

DOI: 10.7667/PSPC180430

## 基于瞬时功率理论的变压器 CT 接线校验方法

王冰清<sup>1</sup>, 李本瑜<sup>2</sup>, 宋晓亮<sup>1</sup>

(1. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057; 2. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011)

**摘要:** 变压器 CT 接线的正确性是变压器保护装置正确动作与测控装置准确工作的基础。为了解决现有主变 CT 二次回路接线校验方案准确性差、步骤复杂、效率低等问题, 提出一种基于瞬时无功功率理论的利用变压器空载合闸时所产生的励磁涌流来校验高压侧 CT 接线的方法。该方法通过分析励磁涌流的产生机理并利用其功率特性, 即可对变压器高压侧的 CT 极性及相序接线进行校验, 并在检测出 CT 接线错误的情况下, 经延时动作出口。在有效提升变压器新设备启动效率的同时, 提高了系统运行的可靠性。RTDS 仿真及实验验证了该方法的有效性。

**关键词:** 变压器保护; 励磁涌流; 瞬时无功功率理论; CT 极性校验

### Verification method for transformer CT wiring based on instantaneous power theory

WANG Bingqing<sup>1</sup>, LI Benyu<sup>2</sup>, SONG Xiaoliang<sup>1</sup>

(1. CYG SUNRUI CO., Ltd., Shenzhen 518057, China; 2. Yunnan Electric Power Dispatching Control Center, Kunming 650011, China)

**Abstract:** The correctness of the transformer CT wiring is the basis for the correct operation of the transformer protection device and the accurate operation of the measurement and control device. In order to solve the problems of poor accuracy, complicated procedures, and low efficiency of the current main transformer CT secondary circuit wiring verification scheme, a method based on the instantaneous reactive power theory utilizing the inrush current during the transformer no-load closing period to verify the high-voltage side CT wiring is proposed. By analyzing the inrush current's mechanism and using its power characteristics, this method can verify the CT polarity and phase sequence wiring on the high voltage side of the transformer. Once wiring errors are detected, the protection device will act after the delay setting. While effectively improving the startup efficiency of new transformer equipment, the reliability of system operation is improved. RTDS simulation and experiment validate the effectiveness of the method.

This work is supported by Science and Technology Project of Yunan Electric Power Company of China Southern Power Grid (No. YNKJXM00000511).

**Key words:** power transformer protection; inrush current; instantaneous power theory; CT polarity verification

## 0 引言

作为保护及测控系统的信号源, 变压器 CT 接线的正确性是变压器保护装置正确动作与测控装置准确工作的基础, 在防止故障范围扩大, 保障系统可靠运行方面起着重要的作用<sup>[1-5]</sup>。若 CT 接线错误, 极易造成变压器保护设备误动或拒动的情况发生, 对一次设备造成损害, 同时降低变电站的供电可靠性, 甚至可能会对电网造成较大的危害。因此新建或改扩建主变间隔的变电站送电前或者涉及到主变

CT 二次回路的更改变动场合时, 需要对 CT 二次回路进行详细检查及试验, 以确保回路接线的正确性。

在工程实践中, 新建或改扩建变压器间隔的变电站 CT 校验及投运启动方案一般包含电池组打 CT 极性、新设备冲击合闸、带负荷测试等步骤, 除了上述 CT 打极性的直流测试方法以及画六角图的带负荷测试方法, 常用的还有以下几种 CT 校验方法: (1) 通过合理调节变压器档位差使之产生循环电流, 再对三相电流及电压的相角差进行对比分析, 进而得出 CT 极性的连线正确性; (2) 采用启动负荷录波波形来分析保护极性, 将电压及电流峰值录波标定的时间差换算为相位角, 从而判断保护极性的正确性; (3) 基于测试仪输出的工频模拟量测量升流器二

次电流, 进而计算出 CT 一次电流和其二次输出的角度差以校验 CT 极性接线正确性<sup>[6-10]</sup>。上述方案有些准确性差, 有些施工难度较大, 有些步骤复杂, 效率和普适性有待提高。

