

# 基于瞬态油流量测量的电力变压器 故障油流涌动特性

李远松, 丁津津, 李圆智, 孙辉, 张峰, 汪勋婷

(国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**近些年,外部短路冲击导致的瓦斯保护误动事件频繁出现,在此背景下,对变压器的运行效率造成威胁。为探究外部短路故障时管道内的油流特性,在电力变压器上建立瞬态油流测量系统,开展外部短路故障测试试验。试验结果证实,短路电流引起的变压器绕组变形和振动会导致油流涌过管道。由于液体惯性,试验所测得的油流动作出现的时间延迟长可达数百毫秒。实际运行中的瓦斯保护误动时间滞后于外部故障的时间也长达数百毫秒,这与油流动作的延时现象相符。试验还表明,故障的严重程度和位置都会对油流动作产生影响。最后,给出的油流动作延迟结果可以为进一步研究油流冲击和瓦斯保护误动的机理提供重要的参考。

**关键词:**电力变压器;瞬态油流量;油流动作;动作延迟

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.025 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2022)01-0211-06

## Research on fault oil flow in power transformer based on transient oil flow measurement

LI Yuansong, DING Jinjin, LI Yuanzhi, SUN Hui, ZHANG Feng, WANG Xunting

(Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Company Limited, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In recent years, the misoperation of gas protection caused by the external short-circuit impact occurs frequently, which threaten the operation efficiency of the transformer. Under the background, in order to explore oil flow characteristics in the pipeline when the external short-circuit fault occurs, this paper establishes a transient oil flow measurement system on the power transformer and carries out an external short-circuit fault test. The test results show that the transformer winding deformation and vibration caused by the short-circuit current will lead the oil flow through the pipeline. Due to the inertia of the liquid, the time delay of oil flow measured in this paper is up to hundreds of milliseconds. In the actual operation, the time of gas protection misoperation lags behind the external fault for hundreds of milliseconds, which keeps consistent with the delay phenomenon of oil flow action. The test also shows that the oil flow surge is affected by the severity and location of the fault. In addition, the results of the oil flow action delay also provide an essential reference for further study on the mechanism of oil flow shock and the misoperation of gas protection.

**Key words:** Power transformer; transient oil flow; oil flow action; action delay

收稿日期:2020-09-28;修回日期:2020-12-30

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(52120518000P)

通信作者:李远松(1987-),男,硕士,工程师,主要从事电力系统继电保护自动化研究;E-mail:674860564@qq.com

变压器在电网中是最重要的设备之一<sup>[1-4]</sup>,这类关键设备的任何故障都将严重影响电力系统的可靠性和稳定性。瓦斯保护动作作为变压器的主保护,其可靠性一直受到广泛的关注。变压器瓦斯保护故障有多种原因,操作和维护不当都可能导致变压器瓦斯保护故障<sup>[5]</sup>。近年来,外部短路冲击下瓦斯保护误动的事故屡次发生,对变压器的运行效率构成重大的威胁<sup>[6-10]</sup>。文献[8]开展外部短路下变压器的热场及流场的仿真研究,仿真计算了在外短路情况下,绕组的动态电磁力及振动位移,一方面变压器部件的加热持续驱动着变压器的内部油流,但短路电流的热效应不足以导致气体保护误动;另一方面,绕组振动对油流的影响更强,可能导致气体保护误动。文献[10]通过有限元计算的方法,利用 ANSYS Workbench 进行了变压器的油箱电磁力流耦合计算研究,得到了与文献[8]相同的结论。

综上所述,外部短路下电力变压器故障油流涌动特性研究大多基于多物理场仿真,缺少相关的试验验证。因此,为探究外部短路故障时管道内的油流特性,本文在电力变压器上建立瞬态油流测量系统,开展外部短路故障测试试验,通过试验手段系统的研究了外部短路下电力变压器故障油流涌动特性。

