第40卷 第4期
2024年4月

电网与清洁能源
Power System and Clean Energy

Vol.40 No.4
Apr. 2024

文章编号:1674-3814(2024)04-0044-10 中图分类号:TM411 文献标志码:A

特高压换流变压器压力释放阀布置方式

程林[1,2],周盟[1,2],郭家旭[3],罗传仙[1,2],张静[1,2],黄勤清[1,2],闫晨光[3]
(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 210061;
2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司,湖北 武汉 430074;
3. 西安交通大学电气工程学院,陕西 西安 710049)

A Study on the Arrangement of Pressure Relief Devices in UHV Converter Transformers

CHENG Lin[1,2], ZHOU Meng[1,2], GUO Jiaxu[3], LUO Chuanxian[1,2], ZHANG Jing[1,2], HUANG Qinqing[1,2], YAN Chenguang[3]
(1. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210061, Jiangsu, China;
2. Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

ABSTRACT: The rupture and explosion of the converter transformer oil tank pose a serious threat to the safe and stable operation of the power system while the pressure relief valve protects the equipment by releasing overpressure during an arcing fault. By analyzing the mechanism of gas bubble pulsation during the fault period, a theoretical model and its numerical calculation method for the action conditions of the pressure relief valve, the increase of oil pressure due to internal arcing faults in the converter transformer are established. Simulations are performed on an actual 500 kV ultra-high voltage converter transformer, and characteristics of faulty oil pressure variations under different pressure relief valve arrangements are obtained. The simulation results suggest that when an internal arc fault occurs in the converter transformer, the internal fault oil pressure is unevenly distributed in space; and the arrangement of the pressure relief valves has a more significant impact on the pressure relief in the vicinity of their mounting position and a lesser effect on overpressure in other positions. The simulation results also show that optimizing locations of pressure relief valves in the converter transformer can effectively reduce the peak oil pressure during the arcing fault.

KEY WORDS: converter transformer; pressure relief device; arrangement; internal arcing fault; numerical simulation

摘要:换流变压器油箱破裂及爆炸起火事故严重威胁电力系统安全稳定运行,压力释放阀在电弧故障期间通过泄放超压保护设备。通过分析故障期间瓦斯气泡脉动机理,建立压力释放阀动作条件、换流变压器内部电弧故障油压升高理论模型及其数值计算方法。以1台实际的500 kV特高压换流变压器为研究对象,开展数值仿真研究,得到不同压力释放阀布置方式下的故障油压变化特征。仿真结果表明:换流变压器发生内部电弧故障时,其内部故障油压在空间上分布不均,压力释放阀布置方式对其安装位置附近的压力泄放影响较为明显,而对其余位置超压影响较小;优化换流变压器压力释放阀布置位置可有效降低电弧故障期间油压峰值。

关键词:换流变压器;压力释放阀;布置方式;内部电弧故障;数值仿真

换流变压器是特高压直流输电工程的关键设备,起到了连接交直流系统枢纽的作用,其可靠运行直接关系着直流系统的安全稳定[1-3]。换流变压器通常装设有压力释放阀,其不仅可动作于报警信号,还可通过排放内部绝缘油以泄放故障过程中产生的超压[4-6]。然而,近年来换流变压器因内部故障导致的油箱破裂、爆炸起火事故时有发生,严重威胁着电力系统的安全稳定运行,现有压力释放阀的布置方式受到质疑。因此,有必要研究电弧故障期间油压变化特征

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5500-202055419A-0-0-00)。
Project Supported Science and Technology Project of the SGCC Headquarters(5500-202055419A-0-0-00).

及压力释放阀的泄压效果，优化压力释放阀布置，进而提高其故障期间的泄压防爆性能[7-12]。

对于变压器局部放电、局部过热等早期故障，通常采用溶解气体分析法、人工智能方法进行故障诊断[13-18]。文献[19-24]介绍了基于振动特征的变压器监测方法。与早期轻微故障不同，由短路引起的高能电弧故障将产生明显的油压升高，可能导致变压器箱体破裂。有效泄放故障期间产生的超压可以避免油箱破裂，在20世纪60年代至70年代，变压器配备有安全气道，管道用一层防爆玻璃膜密封[25]。这种方法成本较低，但存在明显的缺点，较长的排气通道流阻较高，可能引入反向压力阻止防爆膜破裂，且在变压器上方排出的油气混合物有燃烧起火风险。在过去的几十年，基于弹簧-膜盘结构的可重新密封压力释放阀取代了安全气道。当膜盘受到的油压大于预设的开启压力时，压力释放阀开始泄放油压，而当膜盘上的压差降低到了开启压力的50%~60%时，膜盘将重新密封。压力释放阀有多种尺寸可供选择，内部绝缘油含量小于40 000 L的变压器安装1个压力释放阀，而大型电力变压器安装2个以上。

目前国内外对于压力释放阀安装位置的研究相对较少，而相关研究主要集中其动作性能分析。文献[26]对压力释放阀的安装位置做出了经验性总结，指出其通常安装在大型变压器2端。文献[27]开展了换流变压器有载分接开关真实燃弧试验，总结了不同故障条件下压力释放阀的动作时间，并建议其在实际工程中仅投入报警使用。文献[28]介绍了变压器升高座内部燃弧试验，试验结果表明压力释放阀在高能电弧故障期间可以有效泄放瞬态超压，避免变压器发生燃爆事故。文献[29]对电力变压器压力释放阀动作特性进行分析，提出了其开启压力现场校验的方法。文献[30]对压力释放阀弹簧结构、泄放流量、阀座厚度、螺栓强度等参数进行了计算和讨论。文献[31]整定了分接开关油室压力释放阀开启压力，并分析了各类安全装置用于保护分接开关的性能。文献[32]对压力释放阀膜盘运动过程进行建模，仿真计算了其在油流冲击下的动作特性。文献[33-38]分别分析了油中电弧放电特性及变压器故障油流涌动特征。文献[39-42]对100 MV·A变压器油箱内部故障进行了显示动力学模拟，仿真结果表明，使用单一压力泄放装置在低阻抗故障期间难以预防变压器破裂。

