

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.01.014

UPFC 系统的变压器差动保护分析

吴奕¹, 顾乔根^{2,3}, 崔玉¹, 黄海东¹, 孙仲民^{2,3}, 王业¹

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 3. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 并联变压器和串联变压器是统一潮流控制器(UPFC)的核心交流器件, 差动保护作为这两类变压器的主保护, 受 UPFC 特殊的运行工况影响, 在不同的运行条件和不同类型的故障下会表现出不同的特性。为分析评估 UPFC 中各类故障对差动保护的影响, 文中以实际 UPFC 工程的控制系统为基础, 讨论了各类故障下可能对并联、串联变压器差动保护灵敏性及可靠性产生影响的因素; 根据变压器区内外典型故障的仿真结果, 分析了差动保护在此类故障下的行为特征, 形成差动保护的适应性分析, 验证了保护配置的有效性; 从保护设备的角度出发, 讨论了阀控制保护与交流继电保护的关系, 从防误和防拒两方面为 UPFC 工程的交流继电保护实施提供技术参考。

关键词: 统一潮流控制器(UPFC); 串联变压器; 并联变压器; 差动保护; 适应性分析

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)01-0099-08

0 引言

变压器是柔性交流输电系统(flexible alternative current transmission systems, FACTS)与电网交互的关键性交流器件, 包括串联变压器和并联变压器 2 种类型。差动保护作为变压器的主保护, 是继电保护研究关注的重点。为提高差动保护的可靠性和准确性, 学者们将 S 变换^[1]、形态学^[2]等方法用于差动保护分析。此外, 差动保护受空充励磁涌流、并联运行和应涌流的影响比较大^[3]。文献[4]采用多变量多尺度熵算法识别励磁涌流, 具有可评价多通道数据复杂性和相关程度的特点; 文献[5]分析了复杂和应涌流的影响因素、关键特征以及对相邻发电机电流差动保护的影响。

不同工作场景下的变压器对差动保护的影响也各有差异。文献[6]研究了换相失败对差动保护性能的影响; 针对调压变压器的运行方式, 文献[7]提出一种差动保护自适应算法, 能够在线自适应地对差动电流计算结果进行修正; 针对传统移相变压器保护方案的不足, 文献[8]提出基于全角度移相的移相变压器差动保护方案。

电力电子技术的发展使得交流变压器在 FACTS 工程中应用越来越广泛, 但是在这类 FACTS 工程, 尤其是统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)工程中, 关于变压器保护的研究相对较少。文献[9]分析了 UPFC 保护与交流保护配合策略, 并阐述了南京西环网 UPFC 保护与各类交流保护动作配合原则; 针对 UPFC 串联变压器特殊

的启动调试方法和充电路径, 文献[10]提出一种串联变压器启动试验保护配置方法; 传统差动保护无法可靠反映 UPFC 中网侧绕组两侧的故障, 文献[11]利用网侧绕组等效电流和绕组差动的辅助判据改进了串联变压器差动保护; 考虑到 UPFC 中串联变压器的特性和运行方式, 文献[12]提出串联变压器保护需要考虑的特殊问题, 并据此提出完整的串联变压器保护配置方案, 给出了适用于串联变压器的专用保护判据。

UPFC 系统中的串联变压器在硬件结构上、工作特性上与普通并联变压器相比都有较大区别; UPFC 系统中的并联变压器与常规变压器相比, 其一次结构、一次接线没有区别, 但 UPFC 并联侧换流器直接接入并联变压器, 其输出特性对并联变压器差动保护的影响尚不明确。考虑到 UPFC 系统的特殊性, 需要从 UPFC 的具体运行方式、UPFC 故障发生过程中和故障切除的过程中电气量的变化规律等方面对串联变压器、并联变压器差动保护算法的适应性进行评估, 提出切实可行的保护配置方案和改进方案。

综上所述, 文中通过已建立的苏州南部工程 UPFC 实时仿真模型, 对 UPFC 工程应用中的交流保护受到的影响进行系统评估, 仿真分析变压器差动保护在区内外故障下的波形特征, 探讨变压器差动保护在此类故障情况下的适应性, 为 UPFC 输电工程及后续的工程建设提供技术支撑。

1 UPFC 系统结构及保护动作方式

苏州南部工程 UPFC 系统结构如图 1 所示, 网

收稿日期: 2020-07-05; 修回日期: 2020-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707090)

