

防止 500kV 壳式变压器重瓦斯保护误动策略

研究及应用

杨贤 柯春俊 周丹

(广东电网公司电力科学研究院, 广州, 510080)

摘要: 500kV 壳式变压器区外故障重瓦斯误动作对电网安全运行造成了巨大的影响。本文依据 500kV 壳式变压器结构特点, 分析了区外故障重瓦斯误动作的原因。研究了重瓦斯误动作过程保护时序特征, 并基于此提出了防止 500kV 壳式变压器重瓦斯保护误动的保护延时跳闸策略。详细阐述了重瓦斯保护延时时间选择方法, 并分析了重瓦斯保护延时跳闸策略的风险。目前, 南网范围内所有 500kV 壳式变压器已完成重瓦斯延时改造, 应用实例对该策略在防止 500kV 壳式变压器重瓦斯误动方面的有效性进行了验证。

关键词: 500kV; 壳式变压器; 重瓦斯保护; 误动作; 延时跳闸

Research on prevention strategy for heavy gas protection malfunction of the 500kV shell-type transformers and its application

YANG Xian, KE Chunjun, ZHOU Dan

(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Guangzhou, 510080)

ABSTRACT: The heavy gas protection malfunction of the 500kV shell-type transformers has a huge influence on the safe operation of the power grid when external faults occur. The reason for the heavy gas protection malfunction is analyzed on the basis of the structure characteristics of the 500kV shell-type transformers. Based on the research of the timing characteristics of heavy gas protection malfunction, the delay-trip strategy to prevent heavy gas protection malfunction of the 500kV shell-type transformers is proposed. The method of the delay time selection is described in detail and the risk of heavy gas protection delay-trip is analyzed. Currently, all the 500kV shell-type transformers have been completed the transformation of heavy gas delay-trip. The effectiveness of the strategy in preventing heavy gas protection malfunction of the 500kV shell-type transformers is verified by some application examples.

KEY WORDS: 500kV; shell-type transformer; heavy gas protection; malfunction; delay-trip

1、引言

随着电力系统不断向大容量、高电压发展, 壳式变压器 (尤其是 500kV 壳式变压器) 由于其尺寸小、重量轻、抗短路能力强等优点颇受用户青睐, 在电力系统中得到了广泛的应用[1], 据不完全统计, 国内在运的 500kV 壳式变压器近 200 台。但近年来, 壳式变压器多次发生区外故障重瓦斯误动导致主变跳闸故障 (2011 年至 2014 年南网范围已发生 8 相次, 如表 1 所示), 给电力系统安全运行水平以及供电可靠性造成了巨大的影响。

瓦斯继电器作为变压器非电量保护装置, 对于反映绕组轻微匝间短路、局部放电等低能量故障及

铁芯发热等非电气网络故障时, 具有高度灵敏性和速度性[2]。一旦重瓦斯误动, 必须彻查误动原因, 确认变压器本体无故障方可投入运行, 增加了现场维护工作量, 且严重影响了供电可靠性, 必须采用有效措施杜绝瓦斯保护误动。

由于瓦斯保护误动故障时有发生, 国内生产单位、科研机构等对瓦斯继电器保护误动故障原因进行了广泛分析, 提出了相应的解决方案, 但仍未有效杜绝瓦斯保护误动故障的发生[3-11], 且目前专门针对壳式变压器瓦斯保护误动研究未见报道。国外方面, 日本作为壳式变压器应用最多的国家, 在 2011 年大地震后将重瓦斯退出跳闸输出。欧洲以及北美多个国家的电力部门在实际应用中常将瓦斯

