

基于一种新型高速泄压技术的油浸变压器 防爆防火方案研究

王树国¹, 朱述友²

(1. 中国石化工程建设有限公司, 北京 100101; 2. 北京中瑞和电气有限公司, 北京 101301)

摘要: 通过对油浸式变压器近几年频繁发生的多起爆炸事故的阐述, 指出油浸式变压器的火灾危险性, 分析其危险的根源, 并提出一种基于全新泄压技术的防范油浸式变压器爆炸与火灾的有效途径和方法。

关键词: 油浸式变压器; 电弧故障; 变压器爆炸; 防爆; 防火; 灭火

Study on explosion proof and fire protection scheme of oil immersed transformer based on a new high speed pressure relief technology

WANG Shuguo¹, ZHU Shuyou²

(1. Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China; 2. Beijing Zhongruihe Electric Co., Ltd., Beijing 101301, China)

Abstract: This paper points out the fire risk of oil-immersed transformer, analyzes the root cause of the danger, and puts forward an effective way and method to prevent oil-immersed transformer explosion and fire based on the new pressure relief technology.

Key words: oil-immersed transformer; arc fault; transformer explosion; explosion prevention; fire prevention; fire extinguishing

0 引言

变压器是电力系统中用于电能变换的重要设备, 对电能的传输和使用具有重大作用, 尤其是大型油浸式变压器, 由于承载着大范围的输变电任务, 其安全与正常运行非常重要。

油浸变压器内部发生电弧放电故障或变压器油过热时, 就有可能引发爆炸或严重的火灾。这些变压器的安全问题直接影响到电力系统的正常运行, 而且威胁到周围建筑设备和人员的安全。因此有必要对重要的变压器设置防爆保护及防火灭火保护。

1 变压器爆炸火灾危险性

油浸式变压器含有大量变压器油, 一旦遇到

事故, 容易发生爆炸和火灾, 危害极大。

图1为某大型铝厂整流变压器发生大火, 60 t变压器油被引燃。



图1 某大型铝厂整流变压器大火

Fig. 1 The rectifier transformer of a large aluminum plant is on fire

2 变压器发生爆炸的原因分析

2.1 变压器内部产生高能电弧故障

当变压器发生内部电弧故障时,电弧瞬间气化并分解周围的变压器油,产生大量气体,形成一个大的气泡,该气泡压缩周围的变压器油,形成变压器油箱内部的高速动压。

该动压不仅幅值高,据相关研究,该幅值甚至达到1.2~1.5 MPa^[1],而且传递速率非常快。如果该动压不能及时释放,会在极短的时间内形成超过变压器外壳承受力的静压,导致变压器发生爆炸,图2和图3为大型油中电弧故障试验实拍照片。

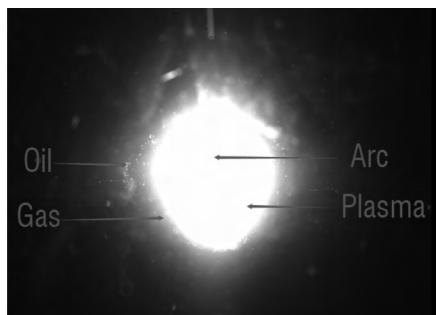


图2 油中电弧
Fig. 2 Arc in oil

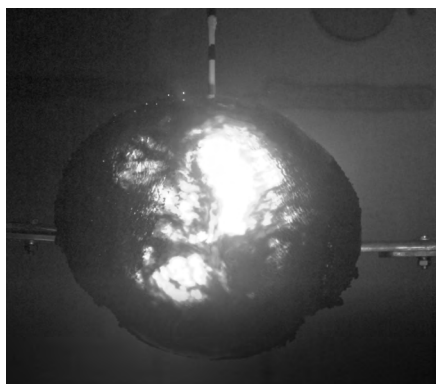


图3 油中电弧产生的气泡
Fig.3 Bubbles from electric arc in oil

电弧故障发生以后,在变压器油中产生一个很大的气泡。该气泡是由于电弧气化了周围的变压器油,产生了大量的瓦斯气体。该气体位于变压器油中,其扩散速度由于受到变压器油本身固有惯性的限制,必然压缩周围的变压器油,形成

