

# 特高压交流试验示范工程主变保护误动作分析

田 庆

(南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663)

**摘要:** 笔者分析了特高压交流试验示范工程系统调试过程中出现的荆门站 1 000 kV 1 号主变压器空充跳闸事件。根据调压补偿励磁涌流的特点, 结合 1 000 kV 1 号主变压器调压补偿变保护二次谐波制动和波形分析制动的原理, 重点分析了 1 000 kV 1 号主变压器调压补偿变第 1 套保护装置 SGT756 和第 2 套保护装置 RCS978C 动作的原因。综合考虑调压补偿变差动保护的可靠性和安全性, 针对当前荆门站站设备的运行情况, 提出相应的改进措施: 改变直阻试验方法、增加去磁试验、改进保护原理。

**关键词:** 特高压交流试验示范工程; 励磁涌流; 波形对称; 调压变; 补偿变; 误动作

**中图分类号:** TM772

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1609(2011)02-0007-05

## Analysis on the Primary Transformer Protection Misoperation in UHV Pilot Project

TIAN Qing

(Test and Maintenance Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** The protection misoperation of 1 000 kV No.1 transformer in Jingmen Station was studied in this paper when transformer is charged during the system debug of UHV Pilot Project. The principle of second harmonic current restrained and wave symmetry restrained for regulating transformer differential protection was given according to the inrush current characteristic of regulating transformer. The reasons of the misoperation in SGT756 protection equipment and RCS978C protection equipment were analyzed separately. Three corresponding methods, changing the method of direct resistance test method, adding the erasing magnetism test and improving the protection principle, were put forward by the equipments operation situation in Jingmen station. When these methods were utilized in future China UHV project, the transformer protection reliability can be revised.

**Key words:** AC UHV pilot project; inrush current; wave symmetry; regulating transformer; compensating transformer; misoperation

## 0 引言

1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程是中国第一个特高压工程且将是世界上第一个以额定电压长期运行的特高压工程, 该示范工程自 2008 年 12 月 30 日 22 时通电试运行, 其后将有六横四纵的特高压电网发展战略规划, 因此试验示范工程设计、建设及运行的成败将在很大程度上影响到后续特高压电网的建设, 意义重大。在系统调试过程中, 荆门站 1 000 kV 1 号主变压器发生过空充跳闸。笔者分析了主变压器调压补偿变二套

保护装置误动作的原因, 并提出相应的改进措施。

## 1 主变压器保护接线简介

2008 年 12 月 30 日, 荆门站进行特高压系统第 2 阶段的调试工作, 在进行人工短路试验前的方式调整时, 需要对 1 000 kV 1 号主变压器进行充电, 操作前系统的运行状态: 百万伏特高压开关在热备用状态; 500 kV 荆斗 I、II、III 线在运行状态, 变压器 500 kV 侧 5011、5012 开关在热备用状态。07 时 09 分, 调试总指挥下令合上 5011 开关对主变压器空充时, 1 000 kV 1 号主变压器调压补偿变第 1 套保护装置 SGT 756 和第 2 套保护装置 RCS 978 C 动作,

跳开 5011 开关。

现场检查 1 000 kV 1 号主变压器及其调压补偿变外观无异常,差动保护范围内一次设备无故障迹象,瓦斯取气盒无瓦斯气体,二次设备运行正常。现场检查 5011 开关三相跳开正常,500 kV 荆斗 I、II、III 线运行正常。同时对故障录波、保护软件及定值进行了分析时,发现在故障录波显示,当合上 5011 开关后,调压补偿变差流波形呈现出明显的励磁涌流现象。在 1 号主变压器一次、二次设备检查均正常的情况下,国调下令重新投入空载变压器,运行人员合上 5011 开关,1 号主变压器充电正常。

## 2 故障分析

1 000 kV 变压器保护包括主体变保护、调压变及补偿变保护。主体保护由 RCS-978 HB 和 SGT 756 双重化配置,采用主后一体,主保护和后备保护采用同一套保护装置实现<sup>[1-3]</sup>。