侧 2 个换流器通过 2 个串联变压器接入木读—梅里 500 kV 双回线路。并联侧 1 个换流器通过 1 个启动电阻接至并联侧变压器,再接入木读 500 kV 母线,在并联变压器的阀侧和系统侧均配有 1 台交流断路器;串、并联侧 3 个换流器采用背靠背的连接方式,网侧 2 个换流器在直流侧并联后再与并联侧换流器通过直流母线相连。

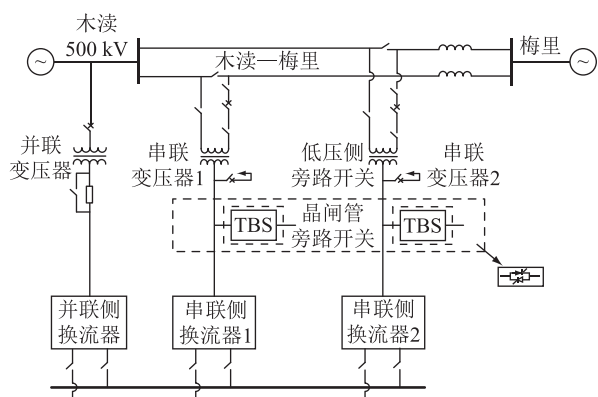


图 1 苏州南部工程 500 kV UPFC 系统结构
Fig.1 Structure of 500 kV UPFC system in the South of Suzhou

串联换流器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,其幅值和相位由 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自动潮流控制、相角控制以及线路电抗控制等^[13-16]。串联变压器通过旁路合闸的方式实现变压器隔离。

并联换流器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。并联变压器一般采用常规断路器来隔离故障。

2 UPFC 系统变压器保护的相关问题

2.1 串联变压器

串联变压器是 UPFC 系统的潮流调节电压输出器件^[17],其网侧绕组两端开放式地串接在输电线路中,其运行方式的特殊性决定了变压器结构和特性与普通电力系统变压器(并联变压器)有很大不同。

(1) 相对于同电压等级的普通变压器,串联变压器的额定电压低,容量小。其网侧额定电压通常比串联变压器工作环境的额定电压小一个数量级。

(2) 由于工作环境的电压等级较高,为了应对串联变压器可能的磁饱和及过电压,要求串联变压器的工作磁密低,并具有抗短时过电压和过激磁的能力。

串联变压器的绕组端电压来自 UPFC 网侧换流器输出,是时变的。当串联变压器绕组输出电压低于变压器额定电压时,串联变压器匝间故障产生的差流将明显降低^[18-19]。由于一次系统上串联变压器与换流器耦合度很高,当变压器故障时,需要考虑换流器的暂态行为可能对变压器差动保护产生的影响。

2.2 阀控制保护对变压器保护的影响

电力电子设备的抗过电流抗过电压特征不同于普通交流设备^[20-21]。电力电子设备具有非线性、阶跃性特征,当此类设备流过大电流时,电流越过门槛,无需积累,可能直接导致设备永久性损坏(半导体击穿或烧断)^[22]。因此 UPFC 保护必须采用采样瞬时值作为保护计算值。当系统故障产生的暂态电流达到 UPFC 保护的動作门槛时,UPFC 保护从保护直流设备的角度出发,须快速动作。当串联变压器存在严重故障时,必然也会引起换流阀过流,须考虑阀控制保护的動作行为对交流保护带来的影响。

2.3 并联变压器

并联侧换流器对于变压器而言,可以等效于负荷(吸收少量有功,交换无功)^[23],因此并联变压器整体特性类似于负荷变压器。并联变压器在变压器结构、一次接线、隔离方式、与上一级继电保护配合等方面没有特殊之处,差动保护反映区内外典型故障时原理上不受影响。并联变压器的差动保护需要仿真确认暂态故障情况下,并联侧换流器这一特殊“负荷”的输出特性是否会影响差动保护闭锁判据。

3 差动保护反映串联变压器区内外故障的适应性分析

3.1 差动保护配置及仿真工况

在实时数字仿真系统(real time digital simulation system, RTDS)中,接入 UPFC 阀侧控制保护系统、交流侧串联变压器及并联变压器保护装置,分析故障时的串、并联变压器的电气特征及继电保护元件的响应情况。

图 2 为两绕组串联变压器外部短路系统示意。工程上,取电流互感器 CT1、CT3 构成磁平衡纵差保护 87T1,设置纵差保护启动值为 0.3 A,纵差保护采用三段式制动特性曲线。

