故障^[20-21]。

UPFC 保护系统按照串、并联换流器分区进行保护, 同时, 换流器区按照交流保护区、换流阀保护区和直流极保护区等分区进行保护配置。一般来说, 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; 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; 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。UPFC 保护动作结果一般有: 告警、控制系统切换、闭锁换流器、跳开 QF2、触发 TBS 导通、QF4 合闸和 QF5 合闸等。

从上述 UPFC 保护系统设计原则可以看出, 若检测到可能危及 UPFC 装置运行安全的外部交流系统故障时, UPFC 保护系统中的相应保护将会动作于闭锁换流器、跳开 QF2、触发 TBS、QF4 合闸和 QF5 合闸。一般来说 TBS 可在故障发生后 5 ms 内导通, QF2 和 QF4、QF5 则分别在接收到保护动作信号后 40 ms 左右完成跳闸或合闸。

3 UPFC 对纵联保护的影响

外部交流系统故障 5 ms 内, TBS 触发导通, 旁路了串联变压器的二次侧绕组, 也相当于旁路了 UPFC 串联换流器的等效串联电压源, 这将引起交流系统中电气量的再一次快速变化, 给线路纵联保护带来不利的影响。

3.1 纵联零序保护

纵联零序保护的原理简单、实现方便, 且灵敏度高、抗过渡电阻能力强, 常用于 220 kV 及以上电压等级输电线路中作为各类接地故障的主保护^[22]。

以北京四方继保公司的 CSC101 保护中的纵联零序保护为例, 其设正、反 2 个零序方向元件, 动作区如图 7 所示。

正方向元件的整定值可以整定, 反方向元件不需整定, 灵敏度自动比正方向元件高, 电流门槛取为正方向的 0.625 倍。

零序正方向元件动作判据为

$$18^\circ \leq \arg(3\dot{I}_0/3\dot{U}_0) \leq 180^\circ \quad (1)$$

零序反方向元件动作判据为

$$-162^\circ \leq \arg(3\dot{I}_0/3\dot{U}_0) \leq 0^\circ \quad (2)$$

上两式中, $3\dot{I}_0$ 、 $3\dot{U}_0$ 分别为保护测量得到的零序电流和零序电压。

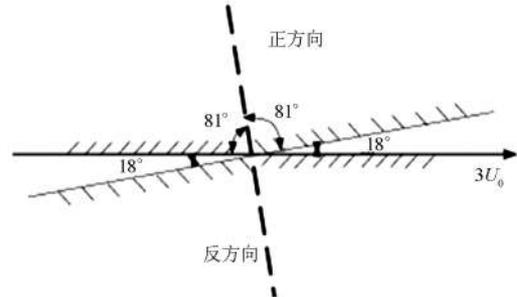


图 7 零序方向元件动作区

Fig. 7 Trip zone of zero-sequence direction element

由式(1)和式(2)可知, 零序方向元件的本质是判断保护测量得到的零序阻抗是否呈现感性。

对于并联换流器而言, 由于并联变压器的高压侧绕组为三角形接法, UPFC 并联换流器注入或吸收的电流不会出现在系统零序网络中。对于串联换流器而言, 在发生外部交流系统故障后、TBS 触发导通前, 由于 UPFC 串联变压器低压侧为中性点经大电阻(阻值达到 500 Ω)的星形接法, 可以认为交流系统的零序电流仅在串联变压器的高压侧绕组和平衡绕组中流通, UPFC 串联换流器注入的电压不会出现在系统零序网络中。因此, TBS 触发导通前 UPFC 在系统零序网络中呈现为感性特征。另一方面, 故障发生 5 ms 内 TBS 触发导通, 串联变压器的二次侧绕组被短接, 等效于将等效漏抗串联在线路中运行。因此, 外部交流系统故障后, 无论 TBS 导通与否, UPFC 在故障零序网络中均呈现为感性特征, 零序方向元件可以正确判断故障方向, 即 UPFC 接入不会对纵联零序保护的性能造成不利的影响。

