

档位不一致引起的换流变压器零序过电流保护动作分析

针对某换流站换流变压器在空充时星角换流变压器零序过电流动作进行分析,通过现场排查发现此次保护动作的根本原因在于星角换流变压器三相档位不一致,这一点和普通的接地故障不同。通过构建基于虚拟绕组的故障分析等效电路,从纵向故障的角度对此次零序过电流保护动作进行了理论分析。同时,建立仿真模型对理论分析和现场动作结果进行验证,仿真分析及理论分析结果和现场动作结果均一致,保护装置零序过电流保护动作属于正确动作。

路振宇 牛志雷 杜延辉 徐玉洁/许继电气股份有限公司

0 引言

高压直流输电在远距离大容量输电和电力系统联网方面具有明显的优点,已在我国西电东送和全国联网工程中起到了重要的作用^[1-2]。在高压直流输电系统中,换流变压器是十分重要的设备,通过换流变压器实现了交流系统和直流部分的电气绝缘和隔离,同时为换流阀提供相位差为30°的换相电压。换流变压器组通常由星角接法的变压器和星星接法的变压器并联构成^[3-5]。

换流变压器处在交流电和直流电互相变换的核心位置,其可靠性和可用性对于整个系统是尤为关键的,因此换流变压器的保护功能应该根据其自身的特点尽可能地完善和可靠。

1 零序过电流保护动作情况

某换流站在对极1高端换流变压器进行空载合闸时,3套冗余换流变压器保护中的零序过电流保护均动作,跳开换流变压器进线断路器,并发出阀控ESOF信

号。该直流换流站换流变压器电气量保护采用三重化配置,只有当两套及两套以上换流变压器保护均动作后才能出口跳闸。表1为零序过电流保护定值。

表1 零序过电流保护定值

定值名称	数值	说明
零序过电流1段	0.15 A	
零序过电流1段延时	6 s	
零序过电流2段	0.15 A	两段定值一致
零序过电流2段延时	6 s	相当于1段
零序二次谐波控制	0	无谐波闭锁

调取换流站现场故障录波器录波后发现,星角换流变压器在充电时,网侧A、B两相电流二次侧值均为0.16 A,方向一致,网侧C相电流二次侧值约为0.22 A,方向与A、B两相一致。换流变压器中性点二次侧零序电流为0.54 A,远大于定值,6 s后换流变压器零序过电流保护动作。零序过电流保护动作后从现场故障录波器中调取保护动作波形,如图1、图2所示。

该换流站换流变压器主要额定参数如表2所示。

表2 换流变压器主要额定参数

名称	额定参数
容量/MV·A	3×404
网侧额定电压/kV	530
阀星侧额定电压/kV	171.4
阀角侧额定电压/kV	171.4
短路阻抗百分比 $U_k\%$	0.195
网侧TA电流比	2 000/1
零序TA电流比	2 000/1
调档范围	-5/+23
调档步长	1.25%