电弧故障期间变压器内部油压特征是影响压力释放阀动作的关键因素，国内外学者针对这一特征开展了广泛研究。文献[43]对配电变压器故障过程中的油中压力、空气部分压力以及顶盖破裂现象进行了理论建模，并明确了影响压力升高最主要的因素是电弧能量。文献[44]对电抗器内的电弧故障进行了显示动力学仿真，得到了故障期间设备内部油压及箱体形变分布规律。文献[45]介绍了气液两相的密闭箱体中的燃弧试验，研究了油压升高与气泡的关系和电弧深度对压力脉动的影响，并指出在高温常压条件下很难得到一个固定的单位能量产气的关系[46]。文献[47-48]描述了变压器内部故障产气、气泡脉动的现场试验研究，介绍了故障下变压器内部油压升高、油箱形变的理论建模和数值仿真方法，同时提出了基于压力特征的数字式变压器保护方案。

压力释放阀的动作受设备内部故障超压的影响。本文根据电弧故障后的气泡脉动机理，建立压力释放阀动作条件以及电弧故障超压模型。对1台实际的换流变压器进行有限元建模，对不同故障条件下多种压力释放阀布置方式的泄压效果进行多物理场耦合仿真计算。对比不同压力释放阀布置方式下的油压升高及压力释放阀动作时间，得出其安装位置优化建议。

1 理论建模

换流变压器发生内部故障时，高能电弧汽化、裂解周围绝缘油产生高温高压气泡，气泡的快速膨胀急剧压缩绝缘油并导致油压骤升。压力释放阀膜盘可感受油压冲击，当油压超过压力释放阀的预设开启压力后，压力释放阀动作并泄放流体，在一定程度上缓解故障超压。因此，换流变压器压力释放阀在内部电弧故障下泄放油压是一个复杂的多物理场耦合问题，涉及瓦斯气泡脉动、绝缘油流场变化以及压力释放阀开启等因素的相互作用。本节依次建立电弧作用下的压力释放阀动作条件和电弧故障超压模型。

1.1 压力释放阀动作条件

压力释放阀结构如图1所示，其主要包括弹簧、膜盘、外壳、指示杆、报警开关和阀座等部件。其动作基于力的平衡，当入口压力小于弹簧预紧力时，合力作用在膜盘上向下，膜盘保持在关闭状态；

当换流变压器油箱中的压力逐渐增加到整定值时,合力降低到 0。内部压力升高到整定值以上,膜盘开始升高离开原来位置,压力释放阀打开。压力释放阀动作条件可表示为

$$F_{\text{flow}} > F_{\text{spring}} + G_{\text{disc}} \tag{1}$$

式中:F_{flow} 为流体冲击力;F_{spring} 为弹簧预紧力;G_{disc} 为膜盘重力。压力释放阀可以安装于变压器顶盖或变压器侧壁(若水平安装于侧壁则膜盘重力的影响可以忽略)。

认为压力释放阀开启后与大气连通,其边界条件可表示为

$$p_{\text{outlet}} = p_0 \tag{2}$$

式中:p_{outlet} 为压力释放阀出口处的压强;p_0 为大气压强,取 101.3 kPa。

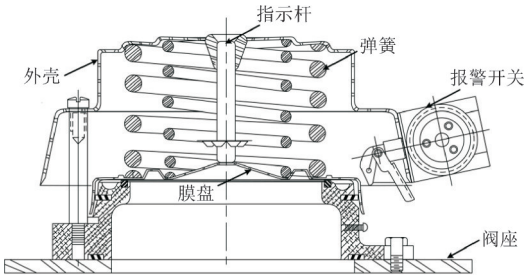

图1 压力释放阀结构
Fig.1 Structure of the pressure relief valve

1.2 电弧故障超压模型

设备发生内部故障时,故障电弧释放的能量 W_{arc} 可计算为[39]

$$W_{\text{arc}} = \int_{t_0}^{t} P_{\text{arc}} \mathrm{d}t = \int_0^t u_{\text{arc}} \cdot i_{\text{arc}} \mathrm{d}t \tag{3}$$

式中:t_0 为故障起始时刻;t 为时间;P_{arc} 为电弧功率;u_{arc} 为电弧电压;i_{arc} 为电弧电流。

故障气体的动力学行为受故障电弧能量、油箱尺寸、绝缘油粘度及表面张力共同影响,该动力学行为的数学表示如下[43]:

$$\ddot{R}R^2\left(\frac{1}{R}-\frac{1}{r_{\text{d}}}\right)+\dot{R}^2\left(\frac{3}{2}-\frac{2R}{r_{\text{d}}}+\frac{R^4}{2r_{\text{d}}^4}\right)=\frac{1}{\rho}\left[p_{\text{b}}-\frac{4\mu\dot{R}}{R}-\frac{2\sigma_{\text{oil}}}{R}-p_{\text{d}}\right] \tag{4}$$

式中:R, $\dot{R}$, $\ddot{R}$ 分别为气泡半径、运动速度与加速度;r_{d} 为气泡到流体边界的距离;p_{b} 为气泡内压;p_{d} 为流体边界处压强;ρ 为流体密度;μ 为液体黏性系数;σ_{oil} 为绝缘油表面张力系数。