高速动压。

图4为一个5.18%相间故障仿真动压波形图,故障导致的内部压力可达1.2 MPa,而一般变压器油箱的最高允许压力仅为100 kPa。

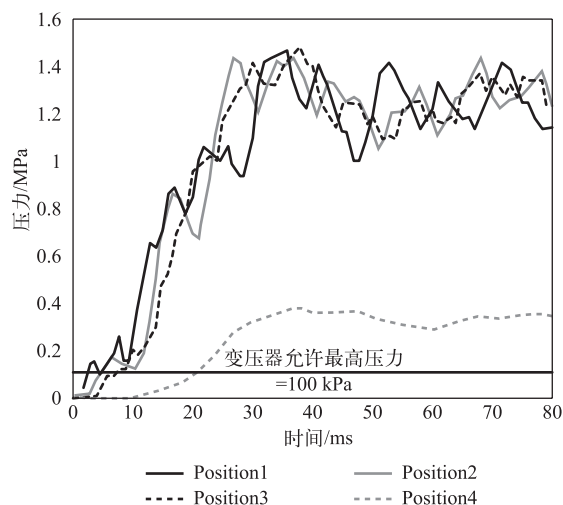


图4 5.18% 相间短路故障仿真动压波形图

Fig.4 5.18% phase to phase short-circuit fault simulation dynamic pressure waveform

2.2 变压器的薄弱部位没有得到有效保护

分析国内外大量变压器爆炸起火案例,这些爆炸事故除了发生在变压器本体以外,在变压器套管及套管升高座、有载调压分接开关等部位发生的电弧故障也占有很大比例。735 kV单相机组故障位置与爆炸和火灾发生见下表。

表 735 kV 单相机组故障位置与爆炸和火灾发生率

Tab. Fault location and explosion and fire occurrence rate of 735 kV single phase unit

故障位置	爆炸	火灾	火灾事故率
套管	25	11	0.44
高压连接头至油箱	15	9	0.60
高压连接头至升高座	8	4	0.50
绕组内部	21	0	0.00
分接开关、铁心等	9	0	0.00

注:魁北克水电站统计(1965—1986年)。

2.3 变压器传统保护的局限性

2.3.1 压力释放阀

(1) 压力释放阀开启速度受压力增速影响大
开启压力与压力增速(压力梯度)的关系如图

5所示^[2]。随着压力梯度的增加，压力释放阀的开启压力急剧增加，甚至远超变压器的耐受极限。

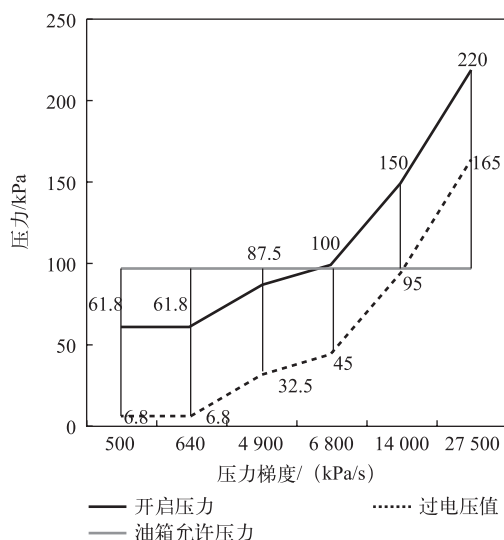


图5 压力释放阀的开启压力与压力梯度之间的关系
Fig.5 The relationship between the opening pressure of the pressure relief valve and the pressure gradient