3.2 区外短路情况下差动保护的适应性分析

图 2 中,串联变压器包含网侧绕组和阀侧绕组。正常运行时,旁路开关 K1、K2 处于打开状态,网侧

绕组直接串接在线路中,阀侧绕组首端接换流器输出引线,尾端为中性点接地。

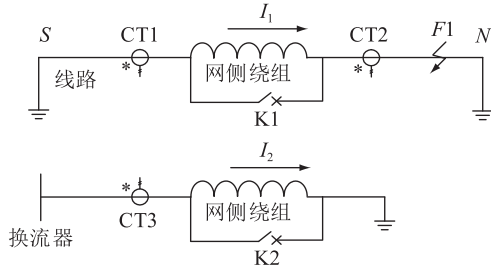


图2 串联变压器外部短路系统示意

Fig.2 Schematic diagram of external short circuit in series transformer

从串联变压器的角度来说,当线路突发短路故障时,K1处于分位,短路电流 I_1 从线路的S侧穿越串联变压器汇入短路点,串联变压器自身阻抗串接在故障回路中。K2也处于分位状态,阀侧绕组也将流经短路电流 I_2 。

短路电流 I_2 势必引起换流器过流,在故障后的数毫秒内,阀控制保护将动作,闭锁换流器,合旁路开关K1、K2,其中K1的合闸过程大约持续30ms。

在此过程中,串联变压器自身一直串联在故障回路中,客观上,串联变压器自身阻抗及换流器回路的等效阻抗能起到一定的限流作用。由于K2开关合闸速度快,当K2已合闸、K1未合闸时,流经串联变压器的短路电流达到最大。当K1、K2均已合闸,串联变压器两侧绕组均被旁路(绕组首尾短路),变压器隔离处于隔离状态,合闸前一刻两侧绕组中存在的交流短路电流转化为衰减非周期分量。

区别于普通变压器,3/2接线、角型接线方式下,变压器区外短路电流很大(因为此时变压器自身阻抗不在故障回路中,起不到限流作用),串联变压器网侧区外故障时,自身阻抗有一定限流作用,再结合合理的CT(按线路金属性短路故障选择CT变比,CT选型侧重于暂态特性好的类型),串联变压器网侧区外故障造成CT深度饱和的可能性小,K1、K2合闸过程中产生的不平衡电流不至于大幅上升,而穿越性故障提供的制动电流很大,因此差动保护误动的风险较小。

应当注意到,区别于普通交流电网故障过程,K1、K2合闸后的暂态过程具有特殊性。普通交流电网故障后,断路器开关跳开并灭弧,一次系统的电流回路开路,电流为零。当K1、K2合闸后,网侧绕组、阀侧绕组两端均被旁路开关短接,构成了电流回路,同时网侧绕组、阀侧绕组为感性铁磁元件,绕组电流不能突变,绕组电流存在一个衰减的过

程,需要关注这个过程中,一次侧持续的衰减非周期分量传变至二次侧时二次电流的一致性问题的。

图2中,F1处发生单相永久性接地故障,仿真及计算波形如图3所示。故障起始时刻为0.05s,故障发生后约0.01s,K2开关合上。

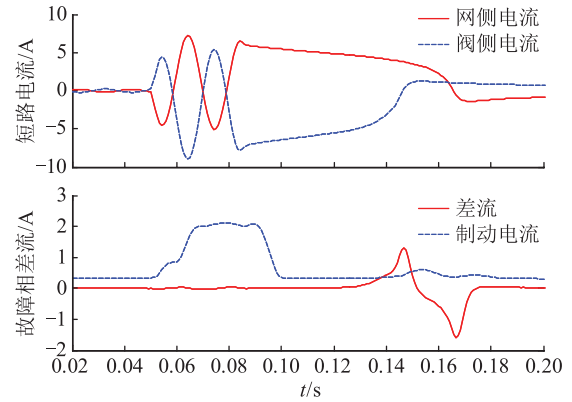


图3 串联变压器区外单相接地故障

Fig.3 Single-phase ground fault outside the series transformer

由图3可见,旁路开关完全合闸前($t < 0.08$ s),短路电流呈典型区外故障特征。当旁路开关完全合闸后,变压器两侧电流呈非周期衰减状态,随着时间推移,两侧电流的衰减特性差异逐渐放大,过零点时波形差异明显。

分析图3可知,区外故障过程中,在K2完全合闸前($t < 0.08$ s),纵差保护的差回路中不平衡电流很小,远小于短路电流提供的制动电流,此阶段差动保护能够可靠制动。