### 2.1 调压变及补偿变主保护

调压变及补偿变装设差动保护,以保护调压变及补偿变绕组的匝间短路及接地短路。特高压变压器采用中性点调压方式,这主要是由变压器的自身特点来决定。1 000 kV 级变压器首先应该考虑的是绝缘问题<sup>[4]</sup>。如荆门站主变的变比为: $(1050/\sqrt{3})/525/[\sqrt{3} \times (1 \pm 4 \times 1.25\%)]/110$  kV,如采用线端调压方式,则调压装置的绝缘水平要求很高,其可靠性是难以保证的。主变和调压补偿变的连接见图 1,特高压变压器调压方式见图 2,其中 SV、CV、LV、TV、EV、LE、LT 分别代表串联绕组、公共绕组、低压绕组、调压绕组、励磁绕组、低压励磁绕组、低压补偿绕组。这种调压方式的最大优点是调压绕组和调压装置的电压低,绝缘要求低,制造工艺易实现,整体造价低。调压变压器与主变压器通过硬铜母线连接。调压补偿变由共用一个油箱的调压器和低压电压补偿器两部分构成,调压变压器的励磁线圈与主体变的低压线圈并联,低压电压补偿器的励磁线圈与调压线圈并联,补偿线圈与主体变的低压线圈串联。为了保证主变运行的可靠性和维护的方便,当调压部分出问题,若调压变在额定分接,主体变可与调压补偿变解开,单独运行。

主体变和调压补偿变联合运行方式下,调压变和补偿变占整个变压器的匝数相对较少,两者匝对匝间的电压相对于主变压器来说也很小,当调压变或者补偿变发生轻微匝间故障情况下,折算到整个变压器来说会更加轻微,保护范围为整个变压器的差动保护很难在这种情况下动作。在北京中国电科

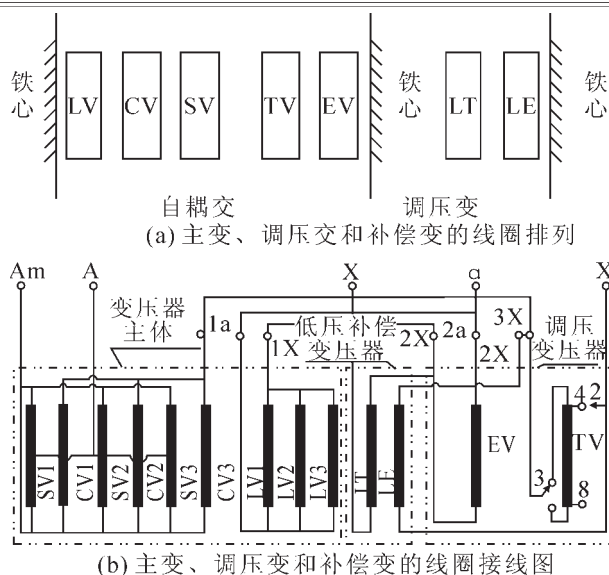


图 1 主变和调压补偿变的连接示意图

Fig.1 The connection diagram of main transformer, regulating transformer and compensating transformer

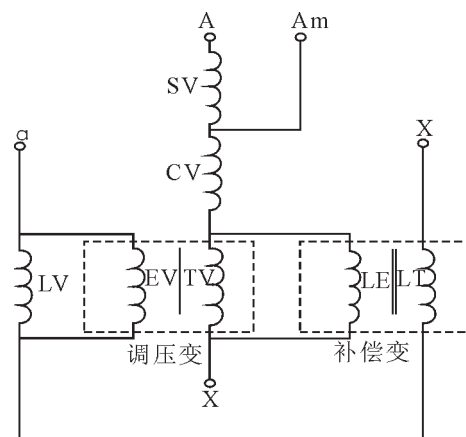


图 2 特高压变压器调压原理图

Fig.2 The principle diagram of UHV transformer voltage regulation

院进行 1 000 kV 变压器保护动模试验时,调压变 25%匝间故障时的最大差流波形见图 3。从图 3 波形可看出,即使调压变发生 25%的匝间故障,保护范围为整个变压器的差动保护感受到的差电流幅值也仅为  $0.47I_e$ ,当调压变短路匝比继续下降之后,差动保护甚至不能够起动,因此必须为调压补偿变单独配置差动保护,以具备切除调压变高压绕组 3%及以上匝间短路故障的能力,同时具备切除补偿变高压绕组 5%及以上匝间短路故障的能力。

特高压交流工程的设备均为首台首套,为确保设备的安全稳定运行,正常运行时主变的分接头在 3 档,即 538 kV 处。但是,在系统调试过程中,需进行满负荷试验,为提高系统稳定裕度,需将分接头调回 5 档即 525 kV 处。1 000 kV 变压器空载电流为 0.073%额定电流,可求得变压器的空载励磁电流

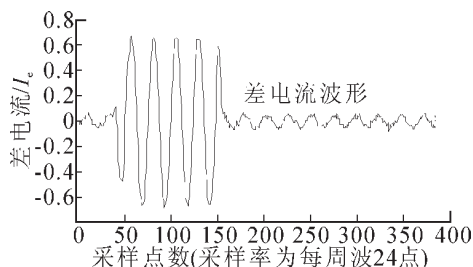


图3 调压变 25% 匝间故障时的最大差流

Fig.3 The maximum differential current during a 25% interturn fault in regulation transformer

