

特高压变压器油箱防爆措施及改进研究

卢理成^{1*}, 董弘川²

(1. 国网智能电网研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209;

2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Study on Explosion Proof Measures and Improvements for the UHV Transformer Tank

LU Licheng^{1*}, DONG Hongchuan²

(1. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

Abstract: In case of internal failure of UHV transformer, if the pressure cannot be released in time, it is very easy to cause deformation or even burst of oil tank, which will lead to combustion and explosion events. This paper introduces the commonly used explosion-proof protection devices for transformers and their advantages and disadvantages, and puts forward a new type of pressure relief device based on bursting disc. The effectiveness of the bursting disc pressure relief device is verified by the real combustion and explosion test and dynamic equivalent test. The test results show that under the arc fault with high explosion energy inside the transformer, the action speed and discharge efficiency of the bursting disc pressure relief device are better than that of the pressure relief valve, which can effectively avoid the explosion accident of the transformer.

Keywords: transformer; explosion proof; pressure relief valve; bursting disc; true type test

摘 要: 特高压变压器发生内部故障时如压力不能及时泄放, 极易造成油箱变形甚至爆裂, 进而导致燃爆事件。分析了变压器常用的防爆保护装置及其优缺点, 提出了一种基于爆破片的新型压力泄放装置, 并通过真型燃爆试验和动态等效试验对爆破片型压力泄放装置的有效性进行了验证。试验结果表明: 在变压器内部高燃爆能量电弧故障下, 爆破片型压力泄放装置动作速度和泄放效率均优于压力释放阀, 可有效避免变压器燃爆事故。

关键词: 变压器; 防爆; 压力释放阀; 爆破片; 真型试验

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (SGFJJX00GYJS2100017)。

Science and Technology Foundation of SGCC (SGFJJX00GYJS2100017).

0 引言

特高压变压器类设备工作电压极高, 当其中绝缘材料由于电、热、机械等因素发生劣化时, 可能导致绝缘材料性能下降进而被击穿, 出现电弧放电。电弧放电导致油的裂解和汽化, 气体吸收部分电弧能量导致温度升高、体积膨胀, 而变压器油则阻断了这种膨胀。二者之间的压力差产生了压力波, 动态压力的持续波动将使得变压器内部压力升高, 当压力升高水平超过变压器油箱所能承受的最大机械强度时, 将引发油箱开裂或爆炸。压力的升高水平主要取决于电弧的能量大小、持续时间和发生位置。当油浸式电力变压器 (包括换流变) 油箱内部压力因事故急剧升高时, 此压力如不及时释放将造成升高座或油箱变形甚至爆裂。当初级变压器爆炸后, 变压器油、混合气体和油雾通过破裂口向外猛烈释放, 这些热解产物混合气体和油雾与空气混合后点燃, 就会发生二次爆炸。当这些情况发生在密闭或拥塞区域时, 可能导致非常强烈的爆炸, 并对人员和设备造成威胁, 给社会经济带来严重损失^[1-2]。

本文梳理了变压器使用的压力保护装置及其优缺点, 分析了一种基于爆破片的新型压力泄放装置, 并通过真型模拟试验对比了压力释放阀与爆破片型压力释放装置在变压器内部电弧故障时的泄放效果, 试验结果表明: 在变压器内部高燃爆能量电弧故障下, 爆破片型压力释放装置动作速度和泄放效率均优于压力释放阀, 能有效避免变压器燃爆事故。

1 防爆措施

1.1 安全气道

在20世纪80年代, 电力变压器一般只装有一个安全气道, 是变压器唯一的防爆减压装置, 主要作用包括: ①当变压器内部压力突增危及油箱时, 气道易爆膜破裂, 使压力降低, 保证油箱安全; ②易爆膜破裂后, 安全气道能将喷出的油导向一个指定的方向, 减少火灾扩大的可能性^[3-4]。