根据理想气体状态方程以及热力学第一定律,瓦斯气泡内压 p_{b} 可用下式计算:

$$p_{\text{b}} = \frac{(\gamma-1)}{V_{\text{b}}} U_{\text{b}} \tag{5}$$

式中:γ 为气体的比热比;V_{b} 为气泡体积;U_{b} 为气泡内能。

$$U_{\text{b}} = Q_{\text{in}} - 4\pi\int_{t_0}^{t} p_{\text{b}}(\tau)R(\tau)^2\dot{R}(\tau)\mathrm{d}\tau + U_0 \tag{6}$$

式中:Q_{in} 为注入气泡的能量;U_0 为气泡初始内能。

此外由于气泡脉动过程中几何形状变化较大,为避免网格质量恶化,需要建立动网格模型,如下所示[44]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho\phi \mathrm{d}V + \int_{\partial V} \rho\phi(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_{\text{g}})\mathrm{d}\boldsymbol{A} = \int_{\partial V} \Gamma\nabla\phi \mathrm{d}A + \int_V S_\phi \mathrm{d}V \tag{7}$$

式中:V 为控制体积;ϕ 为一般标量;∂V 为移动边界;$\boldsymbol{u}_{\text{g}}$ 为动网格运动速度;$\boldsymbol{u}$ 为流体速度;$\boldsymbol{A}$ 为面矢量;Γ 为扩散系数;S_ϕ 为 ϕ 的源项。

2 仿真模型及设置

2.1 仿真模型

本节以 1 台 500 kV 特高压换流变压器为研究对象。根据实际换流变压器的装配体模型建立几何模型,如图 2 所示。该台换流变压器长约 9 m、宽约 3 m、高约 5 m,在建立的几何模型中适当忽略了部分细节结构。

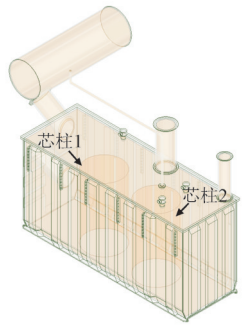

图2 换流变压器几何模型
Fig.2 Geometric model of the simulated converter transformer

使用对复杂几何形状适用性更好的四面体单元对几何模型进行网格剖分。网格划分结果将影响模型的计算精度以及计算时间。通常来说,网格数量较少时,数值计算时间较短,但计算结果误差可能较大,甚至难以满足收敛要求。通过减小网格尺寸可提高网格数量,获得更准确的计算结果,然而网格数量的提升会增加计算成本。由于流体区

域存在故障气泡脉动变化的过程，因此在瓦斯气泡表面需要进行局部网格加密处理。此外，由于流体行为受流场区域几何形状影响较大，因此在流体域曲率较大的位置划分了质量较高、尺寸较小的网格，这在一定程度上也会增加计算成本。流体区域的网格划分及质量分别如图 3、图 4 所示，其中流体域中网格单元最小尺寸为 0.002 5 m，四面体网格节点数为 63 598 个，单元数量为 306 445 个，平均单元质量为 0.84。

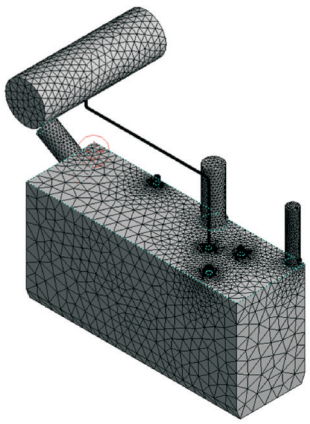

图3　换流变压器流体域网格
Fig.3　Fluid domain mesh of the simulated converter transformer

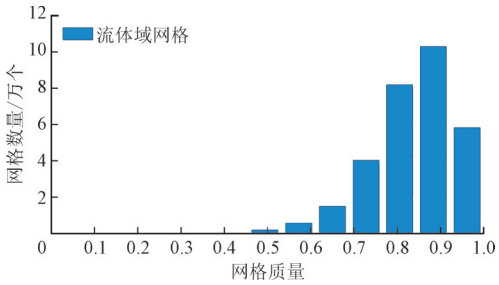

图4　换流变压器有限元模型单元质量图
Fig.4　Element quality in the finite element model of the simulated converter transformer

2.2　仿真设置

换流变压器配置有 3 个压力释放阀，其开启压力为 70 kPa，有效泄压口径为 F130 mm。标准规定压力释放阀开启压力的偏差应在±5 kPa 以内[45]。由于换流变压器发生内部高能电弧故障时油压升高速率极快，压力释放阀动作压力偏差对动作时间及泄压效果影响可以忽略。同时，压力释放阀所承受的静压力由油枕与连接管内部绝缘油自重产生。各压力释放阀均位于顶盖上同一高度，因此，静压力的存在不影响压力释放阀动作。在仿真过程中设置了 3 个压力测点 1、2、3，分别位于换流变顶盖靠近油枕连接管、前壁面中心以及右壁面中心，如图 5(a)所示。油枕中的流体采用压力出口边界条件，压强设置为大气压。压力释放阀动作前其出口边界条件设置为壁面，当流体压力超过其动作压力后将相应的流体边界设置为压力出口，流体域其余的面都设置为壁面条件。气泡表面运动利用用户自定义函数(user's defined function，UDF)定义，其中气泡表面网格的更新由每个迭代步的计算结果决定，并采用扩散光顺与局部网格重构。由于计算涉及动网格边界的运动，若采用较大的时间步长易出现负体积问题。在保证计算精度与成本的情况下将时间步长设置为 0.1 ms。湍流模型使用标准 k-e 模型。流体域材料为 25 号矿物绝缘油，其密度为 895 kg/m^3，运动粘度为 9.6×10^{-6} m^2/s。