3.2 纵联距离保护

纵联距离保护是一种由线路两端超范围整定的距离保护经通道交换信号构成的全线路快速跳闸的方向保护, 其动作特性与距离保护基本一致。下面主要分析 TBS 触发导通可能引起的功率倒向对纵联距离保护的影响。

1) 功率倒向对双回线纵联距离保护的影响

在如图 8 所示的平行双回线输电系统中, 线路 L2 采用闭锁式纵联距离保护。

假设线路 L1 的 M 侧发生故障, 且断路器 QF1 先于断路器 QF2 跳闸。在 QF1 跳闸前, 线路 L2 M 侧的纵联距离保护的相反方向元件动作, 仍向 N 侧保护发闭锁信号; N 侧的正方向元件动作, 停止向 M 侧保护发闭锁信号。在这种情况下, 线路 L2 的纵联距离保护不会动作。

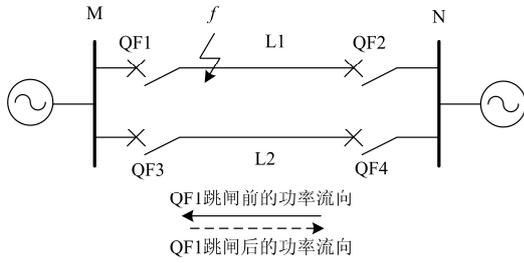


图 8 双回线功率倒向示意图

Fig. 8 Power converse on double-circuit transmission line

在 QF1 跳闸后、QF2 跳闸前，线路 L2 中的短路功率倒向，变为从 M 侧流向 N 侧，此时线路 L2 M 侧的正方向元件动作，停止向 N 侧保护发闭锁信号；N 侧的正方向元件将返回，并向 M 侧保护发闭锁信号。但是，由于正、反方向元件的动作时间和灵敏度不同，若线路 L2 N 侧的正方向未能及时返回，将导致线路 L2 两侧纵联距离保护误动。

解决上述问题的方向是启动元件动作经过一段时间后尚未跳闸，就认为是外部故障，延迟纵联距离保护的的动作时间以躲过功率倒向的过程。

2) UPFC 对纵联距离保护的影响

含 UPFC 接入的系统结构如图 9 所示，假设线路 L1 上发生故障。

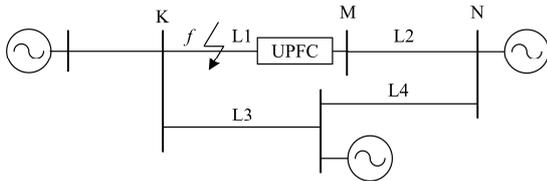


图 9 含 UPFC 接入的系统结构示意图

Fig. 9 Diagram of the power grid with UPFC

以线路 L2 的纵联距离保护为例，当线路 L1 发生故障时，L2 中的短路功率由 N 侧流向 M 侧。5 ms 内 TBS 触发导通，UPFC 的串联换流器退出运行，但是由于 UPFC 的容量一般远小于系统短路容量，TBS 触发使 UPFC 退出通常不会引起线路 L2 发生功率倒向。因此，纵联距离保护能够正确判断为区外故障，不动作。

假设极端情况下 TBS 触发导致非故障线路出现功率倒向问题，但由于故障发生 5 ms 内 TBS 即触发导通，且纵联距离保护采用的为半波或全波傅里叶算法，采样计算数据窗较长，线路两侧闭锁式纵联距离保护在故障后 10 ms 内不会停信，因此，纵联距离保护可以在算法上避免 TBS 导通引起的功率倒向而带来的误动问题。

3.3 工频变化量方向保护

工频变化量方向保护的判据简单、动作速度快、

方向性明确、抗过渡电阻能力强，在国内电力系统中得到了广泛应用^[23]。以南京南瑞继保公司的 RCS901 保护中的工频变化量方向为例，其根据电压、电流变化量的正负序综合分量的相角是否反相位来判断故障方向，并经通道交换信号构成全线路快速跳闸的纵联保护。

正方向元件的测量相角为

$$\Phi_+ = \arg\left(\frac{\Delta \dot{U}_{12} - \Delta \dot{I}_{12} Z_{\text{com}}}{\Delta \dot{I}_{12} Z_D}\right) \quad (3)$$