继电器仅工作在轻瓦斯报警方式。本文针对 500kV 壳式变压器结构特点，分析壳式变压器重瓦斯误动

原因，研究了防止 500kV 壳式变压器重瓦斯误动策略，并通过实例应用验证了策略的有效性。

表 1 2011 至 2014 年南网范围内 500kV 壳式主变重瓦斯误动故障

序号	主变位置	保护动作过程	瓦斯流速整定值
1	沧江站#3 主变 A 相	220kV 线路侧遭受雷击后发生短路故障，本体重瓦斯动作。	1.5m/s (管径 80mm)
2	沧江站#3 主变 A 相	220kV 线路侧雷击影响，主变本体重瓦斯动作跳闸。	
3	上寨站#3 主变 C 相	线路相间接地故障跳闸，主变本体重瓦斯保护动作。	
4	嘉应站#2 主变 B 相	线路发生 B 相接地故障，主变本体重瓦斯动作。	
5	横沥站#1 主变 A 相	线路接地故障，主变本体重瓦斯 A 相动作。	
6	横沥站#2 主变 B 相	线路接地故障，主变 B 相重瓦斯动作。	
7	横沥站#3 主变 A 相	线路接地故障，主变 A 相重瓦斯动作。	
8	横沥站#3 主变 B 相	线路接地故障，主变本体重瓦斯 B 相动作。	

2、瓦斯继电器结构及动作原理

瓦斯继电器装在变压器的储油柜和油箱之间的管道内，利用变压器内部故障而使油分解产生气体或造成油流涌动时，使气体继电器的接点动作，接通指定的控制回路，并及时发出信号告警（轻瓦斯）或启动保护元件自动切除变压器（重瓦斯）。

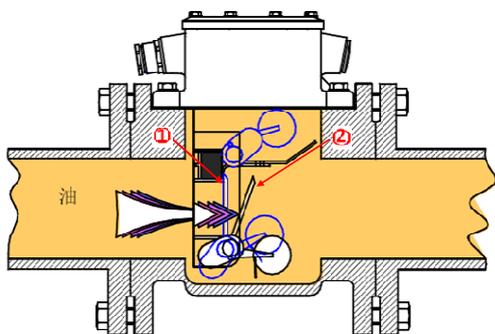


图 1 双浮球带挡板瓦斯继电器结构图

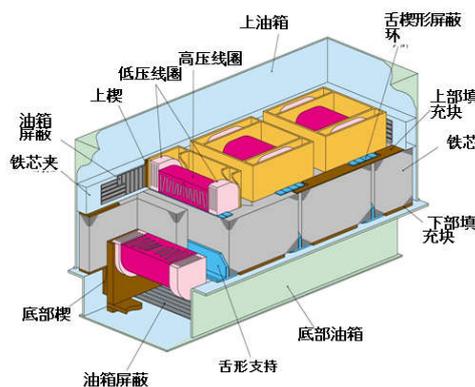
图 1 所示为 500kV 壳式变压器配备的双浮球带挡板瓦斯继电器结构图。由于突发性事件而产生向储油柜方向运动的压力波冲击瓦斯继电器挡板，当压力波流速超过挡板动作值时，挡板顺着压力波方向移动，触发接点动作，引发开关跳闸；当压力波消退后，挡板承受油流压力减弱，在磁铁吸引力作用下，挡板向位置①方向移动，瓦斯动作信号复位 [12]。

3、500kV 壳式变压器区外故障重瓦斯保护误动原因

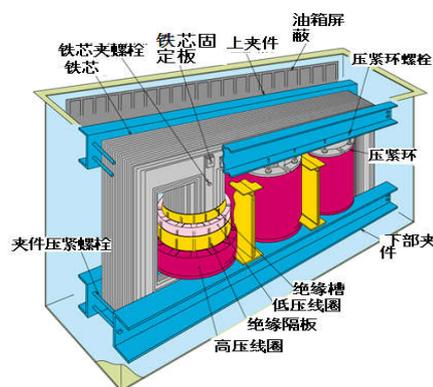
3.1 500kV 壳式变压器结构

电力变压器按结构主要分为壳式变压器和心式变压器。图 2 为壳式与心式变压器铁芯及绕组排

列图。与心式变压器相比，壳式变压器铁芯水平放置，铁芯柱截面形状为矩形，绕组被铁芯包围，线饼垂直布置，饼间油道垂直，油箱和器身间隙小。优点是能够承受较大电磁力，散热性能好；缺点是绝缘结构、工艺复杂，铁芯通过箱体固定，短路电流通过线圈引起的振动容易传到箱体 [13]。