## 1 区外故障引发变压器油流动作分析及事故案例

### 1.1 区外故障引发变压器油流动作分析

重瓦斯保护动作主要是变压器油流冲击挡板,挡板克服弹簧的阻力,带动磁铁向干簧触点方向移动,使触点闭合,接通跳闸回路。换言之,必须产生一个力  $f_{oil}$  大于等于弹簧挡板的阻力  $f_z$ ,而  $f_z$  又与油流速度  $v_{oil}$  存在一定的关系<sup>[6,11]</sup>,即

$$\begin{cases} f_{oil} \geq f_z \\ f_{oil} t = m v_{oil} - m v_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $v_0$  为无故障情况的油流速度,通常取 0;  $m$  为冲击的油质量;  $t$  为油冲击作用时间,若  $t$  一定,则:

$$f'_{oil} = k \times v'_{oil} \quad (2)$$

式中  $f'_{oil}$ 、 $v'_{oil}$  为重瓦斯保护整定值;  $k$  为动作时受力与油流速度整定的比例系数。此外,外部短路电流与其所产生的油流速度之间又存在一定的关系。由于短路电流引起电动力,进而出现绕组振动,并导致油压的变化。因此,当外部短路电流达到一定数值时,可能引发内部瓦斯保护误动。

### 1.2 事故案例

根据某公司发布的故障统计报告显示,2011~2014年,500 kV 变压器由于外部故障导致的气体继电器误动事件多达 8 次。在这些事件中,各种变压器的气体继电器的所有阈值均设置为 1.5 m/s。实际上,所有的外部故障都在故障发生后的 33~75 ms 内得到了及时的消除。然而,气体继电器的误动仍然发生,延时从 152 ms 到 321 ms。此外,所有短路电流峰值均大于 14 kA,平均故障持续时间为 53 ms。显然,此时变压器外部发生了严重的短路故障,工作人员不得不将气体继电器的动作时间延迟至 1 s,以避免发生继电器误动。但在如此长的延迟下,当内部故障发生时,气体继电器将不再能够足够快地动作。

文献[7]定义油流涌动能量,其单位为安培的平方( $A^2$ ),并得到不同故障点的油流涌动能量与重瓦斯持续时间之间的关系,如图 1 所示。由图 1 可知,除了横沥 #3 变 B 相外,其他各站变压器的油流涌动能量与瓦斯动作持续时间的变化趋势基本一致,但这一评价尚无理论依据。

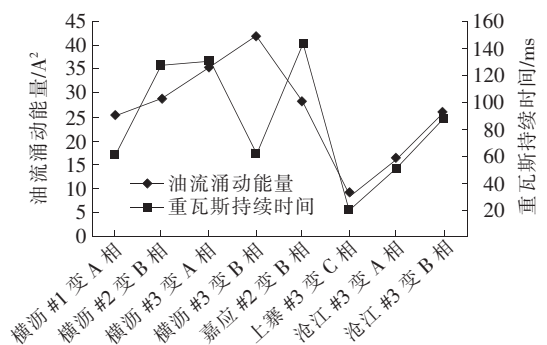


图 1 油流涌动能量与瓦斯动作持续时间的关系

Figure 1 Relationship between the energy of oil flow and the duration of gas action

## 2 电力变压器故障油流动作延迟实验

### 2.1 外部短路故障测试系统

变压器短路故障检测系统由电流互感器、开关柜、试验变压器、中间变压器、分压器、电抗器组成,如图 2 所示。在进行变压器低压侧短路试验时,试样变压器高压侧接入馈线系统,低压侧接地,如图 2 (a)所示。同样,中压侧与中性点接地时,可进行中压短路试验,如图 2(b)所示。在测试中,外部短路故障的起始时间随机,持续时间设定为 250 ms。短

路电流由电抗器控制,并在现场试验前通过三相短路电流计算得到。

为了研究外部故障期间管道内真实的油流特性,在真实的 40 MV · A/110 kV 油浸式电力变压器上进行现场试验,该变压器为芯式变压器。为安装环形质量流量计,对主罐与保守器之间的管道进行了改造,并设置了新的支撑保守器的支架。