安全气道在实际应用过程中经常存在不及时动作甚至不动作的情况, 主要原因是膜片为易爆材料如玻璃时, 没有准确的爆破压力, 除用统计法求出外, 事先不能检验, 在发生内部故障时油箱可能先于膜片破裂。为此, 曾在膜片表面有意划出伤痕, 使爆破压力及其波动幅度缩小, 但却容易出现过早破裂的情况。除此之外, 安全气道中存在油柱惰性问题。压力来源于油箱内部, 膜片则在安全气道的头部, 压力波传输到达后, 首先要推动油柱, 才能冲破膜片, 导致消耗时间过长, 油箱先发生破裂而气道失去了作用。

1.2 压力释放阀

压力释放阀是安全气道的替代产品, 压力释放阀可在油箱压力升高到其开启压力值时迅速开启, 使油箱内的压力快速降低; 当压力降到压力释放阀的关闭压力时, 压力释放阀可自行关闭, 使油箱内永远保持正压, 有效防止外部空气、水分及其他杂质进入油箱。动作过程主要为: 压力释放阀通过弹簧组压入法兰并使用衬垫密封, 当油箱内压力超出开启压力时, 压力释放阀向上弹出, 油和气体喷出并减小油箱内部的压力, 并可带或不带定向倒流装置; 当压力降至关闭压力以下时, 压力释放阀将再次密封^[5-6]。按照弹簧是否与变压器油接触, 压力释放阀可分为外弹簧和内弹簧两种形式。目前使用最多的为外弹簧式, 弹簧不直接与变压器油接触; 内弹簧式目前在特高压工程上应用较少。

一般情况下, 对于110 kV及以上变压器常用的压力释放阀, 压力释放阀开启压力大小为变压器油箱强度的0.5~0.6倍。对于110 kV变压器, 其开启压力一般为 (55 ± 5) kPa, 对应的关闭压力为29.5 kPa; 220 kV及以上变压器, 其开启压力一般为 (70 ± 5) kPa, 对应的关闭压力为37.5 kPa。即油箱内部压力达到 (55 ± 5) kPa或者 (70 ± 5) kPa时压力释放阀打开, 进行喷油泄压; 当压力降到29.5 kPa或者37.5 kPa时, 压力释放阀关闭。

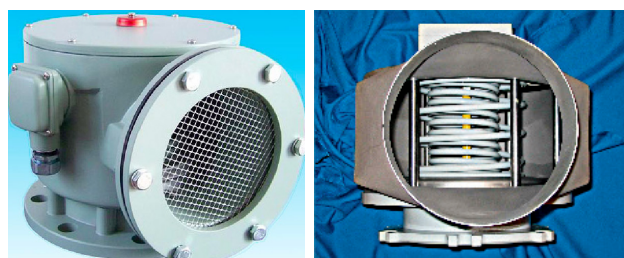


图1 典型压力释放阀示意图

Fig. 1 Schematic of typical pressure relief valve

常见压力释放阀的主要结构型式是外弹簧式, 并可带或不带定向导流装置, 其主要部件包括弹簧、阀座、弹簧座、阀壳体(罩)、标志杆、信号开关(出线盒)、密封圈等, 常见压力释放阀外形如图1所示。

传统的压力释放阀在电力变压器中应用超过40 a, 关于压力释放阀的研究, 有文献采用数值方法计算了不同口径的压力释放阀在不同能量故障下的排气效果^[7-9]。若想显著降低压力(即降低30%以上), 孔径大小至少为100 mm, 且当电弧能量达到6 MJ以上时, 效果微弱。

1.3 快速泄压系统

快速泄压系统(fast depressurization system, FDS)由法国SERGI Transformer Protector公司研制, 适用于1 MVA至1000 MVA油浸式电力变压器, 其主要功能可概括为: ①ms时间内释放油箱内压力(时间取决于电弧位置、能量、油箱体积等); ②通过向油箱内注入惰性气体, 将可燃气体从变压器排出; ③确保变压器的安全运维。