3　仿真结果与讨论

换流变压器绕组匝间短路故障是一种较为常见且具有较大危害性的故障类型。本文研究了在不同故障位置及故障严重程度条件下、不同压力释放阀布置方式对油压升高的影响。3 种不同压力释放阀布置方式如图 5 所示。

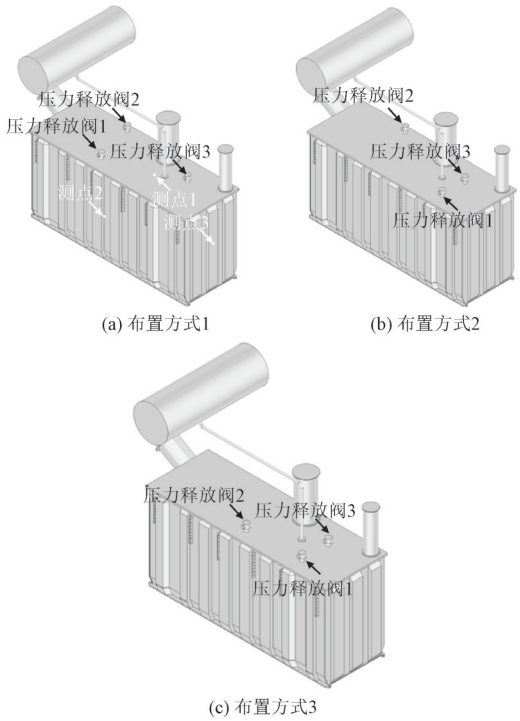

图5　3种不同压力释放阀布置方式
Fig.5　Three different arrangements of pressure relief valves

3.1 柱2中部发生1.2 MJ电弧故障

本小节考虑当换流变压器柱2网侧绕组中部发生1.2 MJ电弧故障时,仿真计算3种不同压力释放阀布置方式下的故障超压。

以压力释放阀布置方式1的油压计算结果为例,典型的故障超压分布如图6所示。由图6可知,换流变压器内部故障超压在空间上呈现明显的非均匀分布,在时间上呈现波动特征。

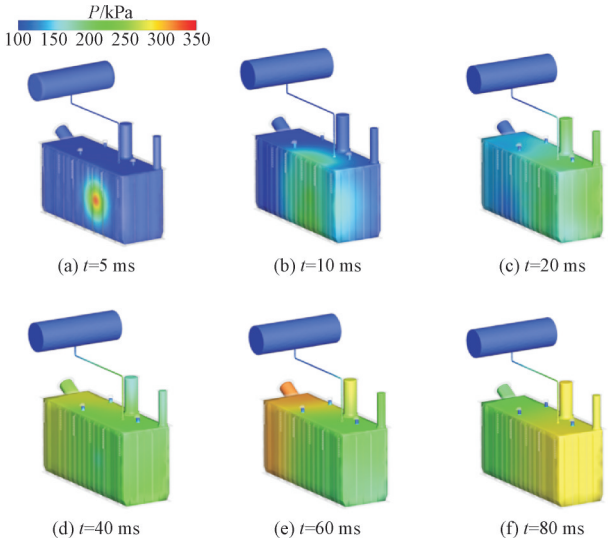

图6 电弧故障期间油压分布云图

Fig.6 Oil pressure distribution during an arcing fault

3种布置方式下各压力释放阀动作时间如表1所示,测点1、2、3处的故障超压对比如图7—图9所示。在故障期间,受瓦斯气泡脉动以及油箱结构的共同影响,换流变压器内部油压在时间、空间上呈现出非均匀分布的特征。不同安装位置压力释放阀的入口压力升高时间及速率明显不同,因而各压力释放阀动作时间有所区别。安装位置距离故障点较近的压力释放阀动作时间更快,具有较短动作时间的压力释放阀布置方式有助于及时缓解油压升高。本小节中,与布置方式1和2相比,布置方式3中3个压力释放阀的安装位置距离故障点较近且中间无绕组等结构,布置方式3中压力释放阀1和压力释放阀2动作时间较短,分别于t=10.2 ms和t=10.0 ms动作,因此布置方式3的故障超压最低。由于布置方式1中压力释放阀2距离故障点较远且中间存在绕组等结构,在该种方式下压力释放阀2直到t=17.6 ms才动作,因此采用布置方式1时各测点压力最高。

表1 1.2 MJ电弧故障下3种布置方式压力释放阀动作时间

Table 1 Operation time of pressure relief devices in three arrangements under a 1.2 MJ arcing fault

布置方式	动作时间/ms		
	压力释放阀1	压力释放阀2	压力释放阀3
1	13.4	17.6	14.2
2	10.0	17.6	14.2
3	10.2	10.0	14.2

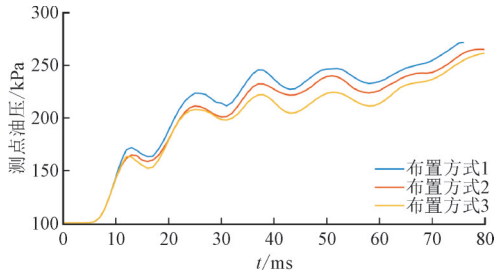

图7 1.2 MJ电弧故障下3种布置方式测点1的油压曲线

Fig.7 The curves of oil pressures at Point 1 in different arrangements under a 1.2 MJ arcing fault