当旁路开关合闸后,变压器两侧的二次电流衰减差异逐渐放大,差流逐渐越过制动电流,纵差保护进入动作区,此时需要考虑闭锁措施以避免差动保护误动^[24]。

3.3 纵差保护反映区内金属性故障的适应性分析

分析网侧区内单相接地故障时,纵差保护的差流特征和演变趋势。网侧绕组区内接地故障示意图如图4所示,设网侧绕组总匝数为 N_1 ,阀侧绕组总匝数为 N_2 ,网侧绕组从首端起 $k \times 100\%$ 绕组处发生接地故障,此时S端系统有短路电流从首端流入接地点,N端系统有短路电流从尾端流入接地点。

分析此时的串联变压器,有磁平衡:

$$\dot{I}_3 N_2 = \dot{I}_1 k N_1 + \dot{I}_2 (1 - k) N_1 \quad (1)$$

整理得到:

$$\dot{I}_3 = \frac{N_1}{N_2} [\dot{I}_1 k + \dot{I}_2 (1 - k)] \quad (2)$$

纵差保护(87T1)取CT1、CT3进行计算,两侧差动调整电流均以变压器各侧额定电流标么化后进

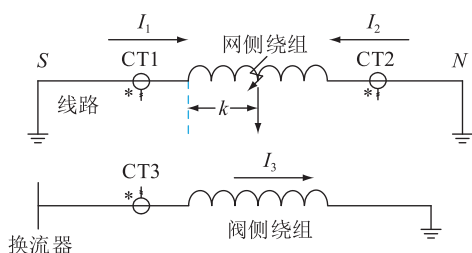


图4 网侧绕组区内接地故障示意
Fig.4 Schematic diagram of ground fault in the grid side winding area

行计算。因此,以串联变压器网侧为基准,可以略去 I_3 的乘积项,此时串联变压器两侧差流 I_d 为:

$$\dot{I}_d = \dot{I}_1 - \dot{I}_3 = (1 - k) |\dot{I}_1| + (1 - k) |\dot{I}_2| e^{j\theta} \quad (3)$$

式中: θ 为 \dot{I}_1, \dot{I}_2 的相角差。

由式(3)可见,理想情况下,当接地故障点落于网侧绕组尾端区外时, $k=1$, 此时 I_d 为 0。图 4 中的短路阻抗主要由交流系统短路阻抗和串联变压器短路阻抗构成,一般情况下电力系统短路阻抗的相角约 86° , 变压器短路阻抗近似为漏抗, 为 90° , 2 种阻抗都以感性为主, 即 θ 值很小。当网侧绕组接地点落于绕组不同位置时, 短路阻抗相位的变化对 \dot{I}_1, \dot{I}_2 的相位影响很小, 即 θ 的变化幅度很小。因此, 可以近似略去 $e^{j\theta}$ 。

由式(3)可知, 当故障点落于变压器区内时, k 值越小, 即故障点越靠近绕组 S 侧, 以 CT1、CT3 构成的纵差保护 87T1 的差流越大, 纵差灵敏度越大; k 越大, 即故障点越靠近绕组 N 侧, 纵差保护 87T1 的差流越小, 保护灵敏度下降, 必然存在灵敏度死区。

假如以 CT2、CT3 构成纵差保护(87T2), 以上述分析方法分析可知, 与 87T1 相反, 当故障点落于变压器区内, k 值越大, 87T2 的差流越大, 灵敏度越高; k 值越小, 87T2 的差流越小, 87T2 的灵敏度死区位于绕组 S 侧。

仿真网侧绕组 $k=0.9$ 处发生绕组单相接地故障, 仿真及计算波形见图 5, 故障起始时刻为 0.3 s。

由图 5 可知, 当故障点接近绕组尾端时, 87T1 的差流很小, 已低于纵差保护启动值, 87T1 保护不能动作。与此同时, 由于区内故障点靠近 CT2, CT2、CT3 构成的磁平衡受破坏程度很高, 因此 87T2 的差流很大, 差动保护具有良好的保护灵敏度, 能够补充 87T1 的灵敏度死区。