FDS是一种被动机械系统, 设计用于在发生电气故障后几ms内降低变压器油箱压力。根据电弧位置和变压器尺寸, 当压力波达到第一个峰值后, FDS可在0.5~20 ms内激活, 避免压力增加导致变压器爆炸。根

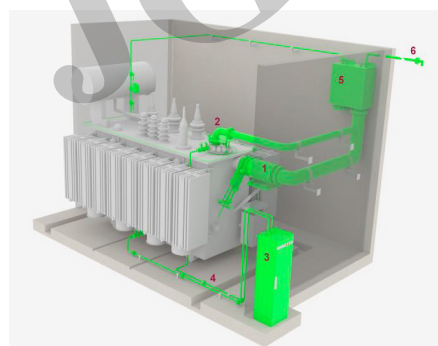


图2 典型FDS系统组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of typical FDS composition

据变压器类型和结构,可以应用不同的FDS配置。图2展示了一种典型的FDS配置。

FDS设备的具体工作流程包括:在低阻抗故障发生后的10 ms内,即第一个动压峰值到达箱壁后被激活。泄压装置2会迅速将变压器内的油和气通过减压室从油箱中排出,到达油气分离箱5,将爆炸性气体引导至偏远的地方,并利用惰性气体储存罐3向油箱内注入氮气,保护变压器的安全,管道6上安装有单向百叶窗结构的阀门,用以将分离后的可燃气体单向排出,并避免外部空气进入箱体内部。

2 爆破膜片型泄压装置

目前常用的泄压装置是压力释放阀,其顶部密封圈及侧面密封圈、膜盘为倒“U”字形结构,密封可靠性高。但受结构限制,在变压器内部发生放电故障时释放速度不及时,发挥作用效果有限。另一种技术路线是利用金属爆破膜片作为泄压装置,其在内部油压急速变化时,能随之快速动作开启泄压,即能够实现动压情况下的快速释放,从而在升高座发生内部短路故障时,能够快速定向泄放油流,降低内部压力,保护变压器免于爆炸,降低换流变设备失火风险^[10-11]。

2.1 爆破膜片

爆破片是不能重复闭合的安全装置,有非常精确定义的爆破点,其对于压力的反应非常迅速,在许多不同的应用中可以用来进行卸压,保护工厂、人群、环境及机器设备免受工艺流程中因过压或真空而造成的危险损害。

爆破片原本是一种非常简单的方案,近年来其设计已经有了非常大的进展,可以适用于有变化的系统需求,例如更精准的爆破允差、更高的泄放温度和操作温度,在许多工业过程中所起的作用越来越大。爆破片相对于电气及气动运作的安全系统,其最大优势是可靠性,这使其成为了工业中最重要的安全故障保护装置。爆破片具有即时响应、全通径释压等优势,几ms内即可释放过压或真空,且具有一定的经济性,相比其他的用于压力释放的安全系统,爆破片能够显著减少防护成本。

2.2 爆破膜片型泄压装置

爆破片型泄压装置主要由几个重要部件组成:爆破膜片及夹持器、减压舱、检测单元以及其他附件。

典型的爆破片型泄压装置有减压舱式和减压阀式两种型式。

减压舱式防爆膜型泄压装置主要由爆破膜片与减压舱组成,爆破膜片在变压器超压时爆破,减压舱为爆破后高速喷出的油气混合物提供泄压空间,如图3所示。

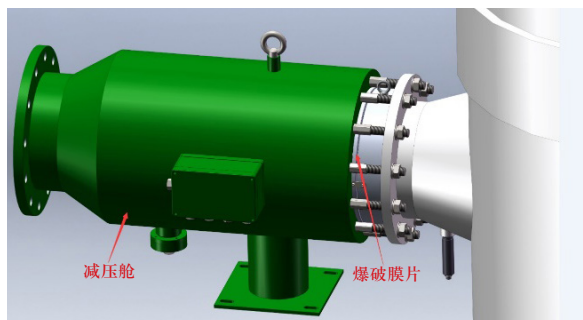


图3 减压舱式爆破膜片型泄压装置

Fig. 3 Depressurization chamber explosion-proof membrane pressure relief device

减压阀式膜片泄压装置主要由弹簧减压机构、爆破膜片与减压舱组成。在压力增速不大时,弹簧减压机构打开进行泄压;在压力急速上升、弹簧机构泄压能力不足时,爆破膜片破裂,打开更大的泄压通道进行泄压,如图4所示。