约为 2.408 3 A, 变压器额定励磁时, 铁心的磁通基本接近饱和拐点。荆门站施工单位在调整完分接头后, 进行直流电阻测试时, 未解开主变套管与调压变套管之间的引线, 为缩短测试时间, 采用的电流为 10 A。因此, 直流电阻测试时, 变压器铁心中的磁场已饱和, 直流电阻测量结束后, 变压器铁心中的剩磁较大。

充电时调压变的差流见图 4, A、B 相出现了明显的励磁涌流波形, 含有高次谐波; 波形出现了明显的间断, 波形峰值越大, 间断角越明显; 含有大量的非周期分量, 使涌流偏向时间轴的一侧。然而 C 相的电流波形不同于常规的励磁涌流波形, 其幅值大于 A、B 相励磁涌流的幅值, 且励磁涌流波形特征不明显<sup>[5-6]</sup>。

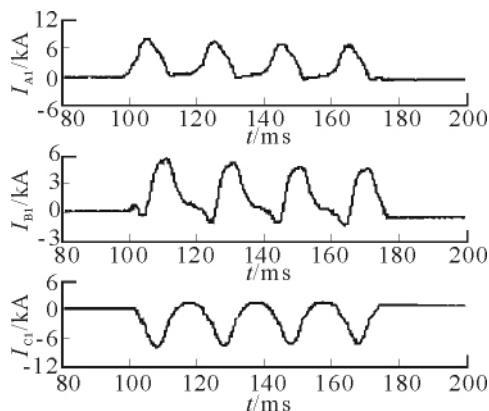


图4 调压变充电三相电流

Fig.4 The three phase currents when regulation transformer is charged

## 2.2 SGT 756 变压器保护装置动作分析

波形对称原理是将滤直后的差流波形的前半周和后半周进行对称性比较判断半个周波中(24 个点)波形的对称点数, 当对称点数满足条件时, 开放波形对称差动保护。波形对称原理为分相闭锁。差动电流要滤除直流分量。

通过保护装置测得, 调压变三相差流的不对称点数见表 1。

差流启动半个周波后, 开始计算、判断半个周

表 1 三相不对称点数

| Tab.1 Unsymmetry points of three phases |       |
|-----------------------------------------|-------|
| 相别                                      | 不对称点数 |
| A 相                                     | 18 点  |
| B 相                                     | 22 点  |
| C 相                                     | 6 点   |

波中(24 个点)波形的不对称点数, 式(1)即为波形分析制动判据。

$$\frac{i_d(i) + i_d(i + \pi)}{i_d(i) - i_d(i + \pi)} \geq f_{set} \quad (1)$$

半个周波中波形的不对称点数大于 10, 则判为励磁涌流。

如表 1 所示, 在空投变压器后, C 相差流滤直后, 不对称点数才达到 6 点, 低于门槛点数 10, 且 C 相涌流幅值较大, 导致波形对称未能闭锁差动保护, 保护动作出口。

## 2.3 RCS-978 C 3 变压器保护装置动作分析

合空变后, A 相差动电流二次谐波含量约为 21%~25%, B 相二次谐波含量约为 38%~40%, C 相二次谐波含量从合空变后到开关跳开大致为 2.5%~6.8%, 一直低于闭锁值。

RCS-978 C 变压器保护装置采用的是二次谐波分相闭锁原理, 二次谐波闭锁定制整定为 15%。A 相和 B 相差动电流的二次谐波含量都大于闭锁定值, 而 C 相差动电流的二次谐波含量低于闭锁定值, 因而差动保护 C 相满足动作条件, 保护发跳闸信号。

根据上述分析可知, 此次保护误动作的原因是: 由于分接头调整后, 大电流直阻试验后变压器铁心中剩磁较大。同时特高压变压器采用中性点调压方式, 或称变磁通调压, 当分接头从 1 变到 9 时, 调压变铁心中的主磁通从 -0.5 T 变化到 0.5 T。在调压过程中, 小变压器必须经过较大幅度的调压, 才能带来大变压器电压微小的变化。这样就必然要求调压变压器的调压范围非常大, 远远的超过了一般变压器的 20% 左右的调压范围。并且由于其调压机构开关的特殊性, 在调压过程中, 两侧电流的相对极性也会发生变化。因此, 该剩磁对调压变压器差动的影响较复杂。