反方向元件的测量相角为

$$\Phi_- = \arg\left(\frac{-\Delta \dot{U}_{12}}{\Delta \dot{I}_{12} Z_D}\right) \quad (4)$$

式中： $\Delta \dot{U}_{12}$ 、 $\Delta \dot{I}_{12}$ 分别为电压、电流变化量的正负序综合分量，不包含零序分量； Z_D 为模拟阻抗； Z_{com} 为补偿阻抗。

在传统交流电网中，当被保护线路发生故障时，线路两侧的正方向元件均可靠动作，线路纵联保护可以快速动作以隔离故障；当发生保护区外故障时，线路一侧的正方向元件动作，而另一侧的反方向元件动作，因此，被保护线路的纵联保护不动作。

然而，当线路中含有 UPFC 时，外部交流系统故障时，UPFC 保护可能动作，并闭锁换流器、跳开 QF2、触发 TBS、QF4 合闸和 QF5 合闸。在这种情况下，不仅线路故障将引起保护测量得到的电压、电流的正负序综合分量发生突变，TBS 导通也将引起交流系统中电气量的再一次突变。因此，将存在 TBS 导通与交流故障点的相互“电气竞争”，从而可能引起工频变化量方向保护区内故障拒动或区外故障误动。

仍以图 9 为例分析 UPFC 接入对工频变化量方向保护的影响。假设线路 L1 发生故障，对于任意一条线路上的工频变化量方向保护而言，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，保护可靠动作或不动作。

假设线路 L2 上发生故障，对于安装在线路 L2 M 侧的工频变化量方向保护而言，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，从而导致线路 L2 上的基于工频变化量方向元件的纵联保护拒动。对于安装在线路 L1 K 侧的工频变化量方向保护而言，其感受到的是同一方向的 TBS 导通引起和故障引起的突变量，可以正确判断为正向故障；然而对于 M 侧的工频变化量方向保护而言，其几乎同时感受到正向 TBS 导通引起和反向区外故障的突变量，可能错误判断为正向故障，从而导致线路 L1 上的基

于工频变化量方向元件的纵联保护误动。

4 仿真验证

前述理论分析指出在 TBS 触发导通的情况下 UPFC 接入不会对纵联零序保护和纵联距离保护的性造成不利的影, 而可能导致基于工频变化量方向元件的纵联保护区内故障拒动或区外故障误动。因此, 为了验证 UPFC 对工频变化量方向保护的影响, 利用 PSCAD/EMTDC 建立了如图 1 所示的区域电网的仿真模型。

4.1 区内故障拒动

$T=0.5$ s 时在下关-中央线路下关侧发生 A 相经 $20\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时, 图 10 给出了下关-中央线路两侧工频变化量方向保护正、反方向元件的测量相角。

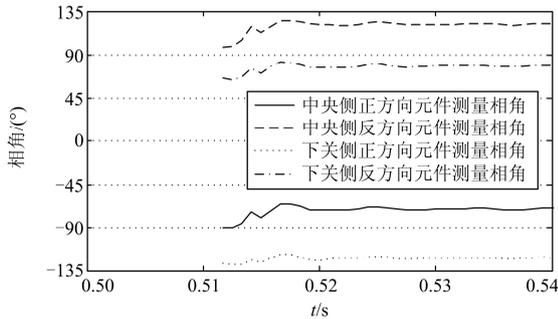


图 10 线路两侧工频变化量方向保护的测量相角

Fig. 10 Phase angles measured by the superimposed component direction protections

从图 10 中可以看出, 中央侧工频变化量方向保护的 正方向元件的测量相角在 -45° 与 -90° 之间, 反方向元件的测量相角在 90° 与 135° 之间。因此, 中央侧的正方向元件不动作, 反方向元件动作。另一方面, 下关侧工频变化量方向保护的 正方向元件的测量相角在 -90° 与 -135° 之间, 反方向元件的测量相角在 45° 与 90° 之间。因此, 下关侧的正方向元件动作, 反方向元件不动作。