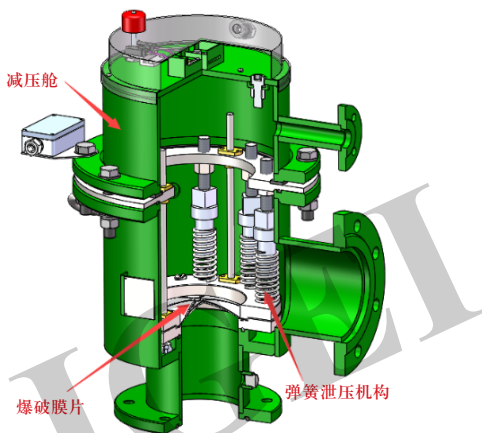


图4 减压阀式爆破膜片型泄压装置

Fig. 4 Pressure relief valve bursting disc pressure relief device

2.3 可靠性分析

爆破膜片配置有上下两个夹持器,将爆破膜片固定在设定位置处,使其在爆破时能够按照设计的位置爆破。爆破膜片承担正向压力的主要单元为托架,托架上设置鳄齿及若干个桥段,爆破时托架上的桥段受力断裂,被压力介质(液体、气体或气液混合物)推

开, 并与流体方向成 90° (压力上升速率不足时, 该角度将小于 90°), 金属密封膜被鳄齿割破, 打开泄压通道。这也决定了该爆破膜片的开启仅由变压器内部压力进行驱动, 只有变压器内部压力达到膜片爆破压力, 爆破膜片才会开启。

爆破时间的控制可通过对防爆膜型压力释放装置的开启时间进行测试, 只有通过测试的产品才能投入实际应用。试验要求如下: 通过在变压器油中模拟短路故障的方法, 电弧能量不小于 50 MJ/s 的情况下, 3次试验至少有2次爆破时间不大于 7 ms 为合格。实际测试中, 测得公称直径为 $\text{DN}250$ 、爆破压力为 0.25 MPa 的反拱形爆破膜片开启时间为 3.5 ms 。

从试验保证角度来看, 无论是防止爆破膜片误动还是拒动, 其本质在于控制膜片爆破压力的精准度, 即压力达到阈值时爆破时间和爆破压力是否准确控制。爆破膜片的执行标准《GB567—2012爆破片安全装置》中规定的爆破允差范围为正负偏差相同, 而变压器用防爆膜型泄压装置其爆破允差只允许正值, 允差范围高于国标, 如表1所示。

表 1 爆破片爆破压力允差范围
Table 1 Allowable range of bursting pressure of bursting disc

膜片 类型	标定爆破 压力/MPa	相对标定爆破压力的允差	
		国标要求	工程要求
正拱形 或 反拱形	0.01~0.1	-25% ~+25%	0~+25%
	0.1~0.3	-0.015 MPa ~+0.015 MPa	0~+0.015 MPa
	0.3~100	-5% ~+5%	0~+5%

爆破压力的准确性主要通过对爆破膜片的开启压力进行考核, 该项考核分为三个阶段, 首先是单独对膜片进行爆破试验, 确保其在要求的压力下可以开启。在常温下向试验罐内充以压缩空气或液体, 当罐内压力达到膜片爆破压力时, 爆破膜片破裂, 膜片状