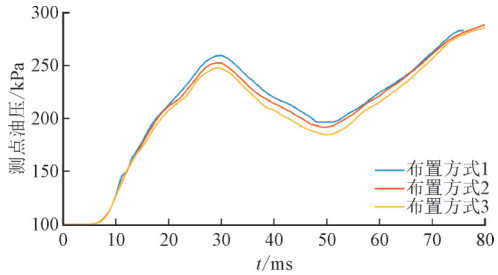

图8 1.2 MJ电弧故障下3种布置方式测点2油压曲线

Fig.8 The curves of oil pressures at Point 2 in different arrangements under a 1.2 MJ arcing fault

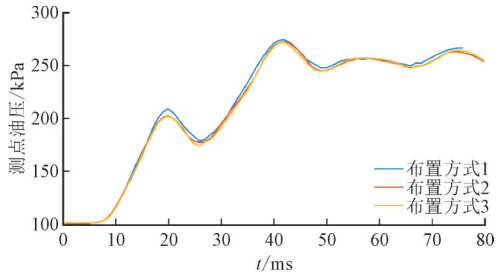

图9 1.2 MJ电弧故障下3种布置方式测点3油压曲线

Fig.9 The curves of oil pressures at Point 3 in different arrangements under a 1.2 MJ arcing fault

由图7可知,布置方式3对于缓解该故障条件下的超压最为有效。布置方式3下的测点1油压峰值相较布置方式1降低23.5 kPa,故障期间油压平均值降低11.8 kPa。由于布置方式3中压力释放阀安装位置更为靠近测点1,因此布置方式3中此点油压明显低于其余2组算例。对于测点2,布置

方式 3 的油压同样最低，为 248.5 kPa，而采用布置方式 1 时该点油压峰值则为 260.3 kPa，二者相差 4.5%。由于测点 2 位于前壁面中心靠近故障点处，压力释放阀的快速动作可一定程度上降低该处的压力升高。测点 3 位于换流变前右壁面，不同布置方式对该点的油压影响不大，3 种布置方式中该点油压峰值最多仅相差 1.5%。这是由于绕组等结构削弱了压力释放阀在该点的泄压效果，因此不同压力释放阀安装位置对于该点附近超压泄放影响相对较小。

3.2　柱 1 中部发生 4 MJ 电弧故障

本小节设置换流变压器柱 1 网侧绕组中部 4 MJ 电弧故障，仿真计算 3 种不同压力释放阀布置方式下的故障油压。3 种布置方式下各压力释放阀动作时间如表 2 所示，测点 1、2、3 处的油压曲线如图 10—图 12 所示。

表 2　4 MJ 电弧故障下 3 种布置方式压力释放阀动作时间
Table 2　Operation time of pressure relief devices in three arrangements under a 4 MJ arcing fault

布置方式	动作时间/ms		
	压力释放阀 1	压力释放阀 2	压力释放阀 3
1	4.0	4.5	5.9
2	5.9	4.5	5.9
3	5.9	3.5	5.9

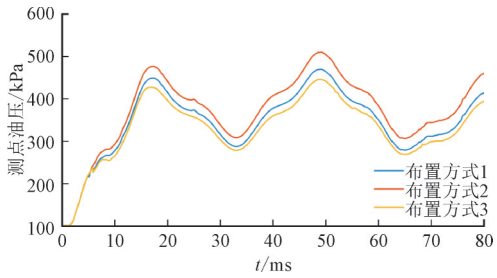

图 10　4 MJ 电弧故障下 3 种布置方式测点 1 油压曲线
Fig.10　The curves of oil pressures at Point 1 in different arrangements under a 4 MJ arcing fault

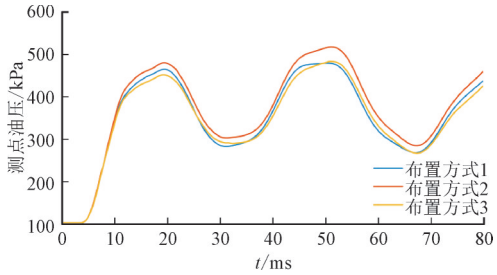

图 11　4 MJ 电弧故障下 3 种布置方式测点 2 油压曲线
Fig.11　The curves of oil pressures at Point 2 in different arrangements under a 4 MJ arcing fault

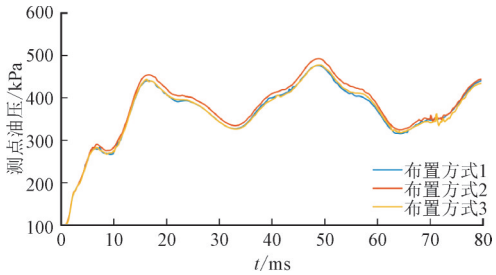

图 12　4 MJ 电弧故障下 3 种布置方式测点 3 油压曲线
Fig.12　The curves of oil pressures at Point3 in different arrangements under a 4 MJ arcing fault

由于故障能量相较于 3.1 小节明显增加，本小节中换流变内部故障油压峰值提高了近 1 倍，因此各压力释放阀的动作时间也大幅降低，均在 t=6 ms 之前动作。当故障发生在芯柱 1 时，布置方式 2 中 3 个压力释放阀的安装位置距离故障点较远且中间存在绕组等结构，因而该布置方式下压力释放阀动作时间最晚且测点油压最高。布置方式 2 中压力释放阀 1 和压力释放阀 2 分别于 t=5.9 ms 以及 t=4.5 ms 动作，相较于布置方式 1 和布置方式 3 分别滞后了 1.9 ms 和 1.0 ms，因此布置方式 2 各测点油压在 3 种布置方式中最高。与 3.1 小节类似，布置方式 3 具有最好的泄压效果，其压力释放阀 2 动作时间最快，仅为 3.5 ms。