样品变压器已使用多年以上,出于安全因素,将短路电流的幅值减小,此外,变压器绕组在试验过程中可能因短路力的作用而损坏,从而导致内部电弧故障,因此,每次测试后需测量和分析绕组的电抗变化,以评估绕组的状态。

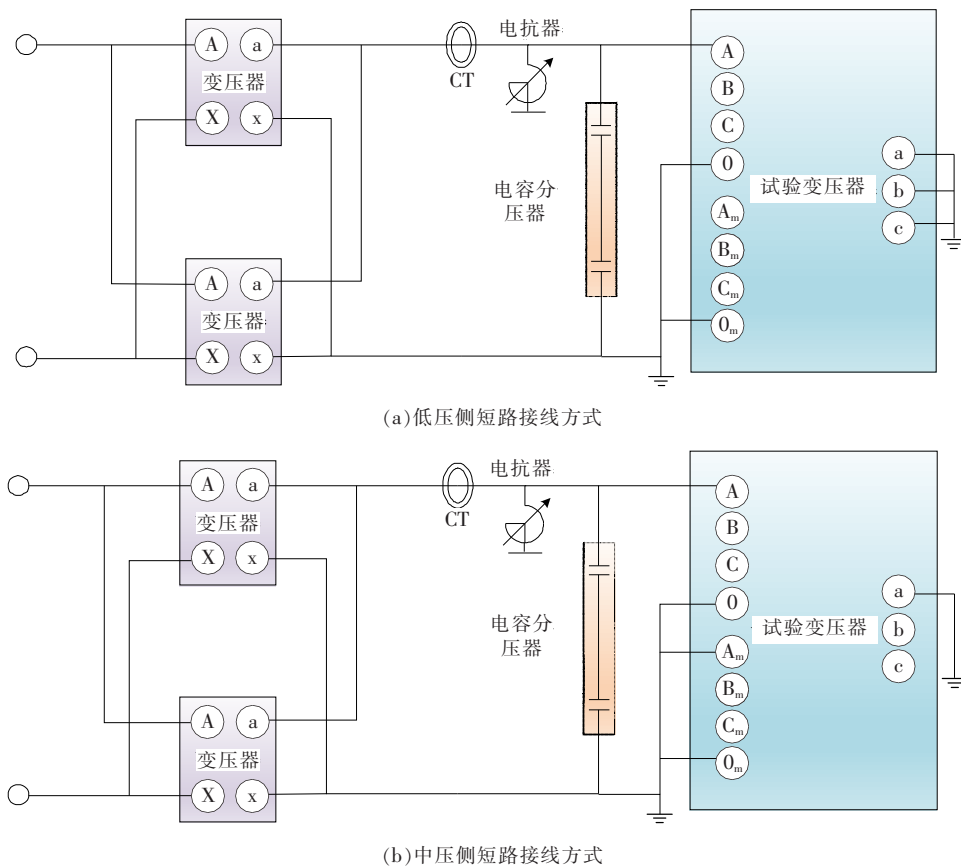


图 2 外部短路故障测试系统

Figure 2 External short circuit fault test systems

### 2.2 油流量测量系统

如图 3 所示,搭建了瞬态油流量测量系统,主要由环形质量流量计、数据采集模块和计算机组成。

试验中采用环形质量流量计,安装在主油箱和油枕之间,测量管路内瞬态油流速。测试采用 Ad-cantech USB-4716 数据采集模块,采集之前,使用

信号调理模块对原始信号进行放大、滤波,并将其转换为标准信号。采样频率 20 kHz,有 16 路模拟输入通道。此外,为尽量减少外部干扰源,试验中选择双芯金属屏蔽线作为通信线路。为了实时记录和处理大量数据,瞬态油流量测量软件在运行 64 位 Window 7 的工作站上运行。

