

DOI: 10.7667/PSPC160973

## 差压环流法测量主变差动保护相位现场分析

田野

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 对于工矿企业等用户变电所, 主变投运时由于设备正处于安装或调试阶段, 往往无法组织负荷, 故传统方法无法对主变差动保护相位正确性进行检查。以许昌地区 35 kV 某用户变电所为实例, 通过应用变压器环流法理论计算分析, 在供电公司工程师的指导下, 提出了用差压环流法测量主变差动保护相位从而对变压器保护电流互感器二次回路相位进行测量的方法, 从而解决了变压器差动保护 CT 二次回路相位测量问题。对系统内两台变压器运行的变电所, 亦可用此法进行变压器差动保护的电流相位测定。

**关键词:** 差压环流法; 差动保护; 相位; 并列运行; 理论计算

### Scene analysis of measuring the phase of main transformer differential protection by differential voltage circulation method

TIAN Ye

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** For the substations of industrial and mining enterprises, when the equipment is in installation or debugging stage, it is often unable to organize load for the main transformer. So, traditional method can not be used to check the correctness of transformer differential protection phase. Taking a 35 kV substation in Xuchang city as an example, with the theoretical calculation and analysis, this paper proposes a method of measuring main transformer differential protection phase and the secondary circuit phase of transformer protection CT. As a result, this method solves the problem of phase measurement of protection CT secondary circuit of transformer differential protection. For the substation where two transformers are in operation, this method can also be used to measure the current phase of the differential protection of the transformer.

**Key words:** differential voltage circulation method; differential protection; phase; parallel operation; theoretical calculation

## 0 引言

变压器差动保护关系着主变的安全可靠运行<sup>[1-3]</sup>, 差动保护的 CT 接线关系着差动保护的正确性。按照传统方法, 变压器投运前, 采用调整运行方式, 使主变压器低压侧带一条足够大负荷的出线, 测量继电保护差动回路的差电流或差电压, 以校核差动保护 CT 接线的正确性的方式。但对新变电所, 主变投运时低压出线侧往往还没有负荷, 导致传统的差动保护相量测量方法难以实施。

许昌地区 35 kV 及以上的变电所均按 N-1 原则设计, 装设有 2 台变压器, 正常运行时, 2 台变压器分列运行或 1 台运行、1 台冷/热备用。针对这种变电站, 提出了一种调整并列运行主变分压抽头产