与 3.1 小节类似，布置方式 3 中测点的故障超压幅值最低。布置方式 2 中各压力释放阀距离故障点较远，因此其动作时间较长，测点 1 和测点 2 油压峰值分别为 509.7 kPa 和 515.1 kPa。而当采用布置方式 3 时，测点 1 和测点 2 的油压峰值分别为 445.1 kPa 和 475.4 kPa，相较于布置方式 2 分别降低了 12.7%和 7.7%。对于测点 3 来说，由于其距离压力释放阀较远且二者之间存在绕组等结构，不同压力释放阀布置方式对该点故障超压的影响不大，3 条曲线几乎重合，油压峰值仅相差 3%。

3.3　优化配置建议

总的来说，换流变内部故障电弧产气而导致的故障超压受流体压缩及油箱结构影响在油箱内分布不均。一方面，不同压力释放阀安装位置将会导致其距离故障源的远近不同，其与故障点之间的结构分布也不尽相同，从而影响其动作时间；另一方面，压力释放阀动作后的压力泄放效果同样与空间位置有关。距离压力释放阀较近位置的油压升高缓解较为明显，而不同压力释放阀布置方式对于距

离压力释放阀较远的位置的油压升高影响较小。

由于换流变内部电弧短路故障多集中于绕组、套管附近,因此将压力释放阀安装在顶盖上靠近绕组的位置时其泄压效果最好。建议在顶盖上布置3个压力释放阀,其中2个分别位于绕组上方顶盖,另一个压力释放阀安装于顶盖靠近网侧套管处。

4 结论

近年来国内相继发生的换流变压器爆炸起火事故受到业界广泛关注。压力释放阀可在变压器内部故障期间泄放超压保护本体。本文以1台实际的500 kV特高压换流变压器作为研究对象开展压力释放阀布置位置优化研究,得出以下结论。

1)换流变压器发生内部故障时,故障超压在时间和空间上分别呈现出波动和非均匀的特征;

2)优化布置方式可提前压力释放阀动作时间,从而更有效地缓解换流变故障超压,布置方式对顶盖处油压影响较为明显;

3)优化布置方式后,换流变故障期间油压峰值降低12.7%,油压平均值降低5.6%;

4)为提高压力释放阀故障期间泄压效果,可在绕组上方顶盖及网侧套管周围安装压力释放阀。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国电力出版社, 2006: 401-402.

[2] 曹圆媛, 赖力, 张婧欣. 江苏省绿色低碳发展的形势研判和路径初探[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(1): 71-78.
CAO Yuanyuan, LAI Li, ZHANG Jingxin. Research on the situation and path of green and low- carbon development in Jiangsu Province[J].Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023, 39(1): 71-78.

[3] 金恩淑, 刘丹阳, 夏国武. 特高压换流变压器差动保护适用性分析及其改进方法[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 20-28.
JIN Enshu, LIU Danyang, XIA Guowu. Applicability analysis and improvement method of differential protection of converter transformer in UHVDC system[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(1): 20-28.

[4] 孟旋, 郭若琛, 袁文泽, 等. 空间电荷及金属颗粒对换流变阀侧套管的电场分布影响[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 48-55.
MENG Xuan, GUO Ruochen, YUAN Wenze, et al. Influence of space charge and metal particles on the electric field distribution of converter transformer is valve-side bushing[J].Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 48-55.

[5] 吴灏, 许晓, 彭紫楠, 等. 基于电网云数据管理的电气设备大数据移动实验室及其应用研究[J]. 发电技术, 2023, 44(3): 417-424.
WU Hao, XU Xiao, PENG Zinan, et al. Research on electrical equipment big data mobile laboratory based on power grid cloud data management and its application[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3): 417-424.

[6] 罗美玲, 郑涛, 潘志远, 等. 基于选相投旁通对的LCC-HVDC系统逆变侧换流变故障性涌流主动抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 158-164.
LUO Meiling, ZHENG Tao, PAN Zhiyuan, et al. Faulty-phase bypass- pair- based mitigation strategy for fault-induced inrush currents in LCC- HVDC inverter- side converter transformers[J].Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 158-164.

[7] 张朝峰, 张伟晨, 饶宇飞, 等. 一种抑制多馈入特高压直流换相失败的投旁通控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 56-65.
ZHANG Chaofeng, ZHAGN Weichen, YAO Yufei, et al. A bypass pair control strategy for commutation failure mitigation in multi- infeed DC system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 56-65.

[8] 梁卓航, 时纯, 李岩松, 等. 换相失败下STATCOM助增暂态过电压机理与优化策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 66-74.
LIANG Zhuohang, SHI Chun, LI Yansong, et al. Mechanism of STATCOM assisting transient voltage under commutation failure at weak sending end system and its optimization strategy[J].Electric Power Construction, 2022, 43(6): 66-74.

[9] 徐峰亮, 王发义, 赵建涛, 等. 采用有载调容调压变和MPC技术的配电台区低电压治理[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 117-126.
XU Fengliang, WANG Fayi, ZHAO Jiantao, et al. Low-voltage management in distribution platform area by on-load capacity and voltage regulating transformer and model predictive control technology[J].Electric Power Construction, 2023, 44(10): 117-126.

[10] 张文杰, 吕世轩, 高启瑄, 等. 基于固态变压器的交直流混合配电系统协调运行控制策略[J]. 电力建设,

2023，44(4)：103-112.
ZHANG Wenjie，LÜ Shixuan，GAO Qixuan，et al. Coordinated operation control strategy of AC/DC hybrid distribution system based on solid- state transformer[J]. Electric Power Construction，2023，44(4)：103-112.