路振宇/工程师

关键词/Keywords

换流变压器·
零序过电流保护·
虚拟绕组·
纵向故障·

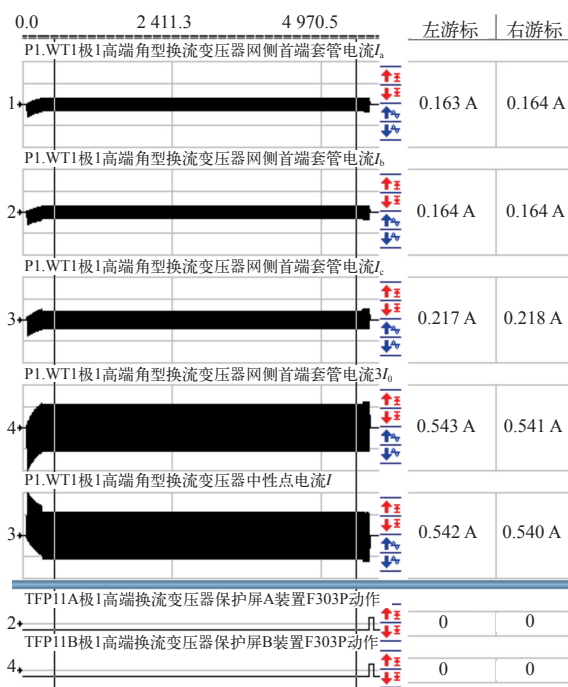


图1 换流变压器保护动作波形

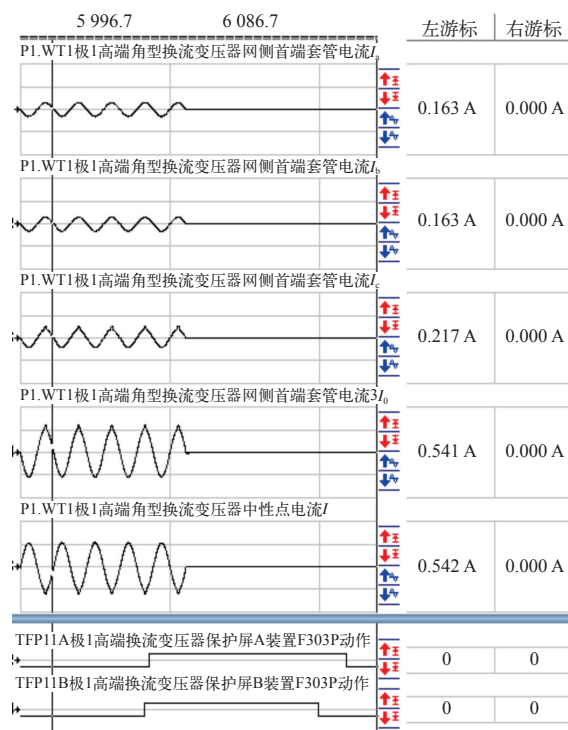


图2 保护动作波形 (局部放大)

换流变压器二次额定电流为

$$I_c = \frac{S}{\sqrt{3}UN} = \frac{3 \times 404 \text{ MV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 530 \text{ kV} \times 2000} = 0.66 \text{ A}$$

换流变压器零序过电流保护动作发生后, 经

检修人员现场排查, 发现星角换流变压器三相档位不一致。A、B两相工作在1档, C相工作在2、3档。现场换流变压器采用升档升压模式, 即高档位对应换流变阀侧电压较高。因此, 档位高时网侧绕组投入匝数较少, 档位低时网侧绕组投入的匝数较多。引起该现象的原因在于星角换流变压器三相分接头机械故障, 导致运行人员在监控后台下发换流变压器调档命令时, C相因档位调节机构机械故障未能正确调节到1档, 而后台却显示三相档位一致。零序过电流保护动作后从现场故障录波器中调取保护动作波形, 见图1、图2。

2 零序过电流保护原理

2.1 保护配置

按照换流变压器保护设计规范, 换流变压器网侧零序过电流保护作为换流变压器中性点直接接地运行时网侧绕组、换流变压器引出线和母线接地故障的后备保护以及相邻输电线路接地故障的后备保护^[6]。

以现场微机型换流变压器保护为例, 星角换流变压器和星星换流变压器均配置了零序过电流保护, 并可通过整定相关定值控制字来选择各段零序过电流是否投入及是否经二次谐波闭锁。零序过电流保护采用换流变压器中性点专用零序TA的电流, 保护装置配置有两段定时限零序过电流保护, 采用相同的定值, 同时保护配置有零序反时限保护, 但是按照国调中心定值整定书, 零序反时限保护不投入。定时限零序过电流保护采用中性点专用零序TA。

$$3I_0 > I_{0op} \quad (1)$$

式中, I_{0op} 为零流动作电流整定值。

2.2 保护配置

为了减少直流系统的谐波含量, 现代高压直流输电换流单元一般采用12脉动形式, 这样就需要换流变压器采用Y0/y和Y0/d11两组变压器并联的接线形式, 为换流阀提供相位差为30°的换相电压^[7-8]。现场换流变压器保护装置分别利用星星换流变压器和星角换流变压器中性点TA构成零序