生环流, 利用环流测量主变差动保护电流互感器相位的方法, 实践证明该方法具有很好的实用性<sup>[4-8]</sup>。

本文以许昌地区某 35 kV 变电所为例, 对所提出方法进行分析, 变电所一次接线如图 1 所示。

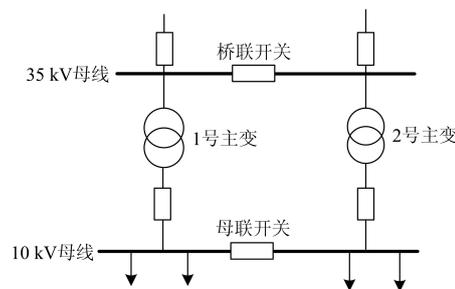


图 1 变电所一次接线图

Fig. 1 Primary connection diagram of the substation

## 1 变压器并列运行

### 1.1 变压器并列运行的条件

变压器并列运行可以提高供电可靠性、增大供电容量和降低供电损耗。规程规定变压器并列运行的基本条件如下所述。

1) 变比相等

变比差值不超过±0.5%，变压器变化不等时，两台变压器构成的回路由于相同相间产生的相位差而产生环流，环流的大小决定于两台变压器变比的差异大小。

2) 联结组序号必须相同

联结组别必须相同，否则，变压器的副边电压相位就不同，造成很大的环流，甚至烧毁变压器。

3) 短路电压相同

短路电压值不超过±10%，短路电压如不同，会使两台变压器的负载分配不均匀。

除上述3条之外，还应注意下面3个条件：

1) 一、二次电压等级对应相等；

2) 并列运行时相序对应；

3) 容量差不宜超过3:1，对于2台变压器并列运行的变电所，为实现N-1(完全备用)，2台变压器的容量应相同。容量差过大的后果是负荷分配难以达到理想的要求。

如果满足上述所有条件，则负荷功率将按各变压器的额定容量分配到各自的变压器，而且各变压器的负荷电流同相，每台变压器都运行在最佳状态，各变压器之间无环流。

### 1.2 变比不等的2台变压器并列运行

当2台变比不等的变压器并列运行时，在绕组回路中将引起环流 $I_h$ 。

2台变比不等的变压器空载并列运行情况如图2所示。

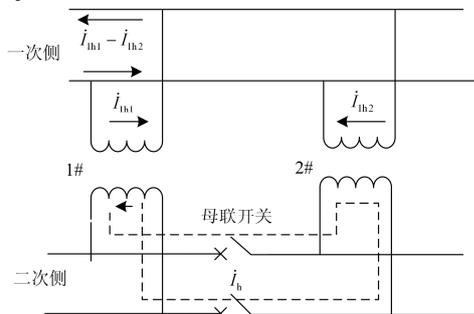


图2 变比不等时变压器空载并列运行

Fig. 2 Transformer no-load parallel operation with unequal ratio

图2中1#、2#变压器的一次侧已经接到了电源上，二次侧通过母联开关并列连接<sup>[9-13]</sup>。

## 2 环流法理论计算分析

### 2.1 不等变比变压器并列运行时的等值电路

某变电所1#、2#主变型号相同，参数基本相同。设在不同分接头下1#、2#主变的计算变比分别为 $k_1$ 、 $k_2$ ，且 $k_1 \neq k_2$ 。由于变比不等，因此在二次侧就存在一个 $\Delta U$ 电压差，并产生一个环流 $I_h$ 。为了计算方便，将一次侧各物理量折算到二次侧，忽略励磁电流，可得到并列运行时的简化电路如图3所示。

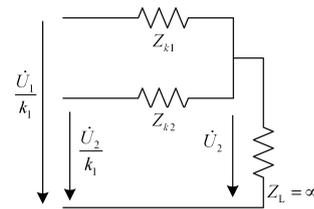


图3 环流计算简化电路图

Fig. 3 Simplified circuit diagram of general circulation calculation

### 2.2 不等变比变压器并列运行时的空载环流

空载运行时， $Z_L = \infty$ ，则 $I=0$ ，有：

$$I_h = \frac{\frac{U}{k_1} - \frac{U}{k_2}}{Z_{k1} + Z_{k2}} \quad (1)$$

由式(1)可知，当变压器一次侧母线电压 $U$ 及折算到二次侧的短路阻抗不变时，变压器环流 $I_h$ 与变压器变比倒数的差值成正比，反比于两变压器折算到二次侧的短路阻抗之和。因此可以通过调节两台变压器变比产生适当的环流值，以符合极性测试要求。

需注意的是，变比差越大，环流越大。由于变压器的短路阻抗很小，也会产生很大的环流。环流的存在，既占用了变压器的容量，又增加了变压器的损耗，这是很不利的。

为了保证变压器的安全，应使空载时环流不超过额定电流的10%，通常规定并联运行的变压器变比差不大于0.5%。

由于变比不等，假设

$$k_2 > k_1 \quad (2)$$

当母联开关合闸时，在2台变压器内部的二次绕组中形成环流 $I_h$ 。

$$I_h = \frac{\frac{U}{k_1} - \frac{U}{k_2}}{Z_{k1} + Z_{k2}} = \frac{\frac{S_B U}{\sqrt{3}k_1 \times U_B^2} \times (1 - \frac{k_1}{k_2})}{X_{T1} + X_{T2}} \quad (3)$$

式(3)中： $Z_{k1}$ 、 $Z_{k2}$ 为已经折算到二次侧的短路阻抗； $X_{T1}$ 、 $X_{T2}$ 分别为1#、2#变压器的阻抗标么值； $U$ 为系统所接高压侧实时电压； $U_B$ 为低压侧标称电压，因此可近似为式(4)。

$$U_B \approx \frac{U}{k_1} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中，可得：

$$I_h = \frac{\frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} \times \frac{k_1}{k_2}}{X_{T1} + X_{T2}} \quad (5)$$

如图1所示，1#、2#主变并列运行，2#主变固定在额定档位，1#主变自1档调至9档，根据式(5)， $S_B=100$  MVA,  $U_B=11$  kV,  $X_{T1}=X_{T2}=7.46/10=0.746$ ，主变在低压侧产生的环流如表1所示。

表1 差压环流计算数据

Table 1 Calculation data of differential pressure circulation

1#主变		2#主变		低压侧
档位	$K_1$	档位	$K_2$	环流/A
1	3.667			369.32
2	3.583			276.44
3	3.500			184.66
4	3.416			91.78
5	3.333	5	3.333	0
6	3.250			91.78
7	3.167			183.56
8	3.084			275.33
9	3.000			368.22

根据上文的分析以及表1可以看出：环流是由于变压器变比不等引起的，与负荷大小无关。通过调节变比，在变压器空载时，环流就可以存在<sup>[14-17]</sup>。