(a) 壳式变压器铁芯与绕组排列图



(b) 心式变压器铁芯与绕组排列图

图 2 壳式变压器与心式变压器绕组排列方式

3.2 500kV 壳式变压器区外故障重瓦斯误动原因

3.2.1 现场检查情况

对南网范围 8 相次 500kV 壳式变压器区外故障

重瓦斯误动故障现场检查发现：

1) 8 相次重瓦斯误动事件，均为变压器外部线路发生短路接地故障导致主变重瓦斯跳闸，主变电气保护均未动作。

2) 各主变电气保护及瓦斯保护装置及二次回路均运行正常，不存在保护装置及二次回路异常的现象。

3) 重瓦斯误动主变经历的最大穿越性故障电流峰值均大于 13kA。穿越性故障电流的峰值最小为 14.73kA，最大为 25.89kA。

3.2.2 原因分析

从现场检查情况来看，由于不存在保护装置及二次回路异常的现象，说明重瓦斯动作是由于信号节点被触发导致跳闸信号输出引起的。从壳式变压器的结构特点，分析重瓦斯动作的可能原因有以下两种：

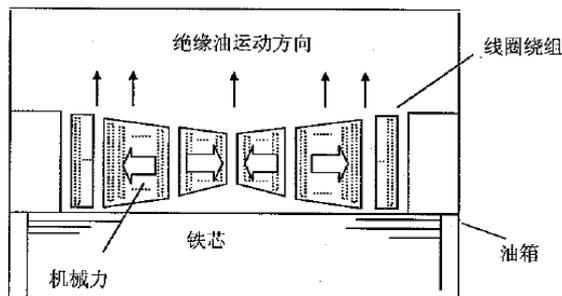


图 3 内部油流速度临时增大过程

1) 油流涌动。由于短路电动力的影响，主变内部绕组受到很大的机械力并产生了巨大的振动。鉴于壳式变压器绕组及油道排列的特殊性，振动的

绕组像手风琴一样不断把绝缘油从绕组周围推向上层油箱空间。受到挤压的绝缘油通过升高座和瓦斯继电器迅速流向油枕，油流速度达到瓦斯继电器的整定值而动作。壳式变压器在区外短路时内部油流速度临时增大过程示意图如图 3 所示。

2) 抗振性能不足。变压器在绕组巨大动态电动力下本体产生振动，瓦斯继电器浮球本体振动时发生误动，导致重瓦斯保护动作跳闸。

在南网发生的 8 相次 500kV 壳式主变重瓦斯误动故障中，列表 1 后 4 台主变均进行过瓦斯继电器抗振性能改造（更换抗振性能不足瓦斯继电器，并对支撑结构进行加固），但仍发生重瓦斯误动故障，所以基本排除可能原因 2)。

由此分析，壳式变压器特殊结构导致的油流涌动是引起壳式变压器区外故障重瓦斯误动的主要原因。

4、防止 500kV 壳式变压器区外故障重瓦斯保护误动策略研究

由于至今国内外在主变区外故障重瓦斯跳闸问题的研究仅限于定性分析上，尚无法定量分析主变流过的短路穿越电流与瓦斯继电器中油流速度及振动特性的关系，因此无法从降低瓦斯保护对于主变区外短路故障灵敏性的角度研究防误动策略。

选择性是继电保护的另一个重要特征。基于瓦斯继电器本身的动作特性，通过改变重瓦斯保护的选择性则为防误动策略研究提供了新的思路。

表 2 2011 至 2014 年南网范围内 500kV 壳式主变重瓦斯误动持续时间信息表

位置	中压侧穿越电流/kA		故障穿越电流持续时间/ms	瓦斯动作起始时间/ms	瓦斯动作持续时间/ms
	最大峰值	基波有效值			
横沥#1 主变 A 相	21.67	11.88	40	185	60
横沥#2 主变 B 相	25.89	12.90	33	158	127
横沥#3 主变 A 相	21.68	11.82	51	152	130
横沥#3 主变 B 相	24.71	12.90	51	152	62
嘉应#2 主变 B 相	21.08	10.50	72.4	214	142
上寨#3 主变 C 相	14.73	6.51	53.3	211	21
沧江#3 主变 A 相	18.78	9.60	67.2	321	50.4
沧江#3 主变 A 相	20.61	12.20	60.4	288	87.8