(2) 传统压力释放阀有效泄压面积小

如图6所示， $\phi 130$ 压力释放阀的有效泄压面积仅为其出口面积的44%左右，如图6所示。

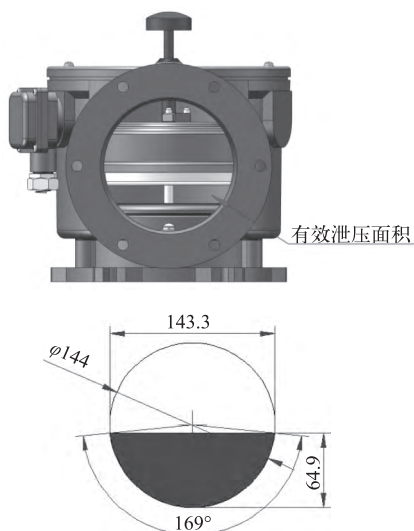


图6 压力释放阀的有效泄压面积 ($\phi 130$)
Fig.6 Effective pressure relief area of pressure relief valve ($\phi 130$)

(3) 泄压通道复杂

如图7所示，复杂的压力释放阀内部泄压通道结构和定向喷射的导向通道增加了流体阻力，

严重影响了高速泄压性能。

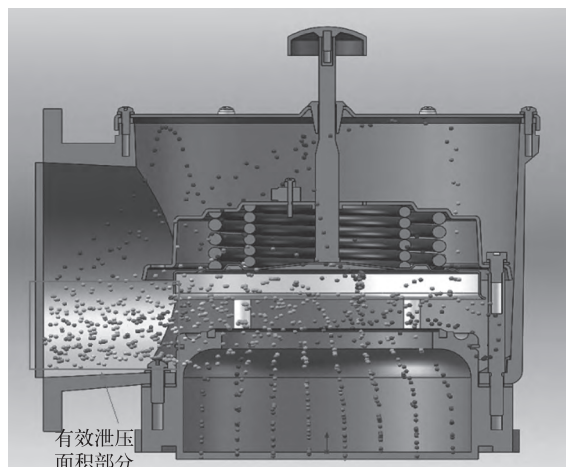


图7 定向喷油的压力释放阀内部流体泄压仿真 ($\phi 130$)
Fig.7 Simulation of fluid pressure relief in directional injection pressure relief valve ($\phi 130$)

2.3.2 气体继电器

气体继电器速动性不足，不能在数毫秒内动作，且通过驱动断路器跳闸来实现保护功能。

2.3.3 变压器现有灭火装置的局限性

水喷雾灭火系统的灭火介质为水，泡沫灭火系统的灭火介质为泡沫灭火剂。这两种灭火装置均为火灾发生以后才会动作，因此只能灭火，不能防止变压器爆炸。排油注氮灭火设备是依靠先排油再注氮的方式进行保护，电弧故障或者火灾发生以后，启动排油泄压，泄压速度不能达到毫秒级，因此只能用于防火灭火，不能防止变压器爆炸。

3 新型变压器防爆防火保护方案研究

3.1 变压器防爆防火保护薄弱点分析

变压器的爆炸，往往从最弱点开始。变压器的薄弱点，主要在套管及套管升高座、有载分接开关和本体油箱，因此防爆方案应该保护上述范围。

3.2 变压器新型防爆防火保护设计原理

(1) 增大泄放面积

泄放面积直接决定了泄压能力，传统压力释放阀除了速动性不足之外，泄压面积较小，也是其泄压性能不够的重要因素。不同容量的变压器

应该选用不同的泄压口径, 计算总的泄压面积, 确保有足够的泄压能力^[3]。

(2) 加快开启速度

电弧故障导致的高速动压压力增速很大, 达到数百兆帕每秒, 根据规范NFPA850—2020《发电厂和高压直流变电站的防火推荐规程》相关规定, 其防爆压力释放装置必须在数毫秒内打开, 但传统的阀门式的压力释放装置或者依靠外力驱动的泄压装置很难实现毫秒级的开启速度(压力释放阀的2 ms开启, 是指在25~40 kPa/s的压力增速条件下, 膜盘跳起到最高位置处的时间, 对于压力增速远超过上述范围的情形, 则开启时间远远超过该时间)。因此, 毫秒级的泄压必须采用膜片式的高速泄压装置。