### 3 现场试验验证

#### 3.1 变电所设备现场技术参数

对本文所提到的差压环流法，通过试验验证其可行性。某用户变电所35 kV母线采用内桥接线，10 kV母线采用单母线分段接线。新投35 kV变压器两台，型号均为SFZ11-100MVA/38.5/11 kV，电压为 $35 \pm 4 \times 2.5\% / 11$  kV，阻抗电压为 $U_d\% = 7.46\%$ ，接线组别为Yn/D11，主变差动保护高压侧CT变比为500/5，低压侧CT变比为1000/5。主变各分接头参数如表1所示。

由试验数据和上述公式，可以计算出不同变比下的二次侧环流，主变在低压侧产生的环流，主变各分接头参数如表2所示。

表2 主变各分接头参数

Table 2 Parameters for tap position of main transformer

高压绕组 H.V.		低压绕组 L.V.		计算变比
分接	电压/kV	分接	电压 kV	
1	38.50			3.667
2	37.62			3.583
3	36.75			3.500
4	35.87			3.416
5	35.00	5	10.5	3.333
6	34.13			3.250
7	33.25			3.167
8	32.38			3.084
9	31.50			3.000

#### 3.2 1#主变档位的理论选择

将2#主变调压分接头放在额定档，1#主变调压分接头放在4档或6档，对主变间所产生的环流分析如下。

1) 变压器高压侧环流  $I_h$

$$I_h = \frac{\frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} \times (1 - \frac{k_1}{k_2})}{X_{T1} + X_{T2}} = 25.13 \text{ A}$$

2) 同样可得出变压器低压侧环流为87.95 A。

3) 主变差动保护高压侧CT变比为2000/5，则CT二次电流为62.8 mA。

4) 主变差动保护低压侧CT变比为6000/5，则CT二次电流为73.3 mA。

根据计算，并列运行的两台变压器，若均采用同样的变比，则不存在环流；当档位相差1档时，高压侧环流为25.13 A，低压侧环流为87.95 A。

#### 3.3 现场操作步骤及注意事项

以图1为例，说明现场的操作步骤。

1) 核相环节。主变投运前，首先将1#、2#主变进行核相，相继冲击启动1#、2#主变高低压侧及母线并核相。

2) 冲击加压。利用高压侧母联开关合环，形成1#主变高压侧I段母线、1#线路、1#主变、低压侧I段母线、低压侧母联、低压侧II段母线、2#主变、2#线路及2#主变高压侧II段母线，实现两台主变高低压合环运行方式。

3) 校核相序。调节主变压器分接开关档位，形成差电压环流，进行相关继电保护向量测试。

4) 组织负荷测试保护相位。采用相位表或低量程电流表均可以进行电流相位测量。

5) 线路保护测试完毕, 将线路保护全部投入运行, 可校核 1#线路、2#线路开关与母联等运行开关的母差接入是否正确。

除此之外, 为了保证操作安全正确, 还应注意以下的事项。

1) 利用调节变压器档位实现不同变比的变压器之间产生的环流, 进行输变电设备投运时的继电保护向量测试, 应事先预估分析电流大小、方向, 为测量结果的正确性提供依据。

2) 形成环流的流向决定了向量测量所得的角度, 是判断各向量角度是否正确的依据, 在整个投运送电的过程中, 要密切注意潮流的流向, 以保证安全、可靠。

3) 环流的流向决定了两台主变调档的原则, 在对于环流进行理论分析时, 需要将 2#主变调压分接头放在额定档, 只需对 1#主变调压分接头进行调节档位。同时, 每进行一次档位变换操作, 都需要详细检查电压、电流的变化情况, 严防误操作和过负荷。

4) 由于励磁涌流以及影响磁涌流波形的因素很多, 在冲击主变的过程中可能产生不稳定因素, 应最大限度地做好防范措施, 避免保护误动。包括: 主变二次侧合环时系统电流中含大量直流分量造成的充电保护误动; 由于差动保护的二次谐波造成的差动保护误动。

5) 在实际应用时, 应注意环路中的刀闸、电缆、CT 等设备的热稳定和电动力稳定极限, 环路中的潮流不宜超过所允许的最小热稳定与电动力稳定电流限值。

### 3.4 环流法检查差动保护 CT 接线正确性测试结果

某变电所主变差动保护采用的许继公司生产的 WBH-821 主变差动保护装置, 主变高低压侧 CT 的差动保护二次接线均为星形接线。根据上述理论分析, 将该变电所的 2#主变分接头放在 5 档, 1#主变根据环流大小从 5 档向低档调整, 当调整至 4 档时, 主变低压侧显示电流为 73.28 mA。这时, 停止调档, 保护人员对变压器高、低压侧 CT 二次回路接线进行极性测试, 测试结果见表 3、表 4。