4.1 壳式变压器区外故障重瓦斯保护动作时序分析

2011 至 2014 年南网范围 500kV 主变 8 相次由于区外故障引起的主变本体重瓦斯误动事件中，主变区外故障穿越电流及重瓦斯误动的持续时间如表 2 所示，分析发现：

1) 所有主变重瓦斯继电器动作的持续时间均小于 150ms。最大持续时间为 142ms（嘉应#2 主变 B 相），最小持续时间仅为 21ms（上寨#3 主变 C 相）。

2) 所有主变重瓦斯继电器误动均发生在故障后 152ms~321ms 范围内，区外故障均于故障后 33ms~75ms 切除。

3) 故障电流持续时间均小于 80ms。最大持续时间 72.4ms（嘉应#2 主变 B 相），最小持续时间 33ms（横沥#2 主变 B 相）。

4) 从主变中压侧穿越电流大小来看，穿越电流的峰值最小为 14.73kA（上寨站#3 主变 C 相），最大为 25.89kA（横沥站#2 主变 B 相）。

4.2 防止区外故障重瓦斯误动策略研究

从重瓦斯动作时序来看，主变区外故障后，油流涌动至瓦斯继电器，流速大于整定值推动挡板，触发动作接点，重瓦斯动作；区外故障切除后，电动力消失，油流涌动速度下降，流速小于整定值后重瓦斯信号复位。因此，可通过采取重瓦斯跳闸延时保护策略避开区外故障时持续的油流涌动，防止重瓦斯误动。

4.2.1 重瓦斯跳闸延时保护策略逻辑时序

重瓦斯跳闸延时保护策略主要是通过通过在重瓦斯启动后增加固定延时的方式，以提高对区外故障的保护选择性。

瓦斯继电器延时保护的逻辑时序如图 4 所示。正常运行时，继电器触点未接通，主变三侧开关处于闭合状态。当变压器由于某种突发性事件而产生油流涌动流速超过挡板或浮球整定值时，瓦斯继电器发出跳闸信号。在目前的保护方式下，该跳闸信号均直接出口至主变三侧开关。延时保护措施是在该跳闸信号后增加固定延时，并将延时后信号与当前瓦斯继电器状态进行“与”的逻辑判断，再进行下一步操作。如果当前瓦斯继电器已经处于复归状态，则本次瓦斯保护动作不出口；反之，若当前状态仍为跳闸出口状态，则本次瓦斯保护动作出口。

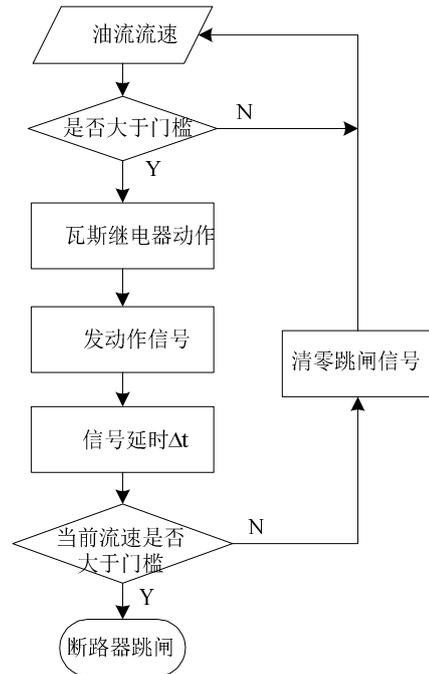


图 4 瓦斯继电器延时保护的逻辑时序

4.2.2 延时时间选择

延时保护策略的关键是延时时间的确定，基于近年来南网发生的主变重瓦斯误动跳闸故障中瓦斯保护的动作用时延，并结合瓦斯继电器自身的动作时间特性综合选择确定延时时间。

如图 5 中， t_1 为区外故障时变压器瓦斯继电器处油流涌动持续时间， t_2 为瓦斯继电器复位时间（经对德国 EMB、意大利 COMEM 及国产 QJ 等常用继电器生产厂家调研表明，典型瓦斯继电器的复位时间均小于 100ms，取 100ms。）。