本文提出一种基于瞬时无功功率理论的校验高压侧 CT 接线的方法, 该方法是通过利用变压器空载时励磁涌流的功率特性来实现的, 其基本原理如下: 变压器空载合闸时将产生较大的冲击励磁涌流, 通过分析励磁涌流的产生机理, 并利用其功率特性经逻辑处理, 即可校验变压器高压侧的 CT 极性及其相序。并且在检测出 CT 接线错误的情况下, 经延时动作出口, 能够有效提升系统运行的可靠性。

为了深入了解励磁涌流, 接下来首先对变压器空载合闸时励磁涌流产生的机理及特性进行分析。

### 1 励磁涌流的产生机理及特性分析

图 1 表示变压器空载时一次侧等效电路<sup>[11-16]</sup>, 其中  $R_1$  与  $L_1$  分别代表变压器绕组的导线等效电阻及漏电感;  $L_m$  表示励磁电感;  $R_h$  表示磁滞损耗的等效电阻;  $i$  表示流入变压器原边的电流, 即励磁电流;  $i_m$  表示流经励磁电感支路的磁化电流;  $i_h$  表示流经磁滞电阻的电流。

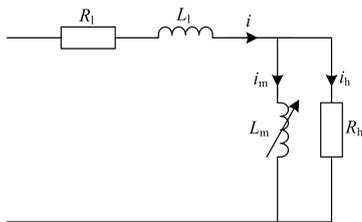


图 1 变压器一次侧等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit from primary side of transformer

利用基尔霍夫电压、电流定律及感应电动势得出一次侧回路的方程式为

$$\begin{cases} U_m \sin(\omega t + \alpha_0) = iR_1 + N \frac{d\phi}{dt} \\ i_h = \frac{N}{R_h} \frac{d\phi}{dt} \\ i = i_m + i_h \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_m$  表示电源电压峰值;  $\alpha_0$  表示电压合闸初相角;  $\phi$  表示与一次绕组交链的总磁通;  $N$  表示变压器一次侧绕组的匝数。在不考虑  $R_1$  影响下解微分方程得

$$\begin{aligned} \phi = & -\frac{U_m}{\omega N} [\cos(\omega t + \alpha_0) - \cos \alpha_0] + \phi_r = \\ & -\phi_m [\cos(\omega t + \alpha_0) - \cos \alpha_0] + \phi_r \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\phi_r$  表示剩磁;  $\phi_m$  表示稳态磁通的幅值。可知, 励磁涌流  $i$  由流经磁滞电阻支路的电流  $i_h$  与流经励磁电感的电流  $i_m$  构成, 其中  $i_h$  与磁通  $\phi$  的相对关系可以通过式(1)得到, 而  $i_m$  与磁通  $\phi$  的关系, 需借助磁化曲线来进行说明。

图 2 表示变压器铁芯的基本磁化曲线及磁滞回环, 可以看出, 变压器的磁化曲线是非线性的, 当  $\phi < \phi_s$  时, 变压器铁芯未饱和, 励磁电抗大,  $i_m$  很小; 当  $\phi > \phi_s$  时, 变压器工作在饱和区, 磁通的小幅增长都会导致  $i_m$  的急剧增加。