## 3 处理方法

### 3.1 改变直阻试验方法

采用小容量的直流电源进行测量, 尽可能地减少调压变绕组上的剩磁。在保证绕组直流电阻测量精度的前提下, 首先采用 1 A 直流电源进行测量。

如不能保证测量精度,可增加测量电流最大至 2.5 A。进行调压补偿变的直阻试验时,需断开主变套管与调压补偿套管、调压补偿变与 110 kV 母线之间的引线。

### 3.2 增加去磁试验

为彻底消除剩磁对调压补偿变充电的影响,在运行中调整变压器分接头后,必须进行消磁工作,才能对变压器充电。

具体实施方法如下:

1) 3X、a、2X 套管与主变断开, x、X 套管与 110 kV 母线断开,在调压补偿变 3X 和 X 套管上接好试验线,去磁试验接线图见图 5。

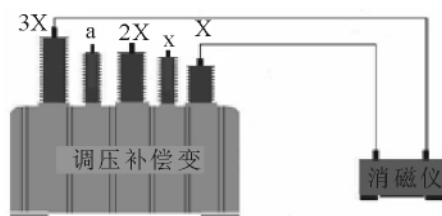


图 5 去磁试验接线图

Fig.5 The wire diagram of erasing magnetism test

2) 设定消磁电流为 2.5 A,与测量直流电阻时的电流一致。

3) 确认消磁电流与消磁次数是否一致。

4) 按“开始”键,去磁装置会在绕组中通以交变的、峰值不断降低的电流。

5) 当去磁电流峰值为 0.1 A 时,消磁工作完成。

### 3.3 改进保护原理

1 号调压补偿变保护 1(SGT 756)加大了涌流闭锁力度,将二次谐波和波形对称两种闭锁原理由原来的与门制动改为或门制动,即只要有一种原理满足判据就闭锁涌流<sup>[7-10]</sup>。

1 号调压补偿变保护 2(RCS 978 C 3)则做了如下改变:装置检测到变压器空投的情况下,自适应的投入 200 ms 的“三取二”闭锁方式,200 ms 过后自动切换回分相闭锁方式。即:装置突然通入电流,当任两相差流的二次谐波大于闭锁定值时,则闭锁比率差动保护 200 ms,200 ms 后切换回分相闭锁方式。

采取上述改进的方法后,2009 年 1 月进行特高压交流试验示范工程系统调试补充试验过程中,在进行长治站断路器单相分合试验、南阳站断路器单相分合试验时,长治、荆门站特高压主变分接头在  $(1\ 050/\sqrt{3})/(551/\sqrt{3})/110\text{ kV}$ ,在进行长南 I 线人工短路接地试验,长治站 1 000 kV 变压器分接头在  $(1\ 050/\sqrt{3})/(538/\sqrt{3})/110\text{ kV}$ ;荆门站 1 000 kV

变压器分接头在  $(1\ 050/\sqrt{3})/(544/\sqrt{3})/110\text{ kV}$ 。在调整分接头后,均采用上述方法进行了直阻试验和消磁工作,调压变的三相差流见图 6,与图 4 相比,可看出,具有较大剩磁的变压器,其冲击合闸涌流出现较大幅值的概率较经过消磁试验的变压器大很多。这主要由于变压器的合闸涌流除与铁心剩磁有关外,还与冲击合闸时的相角以及断路器是否带有合闸电阻等有关,如换流变压器断路器就带有合闸电阻,能很好地限制励磁涌流<sup>[11-15]</sup>。

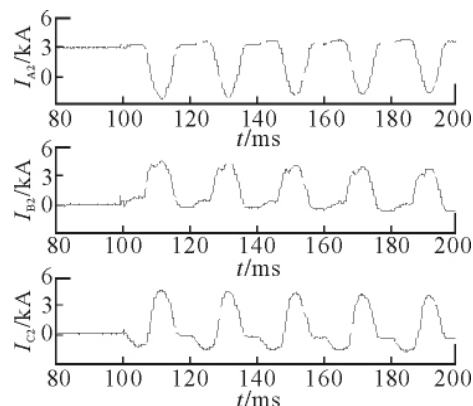


图 6 消磁后调压变充电三相电流

Fig.6 The three phase currents when regulation transformer is charged without residual flux

## 4 结语

笔者针对荆门站 1 000 kV 1 号主变器空充跳闸事故,结合 1 号调压补偿变第 1 套保护 SGT 756 和第 2 套保护 RCS 978 C 的原理对事故进行分析,并给出了相应的处理方法。特高压变压器采用中性点调压方式,由主体变、调压补偿变共同组成,且容量大、运行经验缺乏,对采用波形对称和二次谐波闭锁励磁涌流的差动保护提出了考验。在今后的运行中,需不断总结经验,保障特高压交流系统安全稳定运行。