表 3 #1 主变差动保护高、低压侧电流相位测试结果

Table 3 Current phase test results of #1 main transformer differential protection high and low voltage side						
二次电流	$I_{ah}$	$I_{bh}$	$I_{ch}$	$I_{a1}$	$I_{b1}$	$I_{c1}$
幅值/mA	62.8	62.82	62.81	73.3	73.28	73.31
相位角/(°)	102	-18	-138	282	162	42

表 4 #2 主变差动保护高、低压侧电流相位测试结果

Table 4 Current phase test results of #2 main transformer differential protection high and low voltage side

二次电流	$I_{ah}$	$I_{bh}$	$I_{ch}$	$I_{a1}$	$I_{b1}$	$I_{c1}$
幅值/mA	62.81	62.8	62.79	73.31	73.29	73.28
相位角/(°)	282	162	42	102	-18	-138

以高压侧电压  $\dot{U}_A$  为基准, 向量图如图 4。

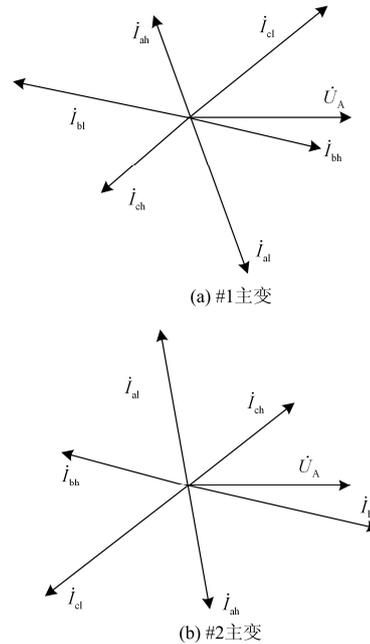


图 4 #1、#2 主变相量图

Fig. 4 Phasor diagram of #1 and #2 main transformers

根据现场主变电流相位测量结果看出:

1) 1#主变电流相位测定分析如下所述。其相量图如图 4(a)所示。

(1) 1#主变高、低压侧 CT 二次实测电流分别为 62.82 mA、73.31 mA, 与理论计算值(62.8 mA、73.3 mA)基本吻合, 其误差在工程计算的允许误差范围内。

(2) 1#主变高压侧 CT 的 A、B、C 三相电流值基本相等, 相位差接近 120°, 顺相序。

(3) 1#主变低压侧 CT 的 a、b、c 三相电流值基本相等, 相位差接近 120°, 顺相序。

2) 2#主变电流相位测定分析如下所述。其相量图如图 4(b)所示。

(1) 2#主变高、低压侧 CT 二次实测电流分别为 62.81 mA、73.32 mA, 与理论计算值(62.8 mA、73.3 mA)基本吻合, 其误差在工程计算的允许误差范围内。

(2) 2#主变高压侧 CT 的 A、B、C 三相电流值基本相等, 相位差接近 120°, 顺相序。

(3) 2#主变低压侧 CT 的 a、b、c 三相电流值基本相等, 相位差接近  $120^\circ$ , 顺相序。

因此, 可以判断 1#、2#主变差动保护 CT 电流回路接线正确, 差动保护可以在主变投运后正常投入运行。

#### 4 结论

在许昌地区, 对于工矿企业等用户变电所, 主变投运时由于设备正处于安装或调试阶段, 利用传统的带负荷测量方法往往无法对主变差动保护电流互感器二次侧相位进行检查。同时发现许昌地区 35 kV 及以上的变电所均按  $N-1$  原则设计, 所以提出了利用差压环流法测量主变电流互感器二次侧相位的方法。

本文以某企业用户 35 kV 变电所新投的两台主变压器为例, 进行环流理论计算分析, 并在现场进行了试验测试, 验证了该方法的可行性。

对该方法总结如下:

1) 空载的两台变压器并列运行, 在低压侧合环, 调整两台变压器电压抽头, 使其产生电压差, 从而在两台变压器中可以测量到无功环流。通过调节并列运行主变压器的电压抽头, 造成变比差, 可以在变压器内部产生适当的环流。并且此环流的产生不需要外界条件, 只需调节主变压器变比即可。故可应用于新投运可并列运行的变压器的相量测试工作。

2) 差压环流法利用并列运行的两台有变比差的变压器的环流作测试, 原理简单, 容易操作, 安全可靠, 能够有效弥补常规的主变带负荷运行检查差动保护 CT 二次接线的正确性不足的问题, 可及时发现接线错误, 降低主变区外故障时差动保护的误动率, 是一种值得推广的测试相量的方法。