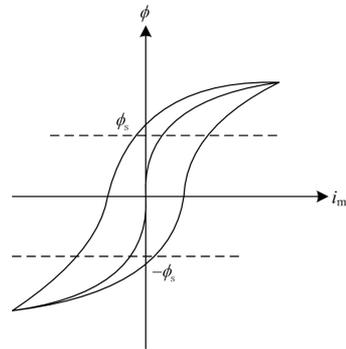
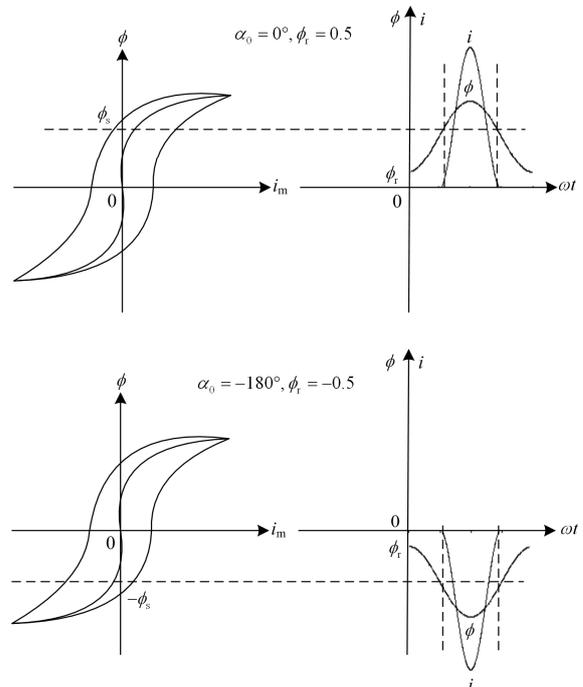


图 2 变压器铁芯基本磁化曲线及磁滞回环

Fig. 2 Fundamental magnetizing curve and hysteresis loop of transformer core

图 3 表示不同的合闸角与剩磁条件下, 磁通  $\phi$  及励磁电流  $i$  随时间变化的波形。可以看出, 励磁涌流的大小和方向受铁芯饱和程度的影响较大, 而铁芯的饱和程度与变压器的剩磁、合闸角有关。



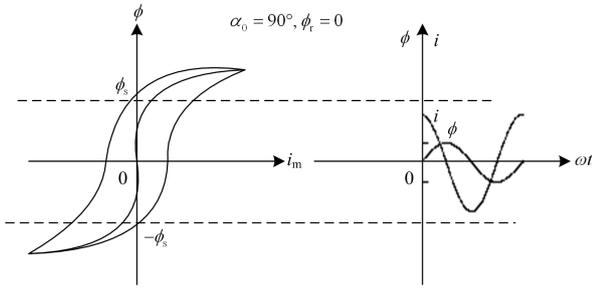


图3 磁通及流经励磁支路的电流

Fig. 3 Magnetic flux and current flowing through the magnetizing branch

由于三相变压器各相接入电压的初始相角不同, 加之绕组的连接方式及磁路结构的影响, 三相变压器空载合闸时各相产生的励磁涌流大小和波形均会不同; 三相励磁涌流波形也不完全偏离时间轴的一侧, 某一相可能会出现对称性的电流, 而另外两相仍为偏离时间轴一侧的非对称性涌流。

## 2 基于瞬时无功理论的 CT 接线校验

由上述分析可知, 变压器空充时, 励磁电流急剧增加, 变压器在此过程中虽有一定的有功损耗, 但远小于其无功损耗值。因此从根本上表现为励磁涌流状态下, 磁场能量交互过程的物理量是无功功率。而在此暂态过程中三相电压、电流表现为畸变的不对称状况, 目前针对非正弦条件下无功功率的定义和计算主要有三大学派: Budeanu 定义采用频域分析方法; Fryze 定义采用时域分析方法; Akagi 提出的瞬时无功功率理论<sup>[17-24]</sup>。

由于瞬时无功功率理论基于能量守恒原则, 充分考虑了变压器的非线性时变特征, 从瞬时的角度理解和计算有功、无功功率, 适用于三相电路的暂态(畸变)过程, 是传统功率理论的延伸且涵盖传统功率理论的内容。因此, 这些理论可被借鉴和引用到校验主变高压侧 CT 接线的方法中来。

### 2.1 瞬时无功功率理论

假设  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  以及  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  分别表示三相电压、电流的瞬时值, 经 Clark 变换并利用瞬时有功、瞬时无功的定义, 则有<sup>[19]</sup>