过电流保护,如图3所示。

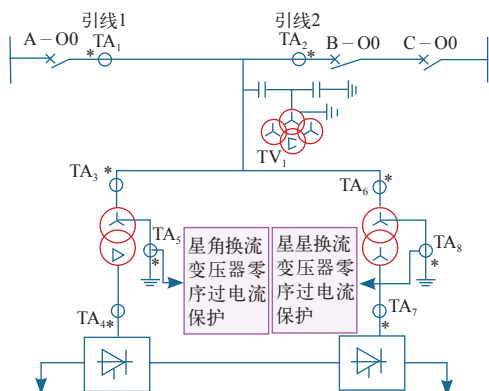


图3 换流变压器零序保护配置

3 保护动作原因分析

3.1 换流变压器零序阻抗等效回路

星角换流变压器和星星换流变压器的零序回路及零序电抗等效电路图分别如图4、图5所示^[7]。

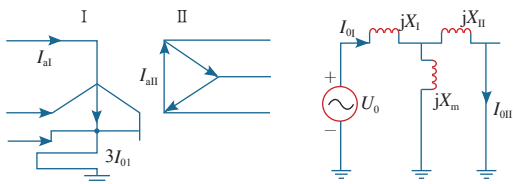


图4 星角换流变压器零序电抗等效电路

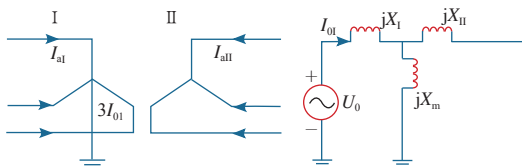


图5 星星换流变压器零序电抗等效电路

根据图4中的等效电路,可求得此种接法换流变压器的零序电抗为

$$X_{T0} = X_1 + \frac{X_{II} X_m}{X_{II} + X_m} \quad (2)$$

根据图5中的等效电路,可以求得此种接法换流变压器的零序电抗为^[3-4]

$$X_{T0} = X_1 + X_m \quad (3)$$

式(2)、式(3)中, X_1 、 X_{II} 和 X_m 分别为换流变压器一次侧的漏抗、二次侧的漏抗和励磁电抗。直流输电中的星星换流变压器和星角换流变

压器均由3台单相变压器组成,其零序磁通能以铁心为回路。由于磁导大,励磁电抗远大于漏抗。

星角换流变压器的零序电抗为

$$X_{T0} = X_1 + \frac{X_{II} X_m}{X_{II} + X_m} \approx X_1 + X_{II} \quad (4)$$

星星换流变压器的零序电抗为

$$X_{T0} = X_1 + X_m \approx \infty \quad (5)$$

可以看出,星星换流变压器的零序电抗很大。因此,分析本次零序过电流保护动作时可以只分析星角换流变压器,忽略星星换流变压器零序电抗的影响。

3.2 绕组不对称等效分析

本次零序过电流保护动作,并未有接地故障发生,不具备单相接地或者短路等横向故障特征^[10]。因三相分接头档位不一致,相当于换流变压器一次投入的绕组匝数不同,实际接线图如图6所示。