(3) 不影响变压器的安全稳定运行

变压器内部有慢速动压(或静压)、高速动压。不同泄压装置具有不同的工作特性。弹簧式的压力释放装置虽然其开启速度受到压力增速影响比较大, 但是具有自动复位的特征, 膜片泄压装置泄压速度快, 但泄压以后必须更换才能工作; 因此泄压措施的选择要综合考虑各种压力特征, 选取恰当的泄压装置, 保证变压器既能稳定运行, 又能安全防爆。

(4) 采用防消结合措施

变压器的安全, 除了采取高效的防爆措施之外, 还需要采取有效的防火灭火措施。

1) 变压器内部, 给故障部位注入惰性气体, 隔离氧气, 稀释可燃性气体。这样既可起到预防火灾的作用, 对于油箱内部的火灾, 也可以迅速扑灭。

2) 变压器外部还可配置其他消防措施, 例如防火隔离墙; 对于非常重要的负荷, 例如特高压变压器, 可以增加泡沫灭火系统或者水喷雾等。

4 新型变压器防爆防火保护系统设计

4.1 设计方案

变压器防爆防火系统是一套专门适用于油浸式变压器的高效防爆防火的保护系统, 主要由防爆泄压系统和防火灭火系统两大系统组成。

防爆泄压系统的主要泄压装置如图8和图9所示, 包括弹簧泄压机构和膜片泄压装置两部分。

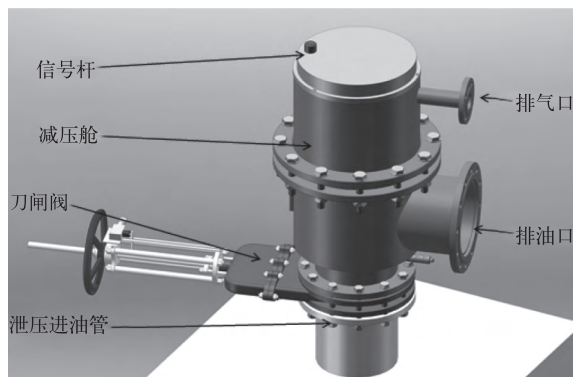


图8 阀膜组合泄压防爆装置

Fig.8 Valve membrane combined pressure relief explosion-proof device

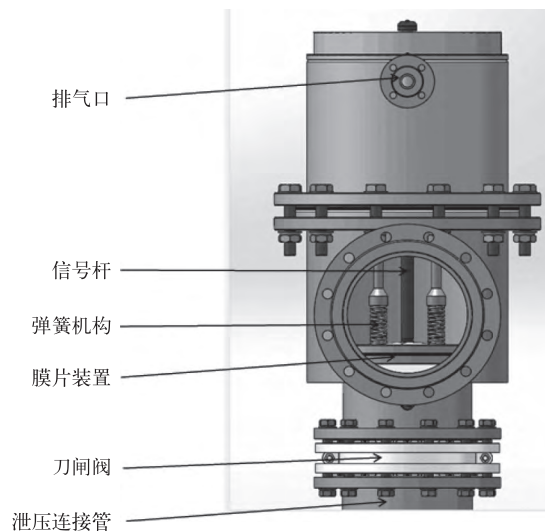


图9 阀膜组合泄压防爆装置

Fig.9 Valve membrane combined pressure relief explosion-proof device

4.2 系统工作原理

(1) 防爆泄压原理

当变压器内部压力增加并超过设定阈值时, 弹簧泄压通道首先打开泄压, 并快速复位; 当发生电弧故障时, 变压器内部就会出现高速动压; 弹簧机构因为速动性不足而滞后动作, 防爆膜片被首先击破, 瞬间(数毫秒内)打开高速泄压通道, 变压器内部压力迅速降低。

(2) 防火灭火原理

当控制系统收到膜片破裂信号或者火灾信号

以后，如果控制系统同时收到了断路器跳闸和任一电气保护信号（重瓦斯、过电流和接地）等，就会立即发出启动信号，打开氮气释放阀，将高纯氮气注入到故障油腔，隔离氧气，驱离瓦斯气体，实现防火灭火。