基于上述分析结果, 工程上可以同时配置 87T1、87T2 两套纵差保护, 以消除近 S 侧和近 N 侧的灵敏度死区, 提高纵差保护整体灵敏度。

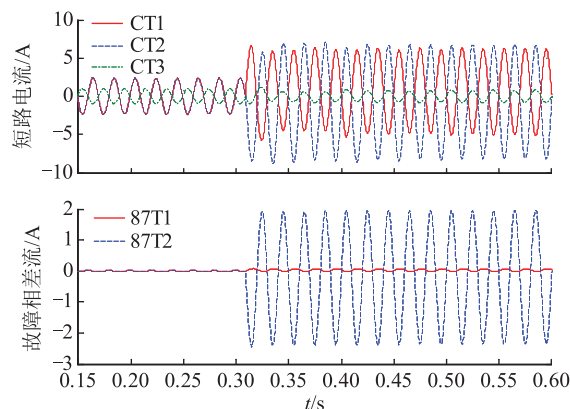


图5 串联变压器区内绕组接地故障

Fig.5 Ground fault waveform in the grid side winding

3.4 纵差保护反映匝间短路故障的适应性分析

分析串联变压器本体绕组发生匝间短路时, 纵差保护的差流特征和演变趋势^[16]。

文献[16]给出了串联变压器差动保护的差动电流与故障率、绕组端电压之间的数值关系:

$$I_{dl} = E_2 \left[\frac{1}{Z_{kt}} - \frac{1}{\frac{2Z_k}{(1-k)} + Z_{kt}} \right] k \quad (4)$$

式中: E_2 为串联变压器网侧绕组端间电压; I_1 为 CT1 测量电流; Z_k 为系统短路阻抗; Z_{kt} 为变压器短路阻抗; k 为被短绕组的匝数比。

分析式(4)可知, 固定绕组电压 E_2 不变时, 绕组被短路匝数越多, 即 k 越大, 则差流 I_{dl} 越大; 固定 k 不变时, 相同匝数绕组被短路情况下绕组电压 E_2 越大, 则差流 I_{dl} 越大。

模拟系统处于小方式下, UPFC 系统轻微出力(输出电压 0.1 p.u), 串联变压器发生 5%匝间短路的情况进行分析, 如图 6 所示, 故障起始时刻为 0.055 s。

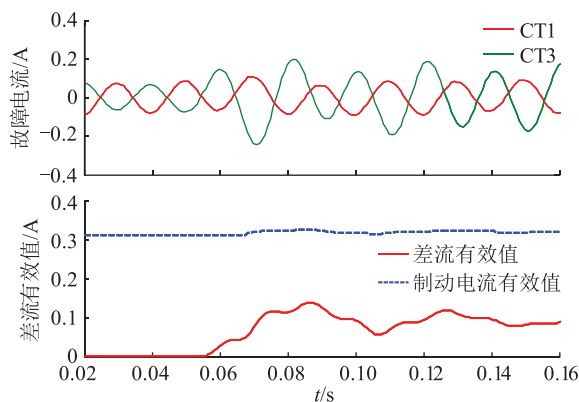


图6 串联变压器本体绕组轻微匝间短路故障

Fig.6 Series transformer windings with slight turn-to-turn short circuit fault

分析图 6(a)、(b)可知, UPFC 系统轻微出力发

生小匝比短路故障,短路电流数值上仅比负荷电流略有上升,仅产生轻微的差流,差流低于动作门槛,差动特性不能进入动作区,差动保护不能动作。此时需要考虑措施以提高差动保护灵敏度^[9]。若串联变压器绕组端电压接近额定电压,串联变压器绕组短路的短路电流将上升。

模拟系统处于大潮流下,UPFC 系统进行降功率输出,串联变压器绕组发生 40%的大匝比短路故障,如图 7 所示。

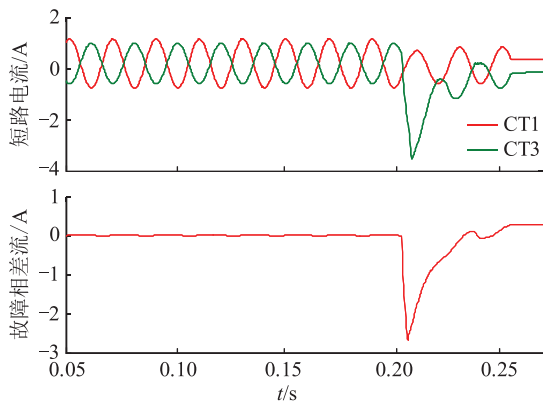


图 7 串联变压器本体绕组大匝比短路故障

Fig.7 Series transformer winding short circuit fault with large turn ratio

分析图 7 可知,当 UPFC 系统出力较大时,若变压器发生大匝比短路故障,变压器阀侧绕组将产生大的冲击电流。按照 CT3 实际变比为 2 000:1 计算,短路时刻的瞬时电流达到 5 800 A 以上,势必造成换流器过流,对换流器设备安全造成威胁。此时换流器控制保护将在 0.002 s 内快速动作,停运换流器并合闸旁路开关。受换流器控制保护的动作为影响,差流瞬时值在故障后迅速达到顶峰,随后由于换流器不再输出控制电压且旁路开合闸,差流瞬时值迅速下降,在 0.01 s 内降为低值,进而造成纵差保护来不及动作。