[11] 马向南，杨涛，王云龙，等. 基于轻量化神经网络及模型压缩的变压器油色谱故障诊断方法[J]. 供用电，2023，40(5)：84-91.
MA Xiangnan，YANG Tao，WANG Yunlong，et al. Transformer dissolved gas fault diagnosis method based on lightweight neural network and model quantization[J]. Distribution and Utilization，2023，40(5)：84-91.

[12] 丁学辉，许海林，罗颖婷，等.基于随机森林特征优选与MAEPSO-ELM算法的变压器DGA故障诊断[J]. 电力科学与技术学报，2022，37(2)：181-187.
DING Xuehui，XU Hailin，LUO Yingting，et al.Transformer DGA fault diagnosis based on the random forest feature optimization and MAEPSO- ELM algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2022，37(2)：181-187.

[13] 邓祥力，廖玥琳，朱宏业，等. 基于数字孪生模型电流动态时间规整差异度的变压器早期故障辨识[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(12)：156-167.
DENG Xiangli，LIAO Yuelin，ZHU Hongye，et al. Early fault identification for a transformer based on current dynamic time warping difference of a digital twin model [J]. Power System Protection and Control，2023，51(12)：156-167.

[14] 欧阳鑫，李志斌. 基于样本扩充和特征优选的IGWO优化SVM的变压器故障诊断技术[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(18)：11-20.
OUYANG Xin，LI Zhibin. Transformer fault diagnosis technology based on sample expansion and feature selection and SVM optimized by IGWO[J]. Power System Protection and Control，2023，51(18)：11-20.

[15] 袁婉玲，崔子轩，禹洪波，等. 基于粗糙集-G1法组合赋权的变压器健康状态评估[J]. 电力建设，2022，43(3)：50-57.
YUAN Wanling，CUI Zixuan，YU Hongbo，et al. Transformer health status evaluation based on rough set G1 combined weighting[J]. Electric Power Construction，2022，43(3)：50-57.

[16] 王辉东，姚海燕，郭强，等. 基于多尺度卷积神经网络的变压器故障诊断方法[J].电力科学与技术学报，2023，38(4)：104-112.
WANG Huidong，YAO Haiyan，GUO Qiang，et al. A transformer fault diagnosis method based on multiscale 1DCNN[J].Journal of Electric Power Science and Technology，2023，38(4)：104-112.

[17] 刘建锋，刘梦琪，董倩雯，等. 基于改进VMD去噪和优化ELM方法的变压器早期故障诊断[J]. 电力科学与技术学报，2023，38(6)：55-66.
LIU Jianfeng，LIU Mengqi，DONG Qianwen，et al. Transformer early fault diagnosis based on improved VMD denoising and optimized ELM method[J].Journal of Electric Power Science and Technology，2023，38(6)：55-66.

[18] 行武，郭晓，王哲，等. 适用于新能源并网变压器匝间故障识别的新判据[J]. 电力工程技术，2022，41(5)：219-226.
XING Wu，GUO Xiao，WANG Zhe，et al. A new criterion for inter-turn short-circuit fault recognition for new energy grid-connected transformer[J]. Electric Power Engineering Technology，2022，41(5)：219-226.

[19] 周楠，王昕，杨海龙. 基于超声合成孔径弧形扫描联合算法的变压器绕组故障检测方法[J]. 电力科学与技术学报，2022，37(5)：198-206.
ZHOU Nan，WANG Xin，YANG Hailong. Fault detection method of transformer winding based on combined algorithm of ultrasonic synthetic aperture arc scanning[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2022，37(5)：198-206.

[20] 李沂新，贾云飞，杨欣颐，等. 基于典型振动规律的干式变压器机械状态诊断[J]. 电力工程技术，2023，42(5)：10-19.
LI Yixin，JIA Yunfei，YANG Xinyi，et al.Typical vibration laws based diagnostic of dry-type transformer mechanical states[J]. Electric Power Engineering Technology，2023，42(5)：10-19.

[21] 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.
ZHAGN 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.

[22] 陆云才，廖才波，李群，等. 基于声纹特征和集成学习的变压器缺陷诊断方法[J]. 电力工程技术，2023，42(5)：46-55.
LU Yuncai，LIAO Caibo，LI Qun，et al. Transformer fault diagnosis method based on voiceprint feature and ensemble learning[J].Electric Power Engineering Technology，2023，42(5)：46-55.

[23] 蔡文方,聂玲,应光耀,等.振动分析法在变压器故障诊断及隐患治理中的应用[J].浙江电力,2022,41(2):53-59.
CAI Wenfang,NIE Ling,YING Guangyao,et al. Application of vibration analysis in transformer fault diagnosis and hidden peril management[J].Zhejiang Electric Power,2022,41(2):53-59.

[24] 马高海,刘大炜,杨宏宇,等.基于GRU模型的发电机转子绕组匝间短路故障诊断[J].电力科技与环保,2022,38(6):467-474.
MA Gaohai,LIU Dawei,YANG Hongyu.Vibration characteristic analysis and diagnosis of generator interturn short circuit fault[J].Electric Power Technology and Environmental Protection,2022,38(6):467-474.

[25] 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.

[26] 姜益民.应用压力释放阀的几个问题[J].变压器,2000,37(7):40-42.
JIANG Yimin. Some problems of applying pressure relief valves[J]. Transformer,2000,37(7):40-42.