态感知系统动作。在同一批次膜片中, 随机选择3片, 做爆破试验3次, 记录爆破压力值, 爆破压力允差符合规定为合格。其次是对防爆膜型泄压装置进行整体试验, 该试验和开启时间试验相似, 均需要通过在变压器油中模拟短路故障的方法, 电弧能量不小于 50 MJ/s 的情况下, 进行开启压力测试。第三阶段是对膜片进行疲劳性能试验后, 再次进行爆破试验, 试验过程和膜片的直接爆破试验一致。

爆破片膜型泄压装置防误动主要通过工艺保证以及试验考核保证两部分进行控制, 其中工艺保证主要通过背压托架实现; 试验保证通过爆破压力相关试验来考核。防爆膜型泄压装置的主要应用风险点在于, 其膜片会随着变压器承受长时间的压力, 故膜片的疲劳性能以及疲劳极限是确保其长期运行稳定性的重要指标。

疲劳试验的主要原理是将装有爆破膜的泄压装置置于频繁升压、降压的循环试验装置中, 按照要求进行规定次数的循环, 再考核爆破片的爆破压力 (疲劳性能试验), 或者经规定循环次数后爆破片是否出现破裂或渗漏等现象 (疲劳极限试验)。

对防爆试验中应用的同一批次的反拱形爆破膜片分别进行疲劳性能试验与疲劳极限试验。该样品的额定爆破压力为 0.25 MPa (80°C 时), 由于试验设备限制只能在 20°C 下进行试验, 20°C 时的额定爆破压力为 0.287 MPa 。

疲劳性能试验中上限压力、下限压力分别为 0.24 MPa 、 0.08 MPa 。进行 $10\ 000$ 次以上的循环后, 均未发生破裂, 且试验完成后爆破压力范围在 0.29 MPa ~ 0.295 MPa , 均在允差范围内。

本次疲劳极限试验为摸底试验, 故试验设置为直到膜片破裂为止。为模拟变压器制造过程中的抽空过程 (负压状态), 其上限压力、下限压力分别为 0.22 MPa 、 -0.1 MPa , 进行 4196 次以上的循环后破裂。具体试验数据如表2所示。

表 2 爆破片疲劳试验数据表
Table 2 Bursting disc fatigue test data sheet

试验类型	试验数量	上限压力	下限压力	疲劳次数总计	试验结果	试验完成后立即进行爆破 (20°C)
疲劳性能试验	2	0.24 MPa	0.08 MPa	11 720	未破裂	0.29 MPa 0.295 MPa
疲劳性能试验	2	0.22 MPa	0.08 MPa	10 472	未破裂	0.295 MPa 0.295 MPa
疲劳极限试验	2	0.22 MPa	-0.1 MPa	4196	破裂	

(注: 膜片型号 YEF250-0.25-80; 爆破压力 0.25 MPa (80°C 时); 爆破温度 80°C ; 膜片制造批次号 2020s-0008; 试验用介质 空气; 试验时环境温度 $25^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$)

考虑变压器只有在注油前会抽真空,正常运行时不会出现负压情况,且正常工作时变压器内部处于微正压状态,压力波动很小(压力波动通常由变压器油枕的油位变动引起)。因此,在承压方面,以上疲劳试验结果完全能满足爆破膜片在变压器上长期安全稳定运行的要求。

3 对比试验

本文通过动压等效试验、真型燃爆试验和两种不同的试验方法对压力释放阀和爆破片型压力释放阀的防爆效果进行对比^[12-15]。

3.1 动压等效试验

本文研发了一套能够模拟变压器中产生油压的装置,如图5所示。在装有一定高度液体的密闭容器中充入高压气体,密闭容器下方设置爆破片,当密闭容器中的气体压力达到爆破片的爆破压力时,爆破片迅速破裂,密闭容器内液体通过泄压管道泄出至动压等效区域上。

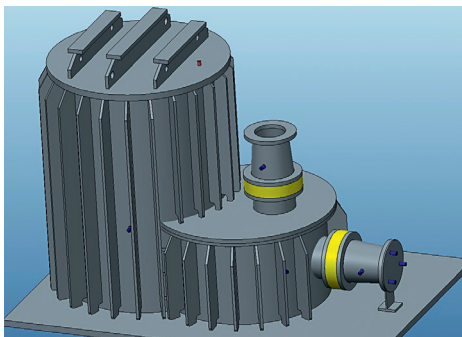


图5 动压等效试验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of dynamic pressure equivalent test device