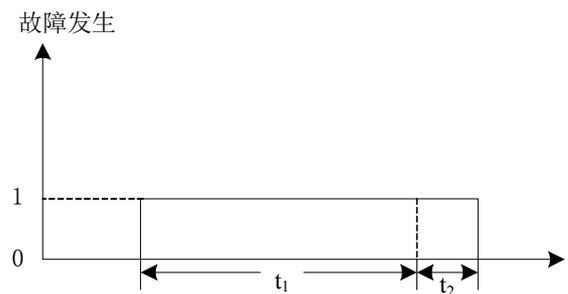


图 5 重瓦斯动作时序图

瓦斯动作持续时间 t_{lst} 为 t_1 与 t_2 的和。为了有效避免外部故障时重瓦斯误动，则保护时延时间 t_{del} 应大于 t_{lst} 。因此采用公式(1)、(2)对保护时延时间进行整定：

$$t_{lst} = (t_1 + t_2) \quad (1)$$

$$t_{del} = K_{rel} * t_{lst} \quad (2)$$

其中 K_{rel} 为可靠系数，一般为 1.2~1.3。

依据区外故障时保护动作情况，本文提出以下 2 种保护时延时间选择策略：

1) 区外故障主保护正确动作且开关不失灵时保护时延

如果区外故障时主保护动作正常且开关不失灵，区外故障及时被切除。从南网 500kV 壳式主变 8 相次故障中重瓦斯误动持续时间来看，所有主变重瓦斯继电器误动作的持续时间 t_{lst} 均小于 150ms；此外，按照壳式变压器厂家计算结果：区外短路故障、短路电流 17kA 情况下，区外主保护正确动作且开关不失灵时，油流从涌动开始至速度衰减至 1.5m/s 以下最长持续时间约为 400ms。因此，采用公式(2)进行时延时间整定(K_{rel} 取 1.1, t_{lst} 取 400)：

$$t_{del}=K_{rel} * t_{lst}=1.1 * (400+100) =550 \text{ (ms)}$$

因此，如果区外短路故障时主保护动作正确且开关不失灵，保护时延时间 t_{del} 只需大于 550ms 即可。

2) 区外故障开关失灵、后备保护正确动作保护时延

考虑区外短路时开关失灵，依靠后备保护动作来切除故障。依据南网总调历年保护动作情况分析发现，开关失灵后而后备保护动作的时间 t_{res} 约为 620ms；在该过程中，依据壳式变压器厂家计算结果，油流从涌动开始至速度衰减至 1.5m/s 以下的最长持续时间为 800ms。因此，综合考虑，采用公式(2)进行时延时间整定 (K_{rel} 取 1.1, t_{lst} 取 800)：

$$t_{del}=K_{rel} * t_{lst}=1.1 * (800+100) =990 \text{ (ms)}$$

因此，如果区外故障时开关失灵、后备保护正确动作，保护时延时间 t_{del} 只需大于 990ms (取 1000ms) 即可。

两种延时方案对比发现，第一种策略下，如果区外故障开关失灵，则可能仍存在区外故障重瓦斯动作的风险；第二种策略延时时间长，在区外故障开关失灵情况下，依然可以避免重瓦斯保护跳闸，且后备保护失灵的可能性概率极低，目前还未见报道，因此选择第二种延时策略(延时 1s)足以保证防误动有效性。