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (3)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(u_b - u_c) i_a + (u_c - u_a) i_b + (u_a - u_b) i_c] \quad (4)$$

式中:  $p$  表示系统的瞬时有功功率;  $q$  表示系统的瞬时无功功率。

可以看出, 三相电压、电流的瞬时值共同决定了系统瞬时功率的大小及正负。当三相电压、电流

均为正弦对称时, 有

$$\begin{cases} p = 3UI \cos \psi \\ q = 3UI \sin \psi \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $U$  表示电压的有效值;  $I$  表示电流的有效值;  $\psi$  表示电流滞后电压的角度。可以看出, 瞬时无功功率理论是传统功率理论的延伸并涵盖了传统功率理论的内容, 适用于畸变及暂态过程分析。

### 2.2 变高侧 CT 接线校验

传统功率理论是建立在平均值基础上的, 但当系统出现畸变不对称时, 基于一个时间窗内的平均值不能准确描述电压、电流等物理量的突变, 而利用电压电流的瞬时值计算出的系统瞬时功率, 将有功率和无功功率突破了时间平均值的概念, 引申成为瞬时量, 其瞬时变化直观反映了电压电流的瞬时变化引起的功率变化。

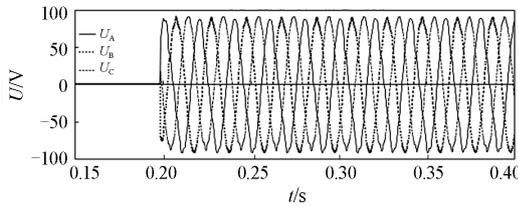
在对称三相电路中, 各相的瞬时无功功率幅值恒定不变, 系统的瞬时无功功率  $q$  也为恒定值; 而当系统畸变不对称时, 瞬时无功功率  $q$  是一个随时间变化的值。将功率引申为瞬时量后, 系统的瞬时无功功率  $q$  反映了某一时刻系统三相电路之间来回传递的功率。

由上述分析可知, 变压器处于励磁涌流状态时, 励磁电抗急剧减少, 励磁涌流迅速增大, 变压器磁场储能急剧变化, 变压器与外部进行大量且快速的能量交换, 表现为变压器无功损耗的增加。从另一个角度来分析, 励磁涌流仅流经一次绕组及铁芯, 磁通落后电压  $90^\circ$ , 而结合磁路中的欧姆定律可知, 电流与磁通同相位, 因此电流落后电压  $90^\circ$ , 即一次侧绕组漏抗与激磁电抗吸收无功。因此对于变高侧来讲, 若 CT 接线正确, 检测到的系统瞬时无功功率应满足  $q > 0$ ; 若出现  $q < 0$  的情况, 肯定对应有 CT 接线错误的情况发生。

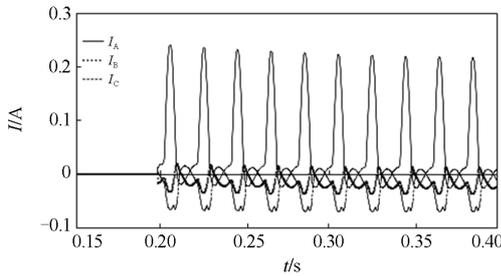
## 3 仿真与实验验证

基于上述研究, 利用 RTDS 平台搭建仿真模型, 参数设置如下: 容量为 180 MVA 的三卷变, 接线方式为 YY $\Delta$ , 变高侧 A 相空载合闸初始合闸角  $\alpha_0 = 0^\circ$ , 剩磁  $\phi_r = 0.26$ 。图 4 表示 CT 接线正确的情况下变高侧的电压、电流波形以及系统的无功功率波形。可以看出三相励磁涌流大小和波形不尽相同, 且 A、C 相涌流特性比较明显, 在 CT 接线正确的情况下, 系统瞬时无功功率  $q > 0$ 。