下关-中央线路两侧的工频变化量方向保护经通道交换动作信号后判断为保护区外故障, 从而将导致下关-中央线路的纵联保护拒动。

4.2 区外故障误动

$T=0.5$ s 时在铁北-经港线路经港侧发生 A 相经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时, 图 11 给出了晓庄-铁北线路两侧工频变化量方向保护正、反方向元件的测量相角。

从图 11 中可以看出, 晓庄侧工频变化量方向保护的 正方向元件的测量相角在 180° 左右, 反方向元

件的测量相角则在 0° 左右。因此, 晓庄侧的正方向元件动作, 反方向元件不动作。另一方面, 铁北侧工频变化量方向保护的 正方向元件的测量相角在 -90° 与 -180° 之间, 反方向元件的测量相角在 0° 与 90° 之间。因此, 铁北侧的正方向元件动作, 反方向元件不动作。

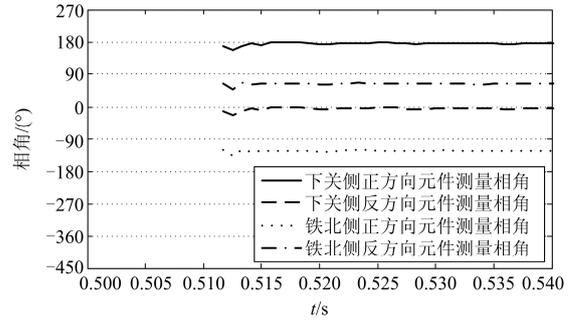


图 11 线路两侧工频变化量方向保护的测量相角

Fig. 11 Phase angles measured by the superimposed component direction protections

晓庄-铁北线路两侧的工频变化量方向保护经通道交换动作信号后判断为保护区内故障, 从而将导致晓庄-铁北线路的纵联保护误动。

综上, UPFC 接入可能导致 UPFC 线路的工频变化量方向保护误动, 或非 UPFC 线路的工频变化量方向保护拒动。为了保证 UPFC 接入后电网的运行安全, 有必要对 UPFC 线路及其相邻线路的保护进行改造, 避免采用基于工频变化量方向元件的纵联保护。由于电网结构、潮流水平和运行方式的变化, 受影响的线路范围难以准确界定, 根据经验可对 UPFC 线路及其相邻四级线路的保护进行改造。

5 结论

在检测到可能危及 UPFC 装置运行安全的外部交流系统故障时, UPFC 保护将会动作于闭锁换流器、跳开并联换流器进线交流断路器、触发晶闸管旁路开关、合串联变压器高/低压侧旁路开关。这将引起交流系统中电气量的再一次快速变化, 并与交流故障点形成相互的“电气竞争”, 从而可能给线路纵联保护带来不利的影。