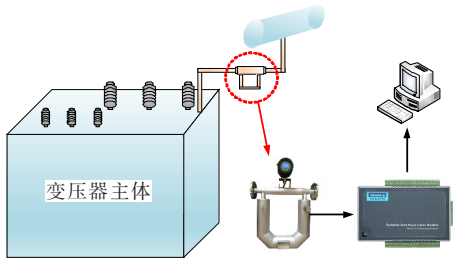


图3 油流量测量系统

Figure 3 Oil flow measurement system

### 3 结果与分析

#### 3.1 低压侧短路故障测试

记录了外部低压短路故障测试下的瞬态油流特性,如图4所示。其中,黑色曲线为电流信号,目的是给出了参考时间,红色曲线为测量的油流速率。油流持续时间为 $t_4 \sim t_3$ ,油流动作延迟时间为 $t_3 - t_1$ ,给定的参考短路电流信号持续时间为 $t_2 - t_1$ ,即250 ms。

故障电流大小分别设置为1、1.05、1.10、1.15、1.20、1.25、1.30倍的短路电流。低压侧短路故障测试结果如表1所示。

在这7次试验中,瞬态测量系统检测到由外部短路引起的明显的油涌。特别是在前1.20倍短路电流条件下,油流动作延迟345 ms,其瞬态最大速率已经达到2.78 m/s,这大大超过了瓦斯保护的阈值。此外,后续开展相同条件的测试,每次测试结果均不完全相同,存在一定误差,即在相同的输入条件下,测试的油流动作特性仍是有所差异的。

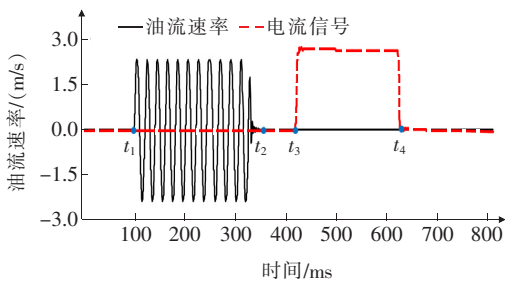


图4 油流特性短路试验测试结果

Figure 4 Oil flow surge characteristics under short circuit fault tests

表1 高低压短路测试结果

Table 1 Test results of high and low voltage short circuit

短路电流/A	油流持续时间/ms	油流动作延迟/ms	油流速率/(m/s)
1.00I	207	232	0.05
1.05I	167	279	0.14
1.10I	186	265	0.21
1.15I	198	468	0.38
1.20I	204	345	2.78
1.25I	201	316	1.02
1.30I	215	386	1.21

表2 高中压短路测试结果

Table 2 Test results of high and medium voltage short circuit

短路电流/A	油流持续时间/ms	油流动作延迟/ms	油流速率/(m/s)
1.00I	—	—	—
1.05I	209	369	0.06
1.10I	189	258	0.18
1.15I	175	432	0.25
1.20I	203	410	0.43
1.25I	216	298	0.86
1.30I	221	279	0.97

#### 3.2 中压侧短路故障试验

在中压侧短路故障测试下的瞬态油流特性如表2所示。在1倍短路电流故障试验中,没有出现油涌;在1.3倍短路电流的情况下,油流浪涌峰值达到0.97 m/s,持续时间为179 ms。总之,当电力变压器遭受外部短路故障,巨大的电磁力引起变压器绕组变形和振动,导致结构加速度作用于金属和周围液体之间的界面,进一步迫使油通过管道。即使短路故障已被清除,但油流也可能出现长达数百毫秒的长时间延迟。

#### 3.3 外部短路故障导致的油流动作延迟分布

对14次测试油流动作延迟结果进行统计,如图5所示。从测试结果看,短路测试中所有油流持续时间均在232 ms以上,最大延时为468 ms。这种延时现象主要是由于绝缘油的液体惯性,在外部短路故障情况下,阻止了主罐内部流场的变化,阻碍了