4.3 防误动策略风险分析

1) 可能导致故障扩大。重瓦斯延时跳闸能基本解决主变区外故障时重瓦斯误动跳闸问题，且可操作性强。但当变压器内部发生轻微匝间短路时，电气特征量可能无法触发电气量保护装置出口，而故障足以导致瓦斯保护出口，此时瓦斯保护延时跳闸将造成主变故障扩大。

2) 不影响大部分故障保护选择性。对近年来国内 110kV 及以上变压器故障情况发现，当主变发生匝间短路时，几乎全部都在极短的时间内(远小于 1 s)演变为对地故障并触发电气量保护跳闸，整个故障演变过程持续时间小于延时保护选择的延时时间。因此，与传统的保护方式相比，延时保护对绝大部分故障的保护选择性上并未构成影响。

3) 经济成本影响不大。对于因增加延时保护扩大了故障范围或严重程度的轻微匝间短路故障，从变压器故障后修复方面考虑[14-15]，与传统保护方式下主变的修复工作量、复电时间及成本投入等相比，并未明显增加。

5、应用实例

目前南网范围已完成 500kV 壳式变压器重瓦斯保护延时跳闸改造，延时时间 1s。近期发生的两起区外故障 500kV 壳式主变重瓦斯动作情况有效验证了延时保护策略的有效性。

应用实例 1: 2014 年 08 月 06 日 12 时 31 分 19 秒 099 毫秒，惠州供电局福园站 220kV 福澎甲、乙线近区约 1.3km 处遭受雷击，220kV 福澎甲发生 B、C 相间接地短路故障，220kV 福澎乙线发生 B 相接地短路故障，福澎甲、乙线线路保护均正确动作，45ms 后将故障切除。160ms 后，#1 主变(500kV 壳式主变)重瓦斯保护 C 相动作开入，此时流过#1 主变中压侧的穿越电流为：B 相 14.33kA、C 相 17.7kA，98ms 后 C 相重瓦斯动作开入返回，由于未达到延时值(设定 1s)，主变未跳闸。

应用实例 2: 2014 年 08 月 06 日 12 时 44 分 58 秒 912 毫秒，惠州供电局福园站 220kV 福澎乙线近区约 2.1km 处遭受雷击，发生 A、C 相间接地短路故障，保护均正确动作，43ms 后将故障切除。166ms 后#1 主变重瓦斯保护 C 相、A 相相继动作开入，流过#1 主变中压侧的穿越电流为：A 相 17.61kA、C 相 17.12kA，82ms 后 A 相重瓦斯动作开入返回，98ms 后 C 相重瓦斯动作开入返回，由于未达到延时值(设定 1s)，主变未跳闸。

6、结语

500kV 壳式变压器区外故障重瓦斯误动作时有发生。依据壳式变压器结构特点，分析壳式变压器区外故障重瓦斯误动作原因，并研究防止重瓦斯误动作策略，得出以下结论：

1) 500kV 壳式变压器由于其结构特点，区外故障时造成的油流涌动以及振动容易引起重瓦斯

误动作导致主变跳闸;

2) 基于重瓦斯保护动作时序特征提出的重瓦斯保护延时跳闸策略,能够有效避免区外故障重瓦斯误动作,且其可能导致的故障扩大对保护选择性及主变修复的经济性成本影响不大;

3) 应用实例验证了延时策略对于防止 500kV 壳式变压器区外故障重瓦斯误动的有效性;