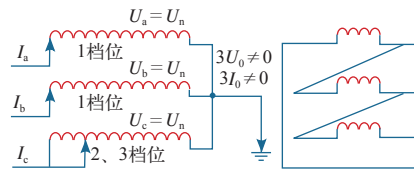


图6 Y0/d11换流变压器实际接线图

如果将各相绕组等效为一个实际绕组和一个虚拟绕组的并联,A、B两相虚拟绕组处于断开状态,C相虚拟绕组处于投入状态,如图7所示。

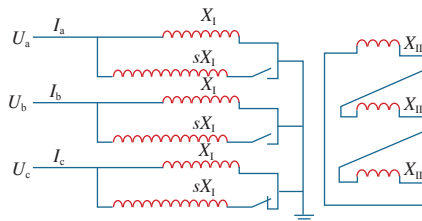


图7 Y0/d11换流变压器等效接线图

进一步可将换流变压器网侧绕组分解为两个Y0型联结的绕组,其中一个为完全对称的换流变压器网侧绕组,另一个为处于A、B两相断线状态的虚拟绕组,如图8所示。

虚拟绕组和正常的换流变压器网侧绕组匝数

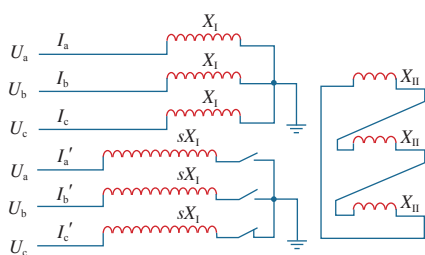


图8 等效三绕组变压器接线图

比，可由分接头档位差确定，现场换流变压器每调一档对应1.25%匝数变化，而C相绕组和A、B两相全绕组相比相差22档，即C相绕组和A、B两相全绕组相比实际仅投入其 72.5%的匝数。由串并联关系可求得虚拟绕组和实际绕组的匝数比为

$$1 - 22 \times 1.25\% = 72.5\% \quad (6)$$

$$s = \frac{72.5\%}{1 - 72.5\%} \approx 2.64$$

由电力系统故障分析对称分量法可知，A、B两相断线故障和C相单相接地故障具有相同的边界条件，会在C相回路中产生零序电流^[11-12]。此时在换流变压器阀侧三角形联结的三相绕组内产生大小相等方向一致的环流，其大小和换流变压器阀侧绕组与网侧虚拟绕组的匝数比成反比，假设换流变压器网侧绕组与阀侧绕组的匝数比为 n ，则网侧虚拟绕组和阀侧绕组的匝数比为 ns 。因此，阀侧三角形联结的三相绕组内则会产生的环流大小为

$$I = nsI'_c \quad (7)$$

该环流产生后，由于网侧实际绕组中心点接地，有零序电流通路，阀侧换流又会在网侧实际绕组感生出大小一致、方向相同的电流，即

$$I_a = I_b = I_c = \frac{1}{n} I = sI'_c \quad (8)$$

因此，对于换流变压器保护装置，其实际测到的电流为

$$\begin{cases} I_a = sI'_c \\ I_b = sI'_c \\ I_c = (s+1)I'_c = \frac{s+1}{s} I_a \approx 1.38 I_a \end{cases} \quad (9)$$

用保护装置动作时实际测到的三相电流有效值分别为0.16 A、0.16 A和0.22 A，进行校验，和

理论推导相符，说明理论推导有效。

$$\frac{I_c}{I_a} = \frac{0.22}{0.16} \approx 1.38 \quad (10)$$

式(10)、式(9)数值吻合，上述数据也和故障录波器录波文件中的基波幅值完全一致。下面通过仿真验证该结论的正确性。

4 建模仿真分析

建立6台分相的星角换流变压器和星星换流变压器并联模型，各换流变压器参数同现场换流变压器参数，通过三相网侧绕组接入匝数不一致来模拟星角换流变压器三相档位不一致，对星角换流变压器三相绕组不对称时进行空载充电的工况进行仿真分析。仿真模型如图9所示。