3) 该方法对单独一台变压器测相量表现无能为力。但许昌地区电网的绝大多数变电站都是两台以上的变压器, 因此应用还是比较为广泛的。对内桥接线方式的变电站, 相量测试不太完整, 故存在一定的局限性。

#### 参考文献

- [1] 兰生, 张小钊. 基于多判据的变压器差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 125-131.  
LAN Sheng, ZHANG Xiaofan. A transformer differential protection method based on multi-criterion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 125-131.
- [2] 宁铎, 尤磊, 李英春, 等. 变压器差动保护动作特性的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 99-106.  
NING Duo, YOU Lei, LI Yingchun, et al. Simulation

- research on the operating characteristic of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 99-106.
- [3] 李瑞生. 适用主动配电网的差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 104-109.  
LI Ruisheng. Differential protection scheme to apply to active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 104-109.
- [4] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- [5] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [6] 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, 1998.
- [7] 李海涛. 电流互感器饱和对差动保护的影响及解决方案[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.  
LI Haitao. Affect of current transducer saturation to differential protection and its solution[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.
- [8] 赵训君. 变压器差动保护的研究与改进[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
ZHAO Xunjun. Transformer differential protection research and improvement[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [9] 郭镭, 陈世国, 徐伟, 等. 变压器并列运行的循环电流控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 75-79.  
GUO Lei, CHEN Shiguo, XU Wei, et al. Control strategy of circulating current of transformers which are in parallel operation[J]. Automation of Power Electric Systems, 2010, 34(4): 75-79.
- [10] 徐建政, 凌云. 并列运行变压器经济运行模式分析[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9): 46-48.  
XU Jianzheng, LING Yun. Analysis of economic operation mode of parallel operation of transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 46-48.
- [11] 王翔. 变压器并列运行的若干问题探讨[J]. 电器与能效管理技术, 2009(18): 50-53.  
WANG Xiang. Discussion on several problems of transformer parallel operation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2009(18): 50-53.
- [12] 胡景生. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [13] 电力变压器运行规程: DL/T572—2010[S].  
Regulation of electric transformer: DL/T572—2010[S].
- [14] 夏石伟, 郑涛. Y,d 接线变压器三角形侧绕组中环流求取方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 60-64.

- XIA Shiwei, ZHENG CTo. Calculation of circulating current in delta winding of transformers with Y,d connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 60-64.
- [15] 凌光, 姚文熙. Y/ $\Delta$ 接线变压器三角形侧环流计算新方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 157-162.
- LING Guang, YAO Wenxi. Circulating current calculation for delta windings of transformer with Y/ $\Delta$  connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 157-162.
- [16] 夏石伟. Y/ $\Delta$ 接线变压器环流求取和变压器保护新原理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- XIA Shiwei. Research of constructing algorithm of circulating current in Y-delta connected transformer and new protection of transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [17] 刘忠勇, 邝剑昆, 蔡峻. 变压器环流的计算及应用分析[J]. 中国电力教育, 2012, 28(15): 143-144.
- LIU Zhongyong, KUANG Jiankun, CAI Jun. Analysis of the application and calculation of the transformer's circulating current[J]. China Electric Power Education, 2012, 28(15): 143-144.
- [18] 侯元文, 张靖波. 应用低压短路法测主变差动保护相位分析[J]. 中国电业(技术版), 2013(6): 12-14.
- HOU Yuanwen, ZHANG Jingbo. Analysis of using low volCTge short circuit method to measure the phase of main transformer's differential protection[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2013(6): 12-14.
- [19] 潘书燕, 黄飙, 陈永华, 等. 110 kV 变电站变压器差动保护动作原因分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 87-89.
- PAN Shuyan, HUANG Biao, CHEN Yonghua, et al. Analysis of reason on differential protection of the transformer in 110 kV electricity substation[J]. Automation of Power Electric Systems, 2005, 29(19): 87-89.
- [20] 袁正华, 栗振海, 刘晓燕. 主变差动保护二次错误接线浅析[J]. 变压器, 2009, 46(10): 62-64.
- YUAN Zhenghua, LI Zhenhai, LIU Xiaoyan. Analysis on wrong connection in secondary side of the main transformer's differential protection[J]. Transformer, 2009, 46(10): 62-64.

---

收稿日期: 2016-06-29; 修回日期: 2016-11-25

作者简介:

田野(1994—), 男, 本科在读, 研究方向为电气工程及其自动化。E-mail: youtianyoubo@163.com

(编辑 姜新丽)