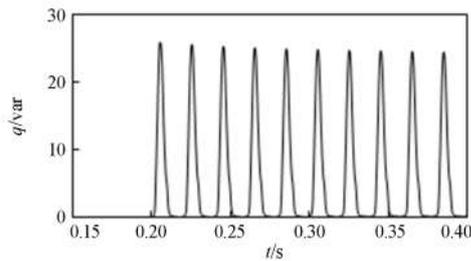
图 5 表示 A、B、C 三相的 CT 极性分别接反的情况下系统的无功功率波形, 可以看出任何一相 CT 极性接反均出现了瞬时无功功率  $q < 0$  的点。



(a) 变压器高压侧三相电压波形



(b) 变压器高压侧三相电流波形

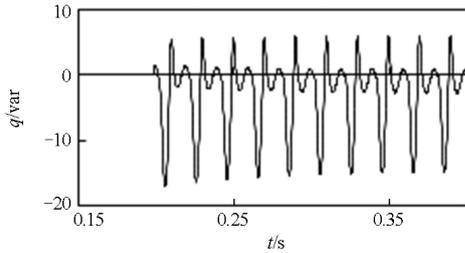


(c) 瞬时无功功率波形

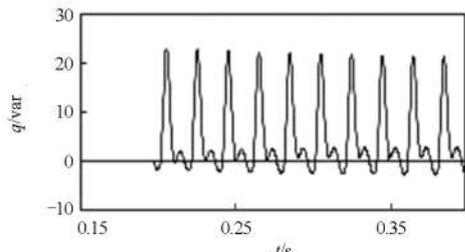
图 4 CT 接线正确情况下的波形

Fig. 4 Waveforms in the case of correct CT wiring

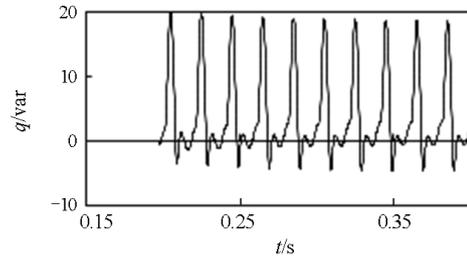
图 6 表示 A、B、C 三相的 CT 相序接错的情况下系统的无功功率波形，可以看出任何一相 CT 相序接错均出现了瞬时无功功率  $q < 0$  的点。



(a) A 相 CT 极性接反瞬时无功功率波形



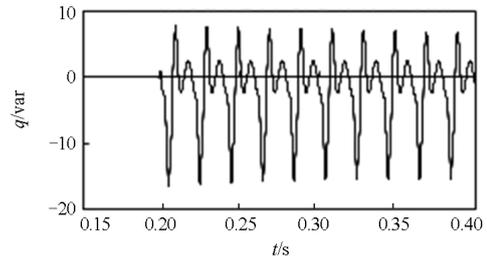
(b) B 相 CT 极性接反瞬时无功功率波形



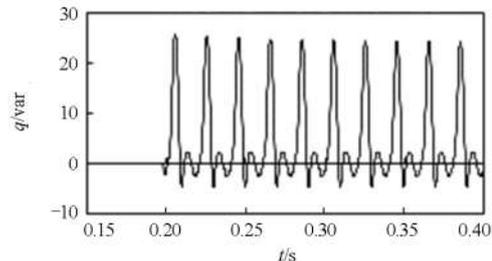
(c) C 相 CT 极性接反瞬时无功功率波形

图 5 CT 极性接反情况下的波形

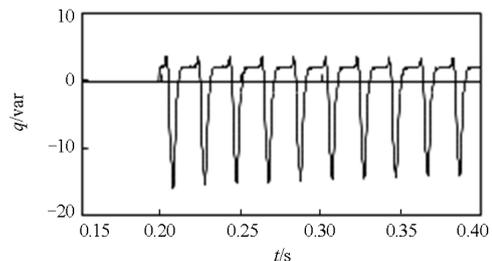
Fig. 5 Waveforms in the case of CT polarity reversal wiring