4) 短路电流与主变内部压力及油流速度的定量关系尚无明确的结论,可对上述问题进行深入研究,明确主变瓦斯保护整定依据,从更高安全性角度杜绝重瓦斯保护误动故障发生。

参考文献

- [1]. 李光范,姜益民.壳式变压器事故分析及反事故措施[J].电力设备,2002,4(3):12-17.
Li Guangfan, Jiang Yimin. Accident analysis and preventive strategy of shell-type transformers[J]. Electrical Equipment, 2002,4(3):12-17.
- [2]. GB 6451. 1. 1—86. 三相油浸式电力变压器技术参数和要求 [S]. GB 6451. 1. 1—86. Technical parameter and demand of the three phase transformer[S].
- [3]. 钟天翔,金树军.500 kV 变压器瓦斯继电器误动作原因分析[J]. 高压电器, 2011,5(47):79-82.
Zhong Tianxiang, Jin Shujun. Analysis on Misoperation Reasons of 500 kV Transformers Gas Relay. High Voltage Apparatus, 2011,5(47):79-82.
- [4]. 李璐,陈正鸣,邝石,等.气体继电器误动作分析及处理[J].高压电器, 2009, 45(6): 145-147.
LI Lu, CHEN Zheng-ming, KUANG shi, et al. Analysis and elimination of gas relay misoperation[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 145-147.
- [5]. 江庆霞,韩凤玲,刘兵.变压器瓦斯继电器动作原因分析[J].内蒙古电力, 2007(6): 44-45.
JIANG Qing-xia, HAN Feng-ling, LIU Bing. Cause analysis to transformer gas relay actuation [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2007(6): 44-45.
- [6]. 何文林,李宏雯,余睿,等.500 kV 变压器重瓦斯动作原因分析[J].华东电力, 2006 (6): 72-74.
HE Wen-lin, LI Hong-wen, YU Rui, et al. Reasons for heavy gas protection operation of 500 kV transformers [J]. East China Electric Power, 2006 (6): 72-74.
- [7]. 张云峰. 变压器瓦斯保护误动原因分析及应对措施[J]. 电网技术,2008,2(32):300-302.
Zhang Yun-feng. Reason and Measure About Transform Gas Protect Motion[J]. Power System Technology, 2008,2(32):300-302.
- [8]. 敖明,梁义明,崔明,等.一起变压器气体继电器非故障动作原因分析[J]. 变压器,2006,4(43):41-43.
AO Ming,LIANG Yi-ming,CUI Ming etc. Analysis on Non-Fault Operation of Gas Relay in Transformer[J]. Transformer, 2006,4(43):41-43.
- [9]. 王世阁,周志强,李保福.变压器气体继电器故障分析与改进措施[J]. 电力设备,2006,9(7):58-60.
WANG Shi-ge, ZHOU Zhi-qiang, LI Bao-fu. Fault Analysis and Improvement Measures for Transformer Gas Relay[J]. Electrical Equipment, 2006,9(7):58-60.
- [10]. 吕俊霞,张新春. 变压器的瓦斯保护故障分析[J]. 电气传动自动化, 2012,4(34):55-58.
LV Junxia, Zhang Xinchun. Analysis of transformer gas protection fault[J]. ELECTRIC DRIVE AUTOMATION, 2012,4(34):55-58.
- [11]. 王忠毅,严平. 主变轻瓦斯保护动作后的原因分析及处理[J]. 高压电压技术,2005,5(31):87-88.
Wang Zhongyi, Yan Ping. Analysis of Fault After Operation of Light Gas Relay Protection of Transformer[J]. High Voltage Engineering, 2005,5(31):87-88.
- [12]. EMB 变压器气体继电器使用说明书[K].德国 EMB 公司, 2004. Explanatory book of the EMB gas relay[K]. EMB Corporation of Germany, 2004.
- [13]. 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 697-699.
Xie Yucheng. Power Transformer Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 697-699.
- [14]. 王金笙,李秋林,郭春时.变压器检修[M].北京:中国电力出版社, 2007.
WANG Jin-sheng, LI Qiu-lin, GUO Chun-shi. Transformer examine and repair[M]. Beijing: China Electric Power Publishing Company, 2007.
- [15]. DL/T 573—95.电力变压器检修导则[S].
DL/T 573—95. Guide of repairing the electric transformer[S].

作者简介:



杨贤(1986-),男,湖南衡阳人,工学博士,主要从事电力变压器高压试验及故障诊断技术研究。
yxhust@163.com, 13924308589

柯春俊(1985-),男,安徽六安人,工学硕士,主要从事电力变压器高压试验及故障诊断技术研究。

周丹(1986-),女,湖南株洲人,工学博士,主要从事电力变压器高压试验及故障诊断技术研究。