变压器区内发生严重故障,引起了换流器过流,进而阀控制保护动作切除故障。有 3 点因素需要考虑:

(1) 串联变压器与换流器同属 UPFC 主要设备,不存在单一设备单独运行的工况,串联变压器处于纵差保护和阀控制保护共同作用的范围,退一步考虑,主变区内故障情况下,如果阀控保护拒动,交流保护是能够可靠动作切除故障的。

(2) 交流继电保护与阀控制保护的后续结果是一样的,都是换流器停运,合闸旁路开关。

(3) 换流器的设备安全要求阀控制保护能够在在大电流情况下快速隔离串联变压器,阀控制保护快

速动作,客观上有利于变压器在较严重故障情况下尽快隔离。

基于以上分析,保护动作行为的评价应基于串联变压器保护及阀保护的整体保护动作效果,不应片面地只评估单个保护。

就交流保护自身而言,需要关注:在阀控制保护先行动作、交流纵差保护不动作的情况下,如何进行事后快速故障定位,即定位故障是发生在变压器还是发生在阀侧换流器。

图 7 中,变压器发生较大匝间短路时,交流保护能够录到短时差流,其短时数值达到 2.6 A 左右。首先,通过观察线路保护行为及线路电压,可识别是否因线路故障引起变压器产生不平衡电流,进而导致差动保护出现大差流。理论上,换流器属于串联变压器电源侧,任意换流器故障都不会引起变压器纵差保护产生差流。因此,一旦线路电流没有大幅变化且串联变压器差动保护出现过较大差流,则变压器区内可能存在故障的可能性很大,此时应当抽油样分析或吊罩检查。

3.5 差动保护反映串联变压器阀侧故障的适应性分析

串联变压器阀侧发生匝间短路故障,故障特征与网侧匝间短路故障的特征基本一致。串联变压器阀侧一般采用星型高阻接地的接线形式,这种接线形式的主要问题是,当阀侧发生单相接地故障时,短路电流很小,即阀侧属于小电流接地系统,此时故障特征量主要体现在系统电压上而不是电流。纵差保护是以电流为主要分析对象的主保护,因此纵差保护不能反映此种故障,应配置零序过电压或电压不平衡等原理的保护作为辅助。

4 差动保护反映并联变压器故障的适应性分析

并联侧换流器对于变压器而言,可以等效于负荷(吸收少量有功,交换无功),并联侧换流器的工作容量比并联变压器容量小得多,正常运行时变压器负荷电流不大,并联变压器运行特性类似于负荷变压器。并联变压器采用常规断路器使变压器与交流系统隔离。阀侧区外故障时,阀侧提供的短路电流不流经差动保护 CT,因此差动保护反映区外故障没有特殊之处。

分析变压器发生区内故障,此时并联侧正序电压下降,按照既定控制策略,并联侧换流器将输出无功功率进行无功补偿。

以往变压器接入无功设备,带来的主要问题是

谐波问题^[25]。例如,静止无功补偿器(static var compensator, SVC)配套设备中含有滤波器组,暂态情况下将产生特定次谐波,将影响差动保护饱和判据开放,影响差动保护性能。

模拟并联变压器阀侧区内发生两相接地故障(此时阀侧电压变化最大且又不至完全失压),如图8所示。第145 ms处,并联变压器阀侧区内发生BC两相接地故障,网侧提供短路电流,因此网侧BC相电流上升。阀侧换流器输出无功电流,流经差动保护阀侧CT汇入故障接地点,因此阀侧BC相电流也有一定程度的上升。