## 参考文献:

- [1] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用[M].北京:中国电力出版社,2002.  
WANG Wei-jian.Principle and application of main electric equipment protection[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2002.
- [2] 田庆,王晓希.高压直流控制与保护系统配合不当分析[J].高压电器,2008,44(5):432-434.  
TIAN Qing,WANG Xiao-xi.Analysis of the mismatch of HVDC control and protection system[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(5):432-434.
- [3] 田庆,王晓希.换流阀三角形侧零序环流对阀短路保护

- 的影响[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 509-512.
- TIAN Qing, WANG Xiao-xi. Influence of converter transformer D-bridge zero sequence circulating current on valve short circuit protection[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 509-512.
- [4] 原敏宏, 李忠全, 田 庆. 特高压变压器调压方式分析[J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 172-174.
- YUAN Min-hong, LI Zhong-quan, TIAN Qing. Analysis on problems of voltage regulation for UHV transformer[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(4): 172-174.
- [5] 林湘宁, 刘世明, 杨春明, 等. 几种波形对称法变压器差动保护原理的比较研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(4): 44-49.
- LIN Xiang-ning, LIU Shi-ming, YANG Chun-ming, et al. Study on comparisons among some waveform symmetry principle based transformer differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(4): 44-49.
- [6] 马 静, 王增平. 基于标准化网格曲线时频域分析的励磁涌流鉴别新方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 78-81.
- MA Jing, WANG Zeng-ping. Analysis of normalized grille curve in time and frequency domains to identify magnetizing inrush[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 78-81.
- [7] 葛宝明, 于学海, 王玢珩, 等. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 44-48.
- GE Bao-ming, YU Xue-hai, WANG Xiang-heng, et al. A novel equivalent instantaneous inductance based algorithm used to distinguish inrush currents for transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 44-48.
- [8] 田 庆. 特高压交流试验示范工程主变保护配置探讨[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1540-1545.
- TIAN Qing. Configuration of transformer protection in UHV AC pilot project[J]. High Voltage Engineering 2009, 35(7): 1540-1545.
- [9] 田 庆. 特高压交流试验示范工程单相人工接地短路实测恢复电压分析[J]. 高压电器, 2010, 46(2): 1-4.
- TIAN Qing. Analysis on the measured recovery voltage in artificial single-phase grounding test for UHV AC pilot project[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(2): 1-4.
- [10] 田 庆, 原敏宏, 王志平. 交流特高压试验示范工程电容器保护配置、整定及应用原则探讨[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 68-71.
- TIAN Qing, YUAN Min-hong, WANG Zhi-ping. Configuration, setting and application of capacitor protection in UHV pilot project[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46 (3): 68-71.
- [11] TIAN Qing, LIN Xiang-ning, LIU Pei. A novel self-adaptive compensated differential protection design suitable for the generator with considerable winding distributed capacitance[J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 2007, 22 (2): 836-842.
- [12] TIAN Q, LIN X. Winding capacitance dividing scheme for a high-voltage cable-wound generator[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(3): 428-433.
- [13] 田 庆. 龙政直流开路试验分析[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 55-57.
- TIAN Qing. Analysis of longzheng HVDC open line test[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 55-57.
- [14] 田 庆, 林湘宁. Combination of reactive current droop compensation and line drop compensation for improving voltage stability[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 5-11.
- TIAN Qing, LIN Xian-gning. Combination of reactive current droop compensation and line drop compensation for improving voltage stability[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 5-11.
- [15] 张雪松, 何奔腾. 基于误差估计的变压器励磁涌流识别原理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 94-99.
- ZHANG Xue-song, HE Ben-teng. A new method to identify inrush current based on estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 94-99.

田 庆(1976—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为特高压交、直流输电运行检修技术。

## 简 讯

### 西安高压电器研究院有限责任公司

#### 特高压试验大厅工程荣获 2010 年度陕西省建设工程长安杯奖

近日,“西安高压电器研究所特高压试验大厅工程”荣获陕西省住房和城乡建设厅、陕西省建筑业协会颁布的“2010 年度陕西省建设工程长安杯奖(省优质工程)”。

特高压试验大厅建筑面积为 6 979.5 平方米,采用单层钢排架结构,具有良好的电磁屏蔽效应,在 0.5~1.5 MHz 范围内屏蔽效果为 80 dB。满足交流 1 100 kV、直流±800 kV 输变电设备、特别是开关设备和±800 kV 直流换流阀整体绝缘高压试验的要求。