通过管道的浪涌。实际上,文献[7]报道气体继电器故障滞后于外部故障时间长达数百毫秒,这与本文研究的油流的延时现象相符。

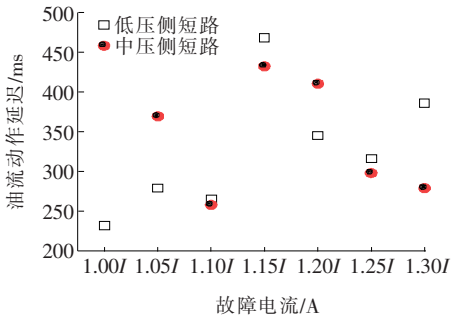


图 5 油流动作延迟分布

Figure 5 Oil flow action delay distribution

由图 5 可知,油流的延迟时间与故障电流大小无直接关联,在 232~468 ms 之间呈现无序的分布状态。

### 3.4 外部短路故障导致的油流速度特性

当电力变压器受到外部短路故障的影响时,巨大的电磁力使变压器绕组变形、振动,在金属与周围液体的界面上产生结构加速度。由此可以得出结论,绕组振动幅值和变压器内部结构是影响罐内流场变化的主要因素。从图 6 的油流速率结果可以看出,短路电流越大,在大多数情况下,油流产生的效果越显著,这也与文 2.1 节分析结果相似。

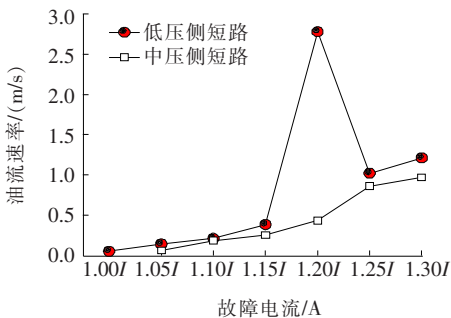


图 6 油流速率

Figure 6 Oil flow action speed

进一步,可依据本文的研究结果,对瓦斯保护的故障进行分析:传统的气体继电器是通过检测油流涌浪来运行的,一旦油流冲击的速度超过阈值,继电器就会动作。然而,根据我们的研究,变压器外部短路故障也将造成重大的和连续的油流通过管道。值得关注的是,在短路试验中,最大流速已经大于

2 m/s。显然,如果变压器内部故障和外部故障具有相同的故障特征,传统气体继电器则可能误动,将会给电力系统带来巨大的运行风险。

### 3.5 外部短路故障导致的油流动作的机理分析

变压器外部短路故障时,其绕组内产生的短路电流为

$$I = I_g e^{-\frac{t}{\tau}} - I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中  $I_g$  为故障电流。距故障源线  $r$  处的磁感应根据安培定律为

$$B = \frac{\mu}{2\pi r} I = \frac{\mu}{2\pi r} (I_g e^{-\frac{t}{\tau}} - I_m \sin(\omega t + \varphi)) \quad (4)$$

进一步,长度为  $dL$  的铜线的电磁力为

$$dF = IB dL =$$

$$\frac{\mu}{2\pi r} (I_g e^{-\frac{t}{\tau}} - I_m \sin(\omega t + \varphi))^2 dL \quad (5)$$

通过  $dF$  的展开项可以发现,外部短路故障时的电动力可分为衰减的直流分量、基频分量和第二谐波分量。这种能量会使附近的油移动,同时会使油压波动。运动带动附近油层的运动,使附近油层的压力发生变化。即振动和油压振荡以波的形式传播开来。

总而言之,由短路电动力引起的绕组振动可以导致油压的变化,进而导致发生外部故障时产生油流的涌动。但由于油压以波的形式传播需要一定的时间,因此在实验中产生了油流的延迟现象。