经仿真验证和实际测量,该装置产生的压力上升曲线在40 kPa/ms~160 kPa/ms之间,如图6所示,压力曲线与实际变压器发生燃爆时箱体内壁压力曲线比较一致,压力曲线与电弧故障真型试验中获得的压力曲线变化趋势基本一致,也验证了该装置的有效性。

在密闭容器上安装0.8 MPa的爆破片,其内部气体体积控制为670 L,在不安装泄压装置时通过传感器测量得到其最大压力可达1.25 MPa。在此配置下,在动压等效区域安装爆破片型压力泄放装置和压力释放阀,进而对比不同泄压装置在相同压力下的实际效果。

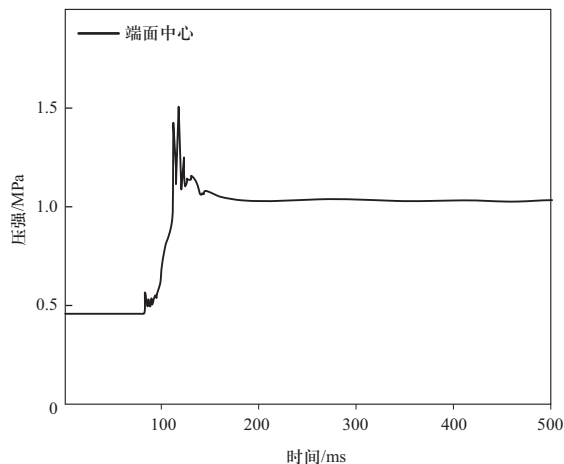


图6 动压等效试验装置压力上升曲线

Fig. 6 Pressure rise curve of dynamic pressure equivalent test device



(a) 爆破片型压力泄放装置泄压效果



(b) 压力释放阀泄压效果

图7 爆破片型压力泄放装置和压力释放阀泄压效果

Fig. 7 Pressure relief effect of bursting disc type pressure relief device and pressure relief valve

从图7可以看出,在相同气体体积及爆破压力的动态液压冲击下,压力释放阀损坏,液体呈发散状喷出;爆破片破裂,液体经导管引出。相比较而言,爆破片泄压时间短,且无残压。

3.2 真型模拟试验

为进一步对比压力释放阀和爆破片型压力泄放装置,本文分阶段多次进行了变压器内部的大电流、高

爆燃容量电弧放电故障真型模拟试验, 再现了短路故障爆燃的发展过程, 其中最大电流达40 kA, 最高弧压达8 kV, 瞬时容量可达 300 MVA 以上, 最长燃弧时间490 ms, 最大电弧能量达到了56 MJ, 与实际发生的电弧故障在同一水平^[16-17]。

试验模型包括两个部分, 上部模型为新制作单节升高座, 下半部分为原有圆柱形试验油箱。上部升高座顶端留有可连接试验套管的安装法兰, 升高座壁上设有压力释放装置接口以及手孔等, 下部试验油箱也留有可连接试验套管的安装法兰。升高座及试验油箱内部根据试验需要安装试验电极, 试验时的短路电流通过试验套管引入试验模型内, 在电极之间产生电弧, 电极的设计安装与试验模型相配合。试验模型外形尺寸约4.6 m×3.4 m×4.6 m (含试验套管), 总重约15 t, 其中油重约4.5 t, 试验模型示意图见图8。