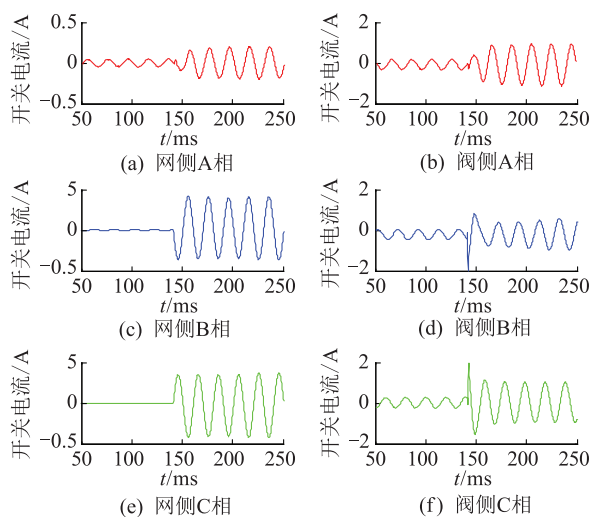


图8 并联变压器区内两相接地故障
Fig.8 Two-phase grounding fault in parallel transformer zone

区别于 SVC, UPFC 采用绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)组成换流阀,控制响应速度快,不产生谐波,结构设计上不需要滤波器组。分析图8可知,故障后几毫秒之内,阀侧换流器能够快速响应将输出电流控制在合理范围内,输出波形平滑,无明显畸变情况,谐波含量低,不会对差动保护构成闭锁风险。

综上所述,差动保护能够不受影响地反映并联变压器区内外故障。

5 结论

目前,串联变压器电量保护的适应性研究仍不广泛,国内部分 FACTS 工程依然使用国网标准变压器保护装置作为串联变压器的电量保护。文中从实际工程应用出发,分析串联变压器区内外故障对纵差保护的影响性,提出常规电量保护应用于串联变压器时存在的问题,并给出了解决措施建议,有如下结论:

(1) 串联变压器的旁路合闸过程中,差回路中

互感器传变衰减非周期分量时容易出现两侧 CT 特性不一致的情况,易引起纵差保护产生差流,有误动风险。

(2) 纵差保护反映串联变压器网侧绕组故障时,当故障点位于远离差回路 CT 安装端,存在保护灵敏度死区,工程设计时应注意采取措施以消除死区。

(3) 对于串联变压器本体故障而言,故障时短路电流大小受 UPFC 运行工况影响较为明显,串联变压器绕组电压的大小影响本体故障短路电流大小。当串联变压器仅轻微输出时,纵差保护灵敏度降低。

(4) 网侧换流器与串联变绕组具有强耦合关系,变压器本体严重故障可能同时造成阀过流。考虑到串联变压器、换流器在一次上是耦合关系,且同时投退,不存在串联变压器单独运行或换流器单独运行的工况,此类问题,保护动作行为的评价应基于串联变压器保护及阀保护的整体保护动作效果,不应片面地只评估单个保护。

(5) 并联变压器采用常规断路器使变压器从交流系统中隔离开,并联变压器整体保护配合与常规变压器保护没有区别。仿真表明,区内故障时,阀侧返送电流无明显畸变,不会对差动保护谐波闭锁判据产生影响。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019026)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 翁汉琰,李昊威,邢家维,等. 采用S变换相位差及能量相对熵的换流变零序差动保护新判据[J]. 电力自动化设备, 2019,39(9):20-26.
WENG Hanli, LI Haowei, XING Jiawei, et al. Novel criterion adopting S-transform phase angle difference and energy relative entropy for zero-sequence differential protection of converter transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):20-26.

[2] 曾杰,张禄亮,吴青华. 基于形态学骨架的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化,2017,41(23):68-76.
ZENG Jie, ZHANG Luliang, WU Qinghua. Morphological skeleton based differential protection for power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23):68-76.

[3] 郑玉平,何大瑞,潘书燕. 变压器铁芯饱和统一模型建立及其判别方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(24):118-124.
ZHENG Yuping, HE Darui, PAN Shuyan. Unified model development and identification method of transformer core saturation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24):118-124.

[4] 周念成,李春艳,王强钢. 基于多变量多尺度熵的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电工技术学报,2018,33(15):3426-