(a) A、B 相序接错瞬时无功功率波形



(b) B、C 相序接错瞬时无功功率波形



(c) A、B、C 相序接错瞬时无功功率波形

图 6 CT 相序接错情况下的波形

Fig. 6 Waveforms in the case of CT phase sequence error

以山西晋中韩村变现场变压器空充时的波形为分析对象，系统的无功功率波形如图 7 所示，可以看出三相励磁涌流大小和波形不尽相同，且 A、C 相涌流特性比较明显，在 CT 接线正确的情况下，系统瞬时无功功率  $q > 0$ 。

在 A、B、C 三相 CT 极性分别接反的情况下，求解对应的瞬时无功功率波形如图 8 所示，可以看出，此时均出现了瞬时无功功率  $q < 0$  的点。

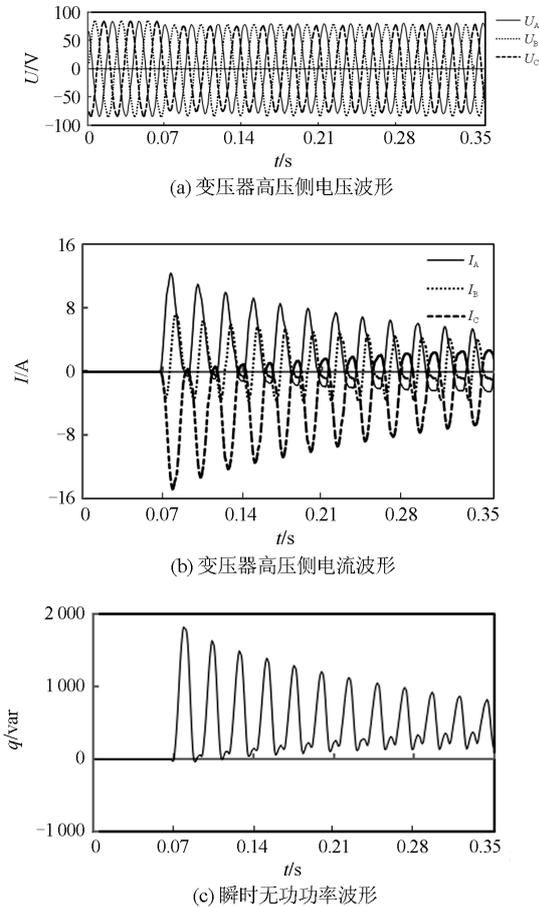


图 7 现场 CT 接线正确情况下的波形

Fig. 7 Waveforms in the case of correct CT polarity wiring on project site

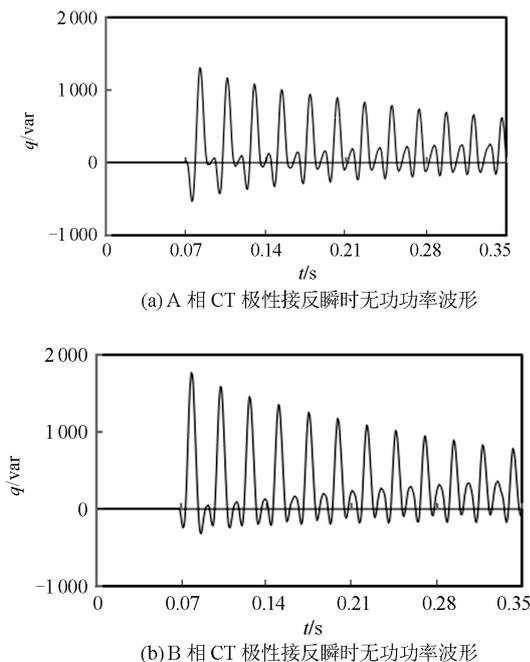


图 8 CT 极性接反情况下的波形

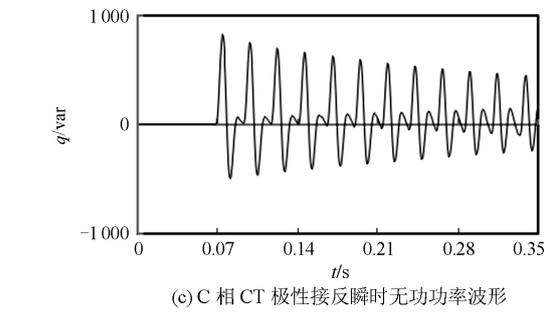


图 9 A、C 相 CT 相序接反情况下的波形

Fig. 9 Waveforms in the case of CT polarity reversal wiring