1) UPFC 在故障零序网络中呈现为感性特征, 零序方向元件可以正确判断故障方向。因此, UPFC 不会对纵联零序保护的性造成不利的影。

2) UPFC 保护动作一般不会引起功率倒向。即使极端情况下非故障线路出现功率倒向问题, 纵联距离保护也可以在算法上确保不误动。

3) 晶闸管旁路开关的导通与交流故障点之间

的相互“电气竞争”可能引起 UPFC 线路的工频变化量方向保护误动, 或非 UPFC 线路的工频变化量方向保护拒动, 有必要对相关线路保护进行改造。

本文的研究成果为南京西环网 UPFC 示范工程的建设和相关线路保护的改造提供了参考。

参考文献

- [1] 尹璐, 舒彬, 张璞, 等. 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(增刊 1): 67-75.
YIN Lu, SHU Bin, ZHANG Pu, et al. A PSD-BPA and MATLAB joint modeling and simulation method with UPFC for power system flow calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 67-75.
- [2] 鹿建成, 李啸骢, 黄维, 等. 基于 SSSC 和励磁协调抑制次同步振荡的线性最优控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 21-27.
LU Jiancheng, LI Xiacong, HUANG Wei, et al. Linear optimal controller of static series synchronous compensator and excitation to suppress sub-synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 21-27.
- [3] 姚骏, 周特, 陈知前, 等. 电网对称故障下定速异步风电场 STATCOM 容量配置研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 45-54.
YAO Jun, ZHOU Te, CHEN Zhiqian, et al. Studies on STATCOM capacity configuration for FSIG-based wind farm under symmetrical grid fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 45-54.
- [4] 赵国亮, 李卫国, 陈维江, 等. 预充电过程中取能电路对链式 STATCOM 直流电压影响及其均衡方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 179-186.
ZHAO Guoliang, LI Weiguang, CHEN Weijiang, et al. Effect of energy-gaining unit on cascaded STATCOM and balance method during Pre-charging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 179-186.
- [5] 韩寒, 张聪. STATCOM 抑制电力系统次同步振荡的研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(2): 30-34.
HAN Han, ZHANG Cong. Research on damping sub-synchronous resonance in power system with STATCOM[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(2): 30-34.
- [6] RENZ B A, KERI A, MEHRABAN A S, et al. AEP unified power flow controller performance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1374-1381.
- [7] SCHAUDER C, STACEY E, LUND M. AEP UPFC project: installation, commissioning and operation of the ± 160 MVA STATCOM (Phase I)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1530-1535.
- [8] CHANG B H, CHOO J B, IM S J, et al. Study of operational strategies of UPFC in KEPCO transmission system[C] // 2005 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Asia and Pacific, IEEE, Dalian, China, 2005: 1-6.
- [9] AHN S J, LEE D W, MOON S I. Structure and operation strategies of an automatic supervisory control system for the KEPCO UPFC[J]. Electrical Engineering, 2008, 90(7): 511-519.
- [10] UZUNOVIC E, FARDANESH B, HOPKINS L, et al. NYPA convertible static compensator (CSC) application phase I: STATCOM[C] // 2001 IEEE PES Transmission and Distribution Conference, IEEE, Atlanta, United States, 2001: 1139-1143.
- [11] FARDANESH B, SCHUFF A. Dynamic studies of the NYS transmission system with the Marcy CSC in the UPFC and IPFC configurations[C] // 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference, IEEE, Dallas, United States, 2003: 1175-1179.
- [12] 桂帆, 江道灼, 吕文韬, 等. 限流式统一潮流控制器参数设计及优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 160-164.
GUI Fan, JIANG Daozhuo, LÜ Wentao, et al. Parameter design and optimization of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 160-164.
- [13] ZHOU Z, 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.
- [14] MORAVEJ Z, PAZOLI 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.
- [15] 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, IET, York, United Kingdom, 2008: 783-788.
- [16] DASH P K, PRADHAN A K, PANDA G. Distance protection in the presence of unified power flow controller[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 54(3): 189-198.
- [17] 马明, 刘强, 沈凤杰, 等. 输电设备过载与断面功率越限在线控制决策[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 26-32.
MA Ming, LIU Qiang, SHEN Fengjie, et al. On-line auxiliary decision-making for overload control of power

- transmission equipment and sections[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 26-32.
- [18] 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.
- [19] 甄宏宁, 梁志瑞, 王莹, 等. 南京西环网装设 UPFC 装置的主设备容量优化选择[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 18-22.
ZHEN Hongning, LIANG Zhirui, WANG Ying, et al. The optimal capacity selection of UPFC installed in Nanjing 220 kV western power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 18-22.
- [20] 姜崇学, 戴阳, 王莹, 等. 统一潮流控制器保护功能配置研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 6-9.
JIANG Chongxue, DAI Yang, WANG Ying, et al. Research on protection function deployment for UPFC device[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 6-9.
- [21] 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.
- [22] 申志成, 张慧媛, 龚仁敏, 等. 反应全类型故障的改进零序方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 102-106.
SHEN Zhicheng, ZHANG Huiyuan, GONG Renmin, et al. An improved zero-sequence directional component to response all kinds of fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 102-106.
- [23] 徐岩, 刘泽楷, 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): 102-106.
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, 43(5): 102-106.

收稿日期: 2016-01-10; 修回日期: 2016-03-07

作者简介:

孔祥平(1988-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为分布式电源接入的电力系统保护、直流控制保护系统等; E-mail: kongxphust@163.com

李 鹏(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压直流控制保护系统, 柔性交直流输电技术等。

(编辑 葛艳娜)