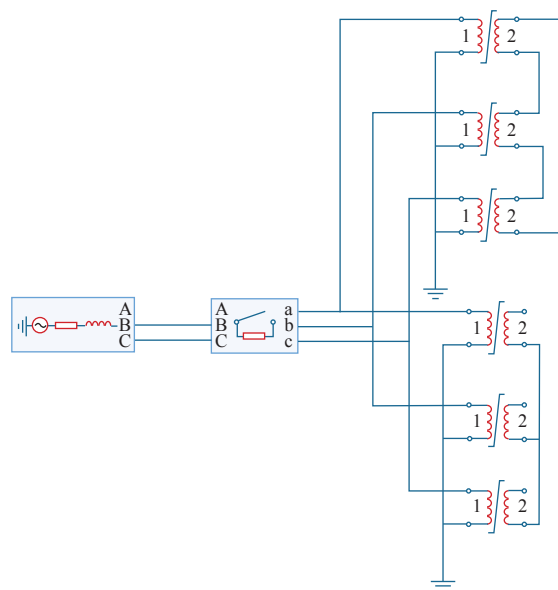


图9 换流变压器空载合闸仿真模型

测量此时流经星角换流变压器网侧三相电流及其中性点的零序电流，如图10所示。

从图10中可以看出，按照现场三相档位不一致设置换流变压器网侧绕组三相匝数比，流经换流变压器侧三相的电流及其中性点的零序电流幅值和方向与现场故障录波器录波及理论分析均一致。

改变三相绕组的不对称度，总结三相电流的比例关系，统计如表3所示。

从表3中可以看出，档位相差越大，实际测到的投入匝数较少的相和正常相电流比值越大，对

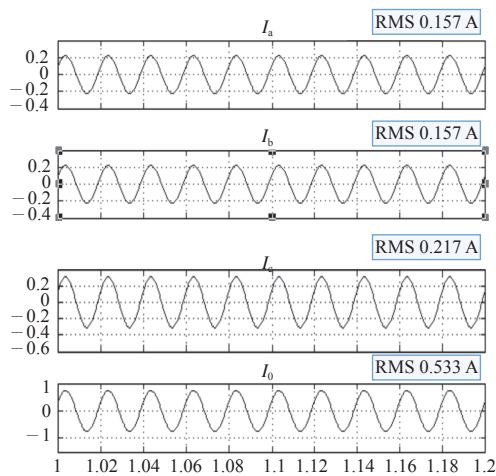


图10 换流变压器电流波形

表3 绕组不对称仿真结果统计

档差	匝数差 (%)	虚拟绕组匝数比s	预计电流比 (s + 1)/s	实测电流比	总零序电流/A
5	6.25	15	1.067	1.080	0.08
8	10	10	1.111	1.119	0.14
10	12.5	7	1.143	1.149	0.18
15	18.75	4.33	1.231	1.236	0.31
20	25	3	1.333	1.338	0.46
22	27.5	2.64	1.379	1.383	0.53
23	28.75	2.48	1.404	1.407	0.57
24	30	2.33	1.429	1.432	0.61

应的总零序电流越大。当档位相差大于8档时，所产生的零序电流数值已大于换流变压器保护的零序过电流定值，即会引起零序过电流保护动作。

5 结束语

通过一起某换流站换流变压器零序过电流保护事件，详细分析了换流变压器零序过电流保护的原理及此次事件的动作原因，联系现场实际从纵向故障的角度基于换流变压器虚拟绕组建立相关等效电路进行了理论分析。最后通过仿真分

析，验证了理论分析及现场保护动作正确性，并通过仿真得到了引起零序过电流保护动作所允许的临界档位差。所得结论为现场换流变压器档位不一致引起零序过电流保护动作提供了一种新思路。

参考文献

[1] 戴熙杰. 直流输电基础 [M]. 北京: 水力电力出版社, 1990.

[2] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理和应用 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[4] 国家电力调度通信中心. 国家电网继电保护培训教材 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[5] 刘万顺. 电力系统故障分析 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[6] 邹晓峰. 变压器与换流变保护相关问题研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[7] 刘家军. 直流输电中换流变压器零序过流保护的探讨 [J]. 中国电力, 2014, 47 (6) : 22-25.

[8] 马俊民. ± 800 kV特高压直流输电系统谐波研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (21) : 33-36.

[9] 刘涛. 一起变压器后备零序保护越级跳闸事故的分析 [J]. 电学报, 2013, 28 (4) : 309-312.

[10] 陈青. 一种求解电力系统复杂故障的新算法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (9) : 41-44.

[11] 刘云鹏. 两种非全相断线对偶性的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (23) : 14-17, 64.

[12] 邓木生. 新型换流变压器断线故障计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23 (4) : 100-105.

(收稿日期: 2015-06-05) EA

www.eage.com.cn

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告