图8 真型试验模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of true test model

在升高座区域的压力释放装置接口分别装设带爆破片型泄压装置和压力释放阀, 两次试验均施加40 kA电流, 施加电压为18 kV, 持续时间为100 ms。

通过设置的压力传感器得到的测量参数可以看出, 压力释放阀与防爆膜所表现出来的压力释放作用存在差异, 泄压效果如图9所示, 具体表现为: 压力释放阀作用阈值低, 其动作压强仅为70 kPa, 其动作时刻较早, 对第一瞬态压力波峰削弱明显; 爆破片动作阈值高, 其动作压强达到250 kPa, 防爆膜作用下的压力下降速度相对压力释放阀更快。

通过试验现象可以看出, 在同样的燃爆能量下, 压力释放阀的螺栓脱落, 整个压力释放阀已经脱离升高座; 而爆破片型压力释放装置在爆破片破裂后经导油管将变压器中的油泄放到油池中。可以看到, 在高燃爆能量下, 压力释放阀因其固有特性, 无法及时将变压器内部压力泄放, 而爆破片型压力泄放装置则能



图9 不同泄压装置的泄压效果

Fig. 9 Pressure relief effect of different pressure relief devices

及时将内部压力泄放, 降低变压器燃爆的概率。

为进一步研究爆破片型压力释放装置安装导油管对压力泄放效果的影响, 本文通过真型试验设置了对比试验, 试验结果如图10所示。

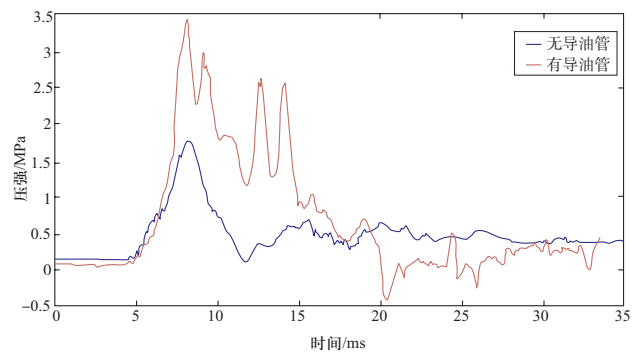


图10 有导油管对爆破片型压力泄放装置泄压效果的影响

Fig. 10 Influence of guide pipe or not on pressure relief effect of bursting disc type pressure relief device

在有导油管的试验中, 电弧电流40 kA, 为无导油管试验20 kA的2倍, 压力峰值达到3.5 MPa, 约为无导油管试验1.7 MPa的2倍。在无导油管的试验中, 由波峰下降到第一个波谷经过4 ms, 压力下降1.5 MPa, 压力下降速率为0.38 MPa/ms; 在有导油管的试验中, 由波峰到第一个波谷经过4 ms, 压力下降约2.3 MPa, 压力下降速率为0.58 MPa/ms。之后在无导油管试验中, 达到谷底后即保持低值, 而在有导油管的试验中, 达到第一个波谷后会上升到第二个波峰, 峰值为2.5 MPa, 达到波峰后下降到低值需4 ms, 压力下降2.2 MPa, 压力下降速率为0.55 MPa/ms。总体来看, 有导油管条件下压力泄放速率不受明显影响, 在压力更高的条件下具有更快的压力泄放速率, 总体泄压时间10 ms仅比无导油管时多6 ms, 唯一的问题在于有导油管会引入新的压力波峰。

无论是否加装导油管, 升高座内的压力均可以在10 ms内降低至零值区域, 并稳定在低值。导油管对泄压能力没有明显影响。

4 结论

本文分析了变压器常用的防爆保护装置及其优缺点, 提出了一种基于爆破片的新型压力泄放装置, 并通过真型燃爆试验和动态等效试验对爆破片型压力泄放装置的有效性进行了验证。试验结果表明: 在变压器内部高燃爆能量电弧故障下, 爆破片型压力泄放装置动作速度和泄放效率均优于压力释放阀, 可有效避免变压器燃爆事故。