若 A、C 两相的 CT 相序接反, 求解出的系统的瞬时无功功率波形如图 9 所示, 此时出现了瞬时无功功率  $q < 0$  的点。

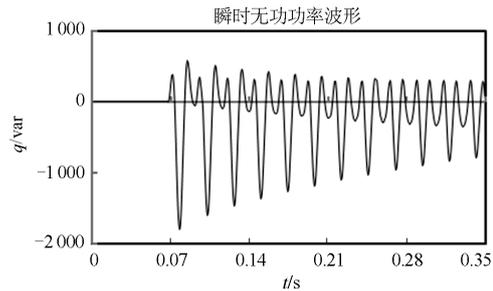


图 9 A、C 相 CT 相序接反情况下的波形

Fig. 9 Waveforms in the case of CT phase sequence reversed in A and C

因此, 在变压器空载合闸阶段, 可以利用励磁涌流的功率特性对变压器高压侧的 CT 接线进行校验。

#### 4 结论

本文对现有的主变 CT 二次回路接线校验方案准确性差、步骤复杂、效率低等问题, 提出一种基于瞬时无功功率理论的利用变压器空充时励磁涌流的功率特性来校验变高侧 CT 接线的方法。该方法能够校验变压器高压侧的 CT 极性及相序, 并且在检测出 CT 接线错误的情况下, 经延时动作出口。在有效提升变压器新设备启动的效率的同时, 提高了系统运行的可靠性。

#### 参考文献

[1] 李志远, 张思齐, 李超, 等. 主变带负荷相量测试软件的编制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 133-136. LI Zhiyuan, ZHANG Siqi, LI Chao, et al. A software for drawing phasor diagram used on transformer on-load test[J]. Power System Protection and Control, 2017,