4.3 新型变压器防爆系统功能

新型变压器防爆系统包括如下功能：①系统毫秒级响应；②不依赖电气驱动，可靠性高；③泄压排油可控，无环境污染；④故障恢复快，停电时间短；⑤可以预防火灾和快速灭火。

防止了爆炸就没有危险的油气外溢，降低了火灾危险；同时，对故障部位腔体内注入高纯氮气，隔离氧气，防止火灾发生，对已发生火灾，可以快速灭火。

4.4 保护方案设计

将QPRD技术用于油浸式变压器的防爆防火保护时，根据变压器的结构型式不同，保护方案可以分为以下几种：

1) 保护变压器本体油箱、套管升高座和有载分接开关（OLTC）；该方案针对变压器本体油箱、有载调压分接开关，设置QPRD型膜阀组合式高速泄压装置，能适应变压器的多种压力变化，既能够确保变压器的长期稳定运行，又能保证变压器在遇到极端危险的电弧故障时，可以快速泄压，防止爆炸；对于220 kV及以上的油浸式电力变压器，一般可以采用全面保护方案，如图10所示。

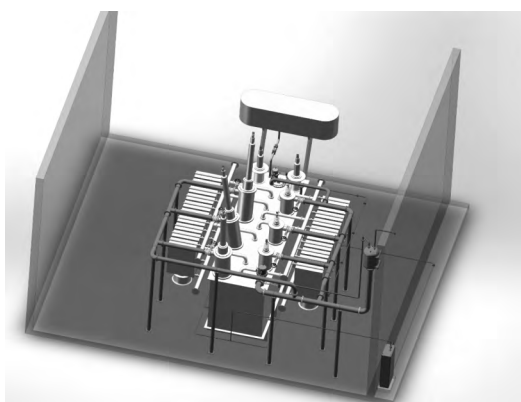


图 10 FB3 型变压器防爆防火保护系统

Fig.10 FB3 transformer explosion proof and fire protection system

2) 保护变压器本体油箱、有载调压分接开关（OLTC）分别如图11、图12所示。该方案针对变压器本体油箱、有载调压分接开关设置QPRD膜阀组合式防爆泄压装置，可以有效解决各种压力变化。

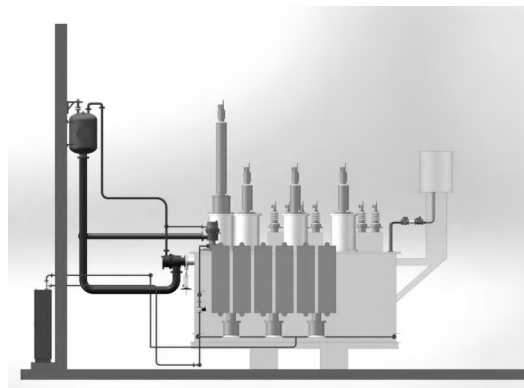


图 11 FB2 型变压器防爆防火保护系统

Fig.11 FB2 transformer explosion proof and fire protection system

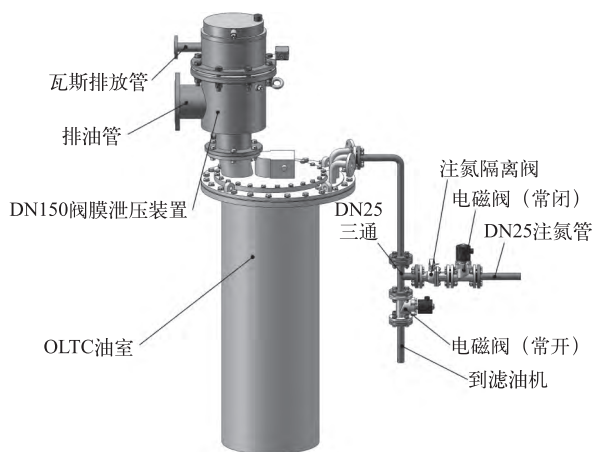


图 12 OLTC 防爆防火保护方案

Fig.12 OLTC explosion proof and fire protection scheme

3) 保护变压器本体油箱如图13所示。该方案只针对变压器本体油箱加装QPRD型膜阀组合式防爆泄压装置，既能够代替状态压力释放阀，又能够实现高速泄压防爆。

上述几种泄压方案可以同时设置一套氮气注入系统，分别给变压器本体油箱、套管升高座和有载调压分接开关引入注氮管，在遇到电弧故障危险时，可以在泄压以后注入高纯氮气，隔离氧气，防止起火燃烧。