3436.
ZHOU Niancheng, LI Chunyan, WANG Qianggang. An algorithm to identify transformer inrush currents based on multivariate multiscale sample entropy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3426-3436.
- [5] 王奕, 戚宣威, 罗航, 等. 复杂和应涌流及其对电流差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 98-105.
WANG Yi, QI Xuanwei, LUO Hang, et al. Complex sympathetic inrush and its influence on current differential protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 98-105.
- [6] 黄少锋, 申洪明, 刘玮, 等. 交直流互联系统对换流变压器差动保护的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 158-164.
HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, LIU Wei, et al. Effect of AC/DC interconnected network on transformer protection and its countermeasure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 158-164.
- [7] 郑涛, 陆格野, 黄婷, 等. 特高压有载调压变压器差动保护自适应算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 271-280.
ZHENG Tao, LU Geyue, HUANG Ting, et al. An adaptive algorithm for the differential protection of the UHV voltage-regulating transformer with on-load tap changer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 271-280.
- [8] 侯炜, 邵铃敏, 段胜朋, 等. 多分支移相变压器差动保护技术研究及应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 205-209.
HOU Wei, SHAO Lingmin, DUAN Shengpeng, et al. Research and application of differential protection for multi-branch phase-shifting transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 205-209.
- [9] 林金娇, 李鹏, 孔祥平, 等. 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, et al. The UPFC protection system configuration and action strategy in Nanjing western power grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 56-60.
- [10] 李鹏, 王玉婷, 孔祥平, 等. UPFC串联变压器启动试验保护配置方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 212-219.
LI Peng, WANG Yuting, KONG Xiangping, et al. Protection configuration method for start-up testing of UPFC series transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 212-219.
- [11] 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.
- [12] 张晓宇, 顾乔根, 文继峰, 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.
ZHAN 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.
- [13] 刘俊磊, 乔小敏, 杨韵, 等. 基于UPFC&DC-SDC的交直流电网低频振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 73-79.
LIU Junlei, QIAO Xiaomin, YANG Yun, et al. Study on damping low frequency oscillation of an AC/DC power grid based on UPFC & DC-SDC [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 73-79.
- [14] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器工程实践—南京西环网统一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—Nanjing west power grid network unified power flow controller demonstration project [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 21-31.
- [15] 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.
- [16] 刘畅, 吴军, 郝露茜, 等. 基于直流潮流的UPFC优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 42-48.
LIU Chang, WU Jun, HAO Luxi, et al. Optimization configuration research of UPFC based on DC power flow [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 42-48.
- [17] 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.
- [18] 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): 98-107.
WANG Yi, GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, et al. Analysis of interturn fault of UPFC series transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 98-107.
- [19] 张宁宇, 刘建坤, 陈静, 等. 基于柔性负荷及UPFC的低频振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 82-87.
ZHANG Ningyu, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Low frequency oscillation suppression method based on flexible load and UPFC [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 82-87.
- [20] 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.
- [21] 孙蓉, 朱梓荣, 卫志农, 等. 计及UPFC的电力系统多阶段多目标无功优化算法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 76-85.
SUN Rong, ZHU Zirong, WEI Zhihong, et al. Multi-objective

- and multi-stage reactive power optimization algorithm for power system considering UPFC [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1):76-85.
- [22] 阎博,江道灼,吴兆麟,等. 具有短路限流功能的统一潮流控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4):69-73.
YAN Bo,JIANG Daozhuo, WU Zhaoling, et al. Design of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4):69-73.
- [23] 刘黎明,康勇,陈坚,等. 统一潮流控制器控制策略的研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10):114-119
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Control scheme and implement of a unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10):114-119.
- [24] 余越,郭雅蓉,李岩军,等. 基于CT拖尾电流截断算法的失灵保护延时优化研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1):285-290.
YU Yue, GUO Yarong, LI Yanjun, et al. Research on delay optimization of breaker failure protection based on the CT current tail truncation algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 41(1):285-290.
- [25] 田庆. 直流滤波器差动保护误动作分析[J]. 高压电器, 2012, 48(9):22-26.
TIAN Qing. Analysis on misoperation of DC filter differential protection[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9):22-26.

作者简介:



吴奕

吴奕(1969),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护工作(E-mail:wu_yi@js.sgcc.com.cn);

顾乔根(1986),男,通信作者,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护工作;

崔玉(1979),女,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护工作。

Transformer differential protection in UPFC system

WU Yi¹, GU Qiaogen^{2,3}, CUI Yu¹, HUANG Haidong¹, SUN Zhongmin^{2,3}, WANG Ye¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

3. NARI Group(State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Both parallel transformer and series transformer are core AC devices of unified power flow controller(UPFC), and special operating conditions of UPFC can easily affect transformer differential protection, which is the main protection for these two types of transformers. The differential protection could have various manifestations under different operation conditions and varied faults. In order to evaluate the affection for differential protection from different kinds of faults, the factors that may impact the sensitivity and reliability of differential protection are discussed when faults happen based on the control system of actual UPFC project. According to the simulation results of typical internal and external faults, the behavioral characteristics of differential protection are analyzed, and the adaptability analysis of differential protection is formed as well. The relationship between valve control protection and AC relay protection in aspect of protecting equipment are also discussed. A technical reference is provided for the implementation of AC relay protection of the UPFC project in terms of anti-misoperation and anti-rejection.

Keywords: unified power flow controller(UPFC); series transformer; parallel transformer; differential protection; adaptability analysis

(编辑 钱悦)