[27] 徐海军,王进,廖文锋,等.换流变有载分接开关非电量保护优化配置试验研究[J].变压器,2021,58(10):48-52.
XU Haijun,WANG Jin,LIAO Wenfeng,et al. Experimental study on optimal configuration of pressure relief device,pressure and oil flow relay of on-load tap-changer[J]. Transformer,2021,58(10):48-52.

[28] 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):4688-4697.
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):4688-4697.

[29] 戴缘生,周谷亮,芮颖,等.电力变压器用压力释放阀动作特性及现场校验的探讨[J].变压器,2014,51(2):58-61.
DAI Yuansheng,ZHOU Guliang,RUI Ying,et al. Discussion on action characteristic and on-site check of pressure relief device for power transformer[J]. Transformer,2014,51(2):58-61.

[30] 单鹏.压力释放阀的设计[J].变压器,1991,38(10):14-17.
SHAN Peng. The design of pressure relief device[J]. Transformer,1991,38(10):14-17.

[31] 张德明.分接开关压力释放装置的设选用与验证[J].变压器,2010,47(8):35-40.
ZHANG Deming. Selection and verification of pressure relief device in tap-changer[J].Transformer,2010,47(8):35-40.

[32] XUE Q,WANG H,LIU H,et al. Numerical investigation of transformer pressure relief valve operation characteristics[C].Shanghai: 2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies. 2023:266-270.

[33] 齐冰,王涵.气液相变对高压纳秒脉冲作用下变压器油中流注放电的影响[J].东北电力大学学报,2023,43(3):23-30.
QI Bing,WANG Han. Effect of gas-liquid phase change on injection and discharge in transformer oil under high pressure nanosecond pulse[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2023,43(3):23-30.

[34] 李远松,丁津津,李圆智,等.基于瞬态油流量测量的电力变压器故障油流涌动特性[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):211-216.
LI Yuansong,DING Jinjin,LI Yuanzhi,et al. Research on fault oil flow in power transformer based on transient oil flow measurement[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):211-216.

[35] 邢雅,侯峰,毛燕荣,等.基于三相三绕组等效网络的变压器绕组扫频阻抗特性研究[J].电气技术,2023,24(1):10-16.
XING Ya,HOU Feng,MAO Yanrong,et al. Sweep frequency impedance analysis of transformer winding based on three-phase three-winding equivalent network[J]. Electrical Engineering,2023,24(1):10-16.

[36] 祁寿贤,胡荣辉,王伟,等.基于SMOTE平衡数据集的BP神经网络变压器故障诊断[J].山东电力技术,2022,49(4):15-22.
QI Shouxian,HU Ronghui,WANG Wei,et al.Transformer fault diagnosis method based on SMOTE balanced data set and BP neural network[J].Shandong Electric Power,2022,49(4):15-22.

[37] 刘卓昌,黄登威,李伟锋.一种变压器低压引线的磁路分析与损耗验算[J].湖南电力,2022,42(1):8-12.
LIU Zhuochang,HUANG Dengwei,LI Weifeng.Magnetic circuit analysis and loss checking test of transformer low voltage lead wire[J]. Hunan Electric Power,2022,42(1):8-12.

[38] 孙孔明,李玉敦,梁正堂,等.配电变压器高压侧单相接地对低压侧转移过电压研究[J].山东电力技术,2022,49(4):39-45.
SUN Kongming, LI Yudun, LIANG Zhengtang, et al.Study of transferred overvoltage at low- voltage side of distribution transformer generated by single- phase to ground fault at high voltage side[J].Shandong Electric Power,2022,49(4):39-45.

[39] 于航,郑瑜,蒋炯锋,等.500 kV自耦变压器分相差动保护低压绕组电流互感器接线研究[J].电气技术,2023,24(2):77-81.
YU Hang, ZHENG Yu, JIANG Jiongfeng, et al. Research on low-voltage winding current transformer wiring of phase differential protection in 500 kV autotransformer[J]. Electrical Engineering, 2023, 24(2): 77-81.

[40] FOATA M, DASTOUS J B. Power transformer tank rupture prevention[C]. CIGRE 2010 Session, 2010: A2_102.

[41] MAHIEU W R. Prevention of high-fault rupture of pole-type distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1698-1707.

[42] DASTOUS J B, TASCHLER E, BELANGER S, et al. Comparison of numerical methods for modeling overpressure effects from low impedance faults in power transformers[J]. Procedia Engineering, 2017, 202, 202-223.

[43] TADOKORO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Pressure rises due to arc under insulating oil in closed vessel—relationship between bubble behavior and pressure rises[J].Electronics and Communications in Japan, 2016, 99(12): 91-102.

[44] 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.

[45] 闫晨光,郝治国,张保会,等.基于压力特征的变压器数字式保护研究[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6405-6412.
YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Power transformer digital protection based on internal pressure characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6405-6412.

[46] YAN C G, Xu C, LIU H, et al. Research on oil pressure rise and fluctuation due to arcing faults inside transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1483-1492.

[47] 周俊杰,徐国权,张华俊.Fluent工程技术与实例分析[M].西安:中国水利水电出版社,2010.

[48] 中华人民共和国工业和信息化部.中华人民共和国机械行业标准书号:JB/T 7065—2015[S].北京:机械工业出版社,2015.

收稿日期:2023-09-23。

作者简介:

程 林(1981—),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为高电压技术;

周 盟(1991—),男,硕士,工程师,研究方向为高电压技术;

郭家旭(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

罗传仙(1976—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电子技术;

张 静(1986—),女,硕士,高级工程师,研究方向为高电压技术;

黄勤清(1993—),女,硕士,工程师,研究方向为电气工程;

闫晨光(1987—),男,博士,副教授,研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 董小兵)