参考文献

- [1] 刘泽洪, 卢理成, 周远翔, 等. 变压器升高座区域电弧故障与压力特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4688-4698.
LIU Zehong, LU Licheng, ZHOU Yuanxiang, et al. Research on pressure characteristics of AC turret on arc fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4688-4698(in Chinese).
- [2] 吕俊霞. 电力变压器防火防爆措施及方法[J]. 精密制造与自动化, 2010(4): 62-64.
- [3] 王文铮. 从安全气道到压力释放器[J]. 变压器, 1984, 21(1): 28-29.
- [4] 郑桐. 变压器安全气道的正确应用[J]. 华北电力技术, 1982(8): 23-26.
- [5] 俞立凡. 压力释放阀动作原因分析及优化措施和改进设想[J]. 变压器, 2015, 52(5): 37-39.
YU Lifan. An analysis of action reason of pressure relief device and its optimal measures and improvement idea[J]. Transformer, 2015, 52(5): 37-39(in Chinese).
- [6] 张家宁, 张耘赫. 变压器压力释放阀故障的主要原因及改进方法[J]. 电气时代, 2020(1): 54-56.
- [7] ABI-SAMRA N, ARTEAGA J, DAROVNY B, et al. Power transformer tank rupture and mitigation—a summary of current state of practice and knowledge by the task force of IEEE power transformer subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1959-1967.
- [8] MULLER S, BRADY R, DE BRESSY G, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 1—experimental tests on large transformers[C]//Proceedings of ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference, July 27–31, 2008, Chicago, Illinois, USA.
- [9] 闫晨光, 张保会, 郝治国, 等. 电力变压器油箱内部故障压力特征建模及仿真[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 179-185.
YAN Chenguang, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Modeling and simulation of pressure characteristics of power transformer tanks' internal faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 179-185(in Chinese).
- [10] BRODEUR S, DASTOUS J B. Design and testing of an arc resistant power transformer tank[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 699-706.
- [11] 罗亮, 邱勇令, 李金忠, 等. 油浸式变压器新型压力释放阀动力学分析[J]. 变压器, 2022, 59(9): 20-29.
LUO Liang, QIU Yongling, LI Jinzhong, et al. Dynamic analysis of a new pressure relief valve for oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2022, 59(9): 20-29(in Chinese).
- [12] YAN C G, ZHOU X, XU Y, et al. Experimental study on the gas bubble temperature around an arc under insulation oil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1245-1248.
- [13] 李金忠, 汪可, 任家帆, 等. 分接开关油室电弧故障压力传播过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7651-7658.
LI Jinzhong, WANG Ke, REN Jiafan, et al. Study on pressure propagation process of arc fault in OLTC oil chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7651-7658(in Chinese).
- [14] 刘旭晖, 朱振宇, 郭玥, 等. 一种电弧引燃电缆的电气火灾模拟方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 136-142.
LIU Xuhui, ZHU Zhenyu, GUO Yue, et al. Electrical fire source simulation for igniting cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 136-142(in Chinese).
- [15] 秦译为, 张蓬鹤, 宋如楠, 等. 新型电力系统下电弧故障诊断技术和发展趋势[J/OL]. 电测与仪表: 1-11[2022-12-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221025.0903.002.html>.
- [16] 张琛, 熊庆, 汲胜昌, 等. 基于压电材料的变压器振动能量收集装置研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 173-178.
ZHANG Chen, XIONG Qing, JI Shengchang, et al. Vibration energy harvesting device for transformer based on piezoelectric material[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 173-178(in Chinese).
- [17] 张军, 陈霄, 张旺, 等. 基于GP-NLSM的变压器绕组热点温度建模[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 165-171.
ZHANG Jun, CHEN Xiao, ZHANG Wang, et al. Hot spot temperature prediction model of transformer based on GP-NLSM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 165-171(in Chinese).

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-12-30。

作者简介:



卢理成

卢理成(1964), 男, 教授级高级工程师, 主要从事特高压直流工程主设备技术研究和研制工作。通信作者, E-mail: 13910505442@139.com。

董弘川(1990), 男, 工程师, 主要从事特高压工程主设备技术研究工作, E-mail: 373487920@qq.com。

(责任编辑 张宇)