## 4 结语

本文为探究外部短路故障时管道内的油流特性,在电力变压器上建立了瞬态油流测量系统,开展了外部短路故障测试试验。

试验结果证实,短路电流引起的变压器绕组变形和振动会导致油流涌过管道。由于液体惯性,本文试验所测得的油流动作出现的时间延迟长可达数百毫秒。实际运行中的瓦斯保护误动时间滞后于外部故障的时间也长达数百毫秒,这与油流动作的延时现象相符。试验还表明,故障的严重程度和位置都会对油流涌浪产生影响。本文给出的油流动作延



迟结果可以为进一步研究油流冲击和瓦斯保护误动的机理提供重要参考。

### 参考文献:

- [1] 何先华,张远鹏,崔桂兴,等.基于回归算法的变压器故障检测方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):132-139.  
HE Xianhua, ZHANG Yuanpeng, CUI Guixing, et al. Research on transformer fault detection method based on a regression algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 132-139.
- [2] 黄新波,王享,田毅,等.基于 PSO-ELM 融合动态加权 AdaBoost 的变压器故障诊断方法[J].高压电器,2020,56(5):39-46.  
HUANG Xinbo, WANG Xiang, TIAN Yi, et al. Transformer fault diagnosis algorithm based on PSO-ELM fusion dynamically weighted AdaBoost[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 39-46.
- [3] 孔灿,张大宁,田杰,等.110 kV 变压器油纸绝缘套管不均匀绝缘受潮劣化分析[J].智慧电力,2020,48(4):119-124.  
KONG Can, ZHANG Daning, TIAN Jie, et al. Non-uniform moisture degradation analysis of 110 kV transformer oil-paper insulation bushing[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 119-124.
- [4] 李亮,范瑾,闫林,等.基于混合采样和支持向量机的变压器故障诊断[J].中国电力,2021,54(12):150-155.  
LI Liang, FAN Jin, YAN Lin, et al. Transformer fault diagnosis based on hybrid sampling and support vector machines[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 150-155.
- [5] 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,2008,32(S2):300-302.  
ZHANG Yunfeng. Reason and measure about transformer gas protect motion [J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 300-302.
- [6] 罗松林,黄盛超,赖绍奇,等.防止区外故障引起 500 kV 变压器瓦斯保护动作研究[J].机电信息,2018,(12):32-33+35.  
LUO Songlin, HUANG Shengchao, LAI Shaoqi, et al. Study on preventing 500 kV transformer gas protection action caused by out of area fault[J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(12): 32-33+35.
- [7] 李玉敦,李晨昊,王安宁,等.10 kV 配电变压器碰壳故障转移过电压分析及试验研究[J].供用电,2021,38(11):27-32.  
LI Yudun, LI Chenhao, WANG Anning, et al. Analysis and experimental research on transferring overvoltage caused by 10 kV distribution transformer line-shell short-circuit fault[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(11): 27-32.
- [8] 周丹,李正圆,孙文星,等.外部短路冲击下瓦斯保护动作性能研究[J].高压电器,2019,55(1):120-127+134.  
ZHOU Dan, LI Zhengyuan, SUN Wenxing, et al. Research on the gas protection performance under external short-circuit faults[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 120-127+134.
- [9] 孔德钱,张新燕,童涛,等.基于差分进化算法与 BP 神经网络的变压器故障诊断[J].电测与仪表,2020,57(5):57-61.  
KONG Deqian, ZHANG Xinyan, TONG Tao, et al. Transformer fault diagnosis based on differential evolution algorithm and BP neural network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 57-61.
- [10] 饶章权,许鸿翔,杨贤,等.外部故障下油浸式变压器内部流场建模与分析[J].南方电网技术,2017,11(4):45-51.  
RAO Zhangquan, XU Hongxiang, YANG Xian, et al. Modeling and analysis of oil flow distribution in oil-immersed transformer under external fault[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(4): 45-51.
- [11] 赵胜,李先明.一起因保护区外故障引起主变跳闸事故的分析[J].硅谷,2012,5(18):157+183.  
ZHAO Sheng, LI Xianming. Analysis of a main transformer trip accident caused by a fault outside the protection area[J]. Silicon Valley, 2012, 5(18): 157+183.