- 45(6): 133-136.
- [2] 余祥坤, 吕艳萍, 杨丽, 等. 与ECT混合用于差动保护的电磁型CT的校验方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 275-280.  
YU Xiangkun, LÜ Yanping, YANG Li, et al. A verification method for electromagnetic current transformers mixedly applied in differential protection with electronic current transformers[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 275-280.
- [3] 江卫良, 郝后堂. 变压器采样值差动保护误动分析及改进[J]. 现代电力, 2012, 29(2): 37-40.  
JIANG Weiliang, HAO Houtang. Analysis and improvement on malfunction of sampled value differential protection for transformer[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(2): 37-40.
- [4] 盛方正, 王文成, 陈亚子. 电流互感器二次侧并联接入变压器差动保护装置的问题研究[J]. 现代电力, 2011, 28(4): 35-39.  
SHENG Fangzheng, WANG Wencheng, CHEN Yazhi. Research on parallel access of transformer differential protection device at the secondary side of CT[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(4): 35-39.
- [5] 杜姣, 陆于平, 朱国防. 幅值相位双判据变压器差动保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 79-85.  
DU Jiao, LU Yuping, ZHU Guofang. Differential protection algorithm with double criterions of amplitude and phase angle for transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 79-85.
- [6] 吕斌, 倪赛赛, 张捷尚, 等. 一种应用启动负荷录波波形分析保护极性的新方法[J]. 工矿自动化, 2012(6): 58-61.  
LÜ Bin, NI Saisai, ZHANG Jieshang, et al. A new method of applying waveform record of starting load to analyze protection polarity[J]. Industry and Mine Automation, 2012(6): 58-61.
- [7] 张静伟. 500 kV 并联电抗器中性点小电抗极性测试方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 241-243.  
ZHANG Jingwei. A new method to check the polarity of neutral reactor for 500 kV shunt-reactor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 241-243.
- [8] 兀鹏越, 王团结, 陈少华, 等. 利用一次电流检验电流互感器二次回路的方法[J]. 电力建设, 2011, 32(2): 88-91.  
WU Pengyue, WANG Tuanjie, CHEN Shaohua, et al. Test method for accuracy of second circuit using primary current[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(2): 88-91.
- [9] 田野. 差压环流法测量主变差动保护相位现场分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 152-157.  
TIAN Ye. Scene analysis of measuring the phase of main transformer differential protection by differential voltage circulation method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 152-157.
- [10] 原爱芳, 杨兆阳, 罗明辉, 等. 继电保护方向元件的带负荷校验方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 164-168.  
YUAN Aifang, YANG Zhaoyang, LUO Minghui, et al. Research on on-load test of the direction element relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 164-168.
- [11] 杨通贇, 李晓华, 戴扬宇, 等. 换流变励磁涌流特性分析及其抑制[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 64-70, 78.  
YANG Tongyun, LI Xiaohua, DAI Yangyu, et al. Analysis on magnetizing inrush current characteristic of converter transformer and its suppression[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 64-70, 78.
- [12] 邓祥力, 高亮, 刘建峰, 等. 特高压变压器模型漏感参数的稳态识别方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 254-260.  
DENG Xiangli, GAO Liang, LIU Jianfeng, et al. Steady-state parameter identification of UHV transformer model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 254-260.
- [13] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.  
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.
- [14] 姚东晓, 张凯, 贺要锋, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 149-154.  
YAO Dongxiao, ZHANG Kai, HE Yaofeng, et al. Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 149-154.
- [15] 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.
- [16] WU Yahui, DONG Xinzhou, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based

- on Preisach theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [17] 古斌. 基于功率量的电力变压器保护新原理及高速算法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- GU Bin. Study on power transformer protection novel principle and high speed directional relay algorithm based on power quality[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [18] KUNIAKI Y. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.
- [19] 刘丽华, 魏新劳, 叶海蓉. 基于瞬时无功功率理论的无功功率检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 121-125.
- LIU Lihua, WEI Xinlao, YE Hairong. Measurement method of reactive power based on instantaneous reactive power theory[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3): 121-125.
- [20] 王臻, 李承, 许允之, 等.  $\alpha$ - $\beta$  坐标系下瞬时无功功率的笼型异步电机转子故障诊断[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 179-186.
- WANG Zhen, LI Cheng, XU Yunzhi, et al. Uniform mathematical description of instantaneous reactive power theory and conventional power theory and its physical meaning in  $\alpha$ - $\beta$  coordinates[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 179-186.
- [21] 周霏霏, 徐岩. 基于有功与无功相对大小的变压器励磁涌流鉴别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 69-72.
- ZHOU Feifei, XU Yan. A strategy based on the relative size of active and reactive power to identify transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 69-72.
- [22] 姜梦, 熊浩清, 邓晓璐, 等. 特高压直流系统异常运行下的功率特性研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 58-64.
- JIANG Meng, XIONG Haoqing, DENG Xiaolu, et al. Study on power characteristics of UHVDC under abnormal operation[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 58-64.
- [23] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
- MOU Chunhua, WU Pengyue, SUN Ganghu, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29-34.
- [24] 张瑜, 徐庶. 新型射频能量收集系统设计与分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 114-119.
- ZHANG Yu, XU Shu. Design and analysis of new RF energy harvesting system[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(1): 114-119.

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-07-24

作者简介:

王冰清(1989—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: wangbq@sznari.com

李本瑜(1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护技术管理;

宋晓亮(1982—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: songxl@sznari.com

(编辑 许威)