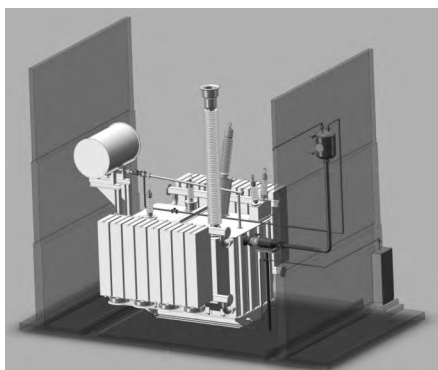


图 13 FB1 变压器本体油箱防爆防火保护方案

Fig. 13 FB1 transformer body oil tank explosion-proof and fireproof protection scheme

4.5 系统现场试验

4.5.1 电弧故障下的防爆试验

为了验证防爆泄压效果，研发组已经做了大量的内部电弧故障试验，如图14所示。

1) 2016年5~6月，在沈阳虎石台变压器国家质量检验中心，在DEKRA实验室工作人员的见证下，做了内部故障试验，爆破片准确及时破裂。

2) 2018年6~7月，与西安交通大学展开合作，在河南高压电器研究所，在VEIKI试验室的见证下，在40 MV·A变压器油箱里做了爆破膜片的电弧故障防爆泄压试验，试验结果达到设计要求。

3) 2021年7月，再次与西安交通大学展开合作，在河南高压电器研究所，在VEIKI试验室的见证下，在40 MV·A变压器油箱里做了QPRD的电弧故障防爆泄压试验，试验结果达到设计要求。



图 14 MR 分接开关加装 QPRD 的防爆泄压试验

Fig.14 Explosion proof pressure relief test of MR tap changer with QPRD

4.5.2 灭火试验

如图15所示，油箱装有10 t变压器油；顶部有40%的开口；预先将变压器油加热至70℃；然后引燃，燃烧3 min后，再开启注氮灭火系统，约1 min后，大火熄灭。



图 15 注氮灭火试验

Fig.15 Nitrogen injection fire extinguishing test

5 新型变压器防爆防火系统实际应用案例

新型高速泄压技术的油浸变压器防爆防火系统已经在国内外得到了大量应用，如图16、图17所示。经过实际运行数据测试分析，变压器均得到了有效的保护，应用效果良好。



图 16 安装于海外某国项目

Fig.16 Installed in an overseas project



图 17 安装于国内某石化项目

Fig. 17 Installed in a domestic petrochemical project

6 结束语

本文通过大量的变压器爆炸及火灾案例，强调了变压器火灾危险性，分析变压器爆炸的主要原因，同时也分析了变压器现有的各种保护装置的优缺点。指出目前变压器的传统保护措施，例如压力释放阀、瓦斯继电器、水喷雾和泡沫喷雾等保护技术，都不同程度存在保护的局限性，进而研发新型高速泄压的变压器防爆防火保护系统。该系统防爆泄压设备采用膜阀组合结构，综合爆破膜片与压力释放阀各自的优点，同时采用高纯氮气，在变压器遇到故障时可以高效地隔离火灾，提高了变压器的防爆能力及防火能力，将

变压器火灾隐患消灭于萌芽之中，保护理念由事故后的灭火处理改为事故前的主动预防，对电力系统的安全稳定运行具有重要的现实意义及应用价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 梅珊, 艾宏, 于成公. 简述压力释放阀的开启压力和开启时间[J]. 变压器, 2006, 43(9): 27-30.
- [3] BRADY R, MULLER S, PETRONVAN B M, et al. prevention of transformer tank explosion: part 3: design of efficient protections using numerical simulations[C]. Asme Pressure Vessels and Piping Conference, 2009.

作者简介

王树国(1968—), 男, 教授级高工, 首席专家, 研究方向为工业领域供配电、发输电等。

(收稿日期: 2022-09-30)