

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.011

不同深度电弧故障下油浸式变压器压力释放阀泄压效果研究

刘志峰¹, 廖建平¹, 侯明春¹, 高帆¹, 陈宇飞¹, 梁栋², 张翠²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院, 广州 510663; 2. 西安西电智慧电气制造有限公司, 西安 710086)

摘要: 变压器通常装设压力释放阀作为压力保护装置,其设计功能是在设备内部压力升高时通过及时泄放绝缘油缓解超压,从而保护设备结构安全。然而,近年来因内部电弧故障引发的变压器爆燃事故发生次数增多,压力释放阀并未起到有效地保护作用,其泄压能力受到了业界质疑。为评估压力释放阀在油浸式变压器内部发生电弧故障时对变压器的保护效果,文中建立了变压器内部故障油压计算模型,仿真研究了不同故障深度对压力释放阀泄压效果的影响。仿真结果表明:在相同电弧能量、不同深度的故障条件下,压力释放阀的开启时间明显不同。当故障发生在靠近变压器顶盖的浅层位置时,压力释放阀能够快速响应,在2 MJ的电弧能量下,压力释放阀在顶盖中心测点处的泄压效果可达13.1%;而故障发生在深层位置时,故障点远离压力释放阀安装处,导致压力释放阀动作更慢,压力释放阀的泄压效果降低至9.3%。文中研究工作可为变压器压力释放阀的设计及布置方案优化提供理论参考。

关键词: 油浸式变压器; 压力释放阀; 泄压效果; 内部电弧故障; 数值仿真

Study on Pressure Relief Effect of Pressure Relief Valves in Oil-immersed Transformers Under Arcing Faults of Different Depths

LIU Zhifeng¹, LIAO Jianping¹, HOU Mingchun¹, GAO Fan¹, CHEN Yufei¹, LIANG Dong², ZHANG Cui²

(1. China Southern Power Grid Extra High Voltage Power Transmission Company Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China; 2. Xi'an XD Smart Electrical Manufacturing Co., Ltd., Xi'an 710086, China)

Abstract: Pressure relief valves are commonly installed in transformers as pressure protection device and their design function is, in case of rise of internal pressure of transformer, to mitigate internal overpressure by releasing insulating oil, thereby protecting the safety of the equipment structure. However, in recent years, explosion and fire accidents triggered by internal arcing faults in oil-immersed transformers have become more frequently and the pressure relief valves did not play the effective protective role and their pressure relief protection has been questioned by the industry. For assessing the protection effect of the pressure relief valves in case of arcing fault inside the oil immersed oil transformer, in this paper the calculation model of internal fault oil pressure of transformer is set up and the effect of various fault depths on pressure relief effect of pressure relief valves at different fault depths is simulated and studied. The simulation result shows that under the same arc energy and different depths of fault conditions, the switching-on time of the pressure relief valves is obviously different. When the fault occurs in the shallow position near the top cover of transformer, the pressure relief valves can respond quickly. Under the arc energy of 2 MJ, the pressure relief effect of the pressure relief valves at the the central point of the top cover can reach 13.1%. While, in case of the fault in the deep position, the fault point is far from the installation place of the pressure relief valves, causing the operation of the pressure relief valves to be slower and the pressure relief effect of the pressure relief valves is reduced to 9.3%. The study in this paper can provide theoretical reference for the optimization of design and layout scheme of pressure relief valves of transformer.

Key words: oil-immersed transformer; pressure relief valves; pressure relief effect; internal arcing fault; numerical simulation

收稿日期:2025-07-21; 修回日期:2025-10-11

0 引言

变压器作为现代电力系统的关键设备,在电能输送中发挥不可替代的作用^[1-2]。然而,近年来,中国多台在役大型油浸式变压器接连发生因内部电弧短路故障导致的燃爆事故,严重威胁电网稳定运行以及人民生命安全^[3]。值得注意的是,这些事故变压器都安装了压力释放阀,在变压器内部压力升高时通过排放绝缘油以实现变压器的保护。但现场运行结果表明,压力释放阀在应对突发故障时并没有有效发挥预期作用,存在动作响应滞后、泄压效率不足等问题。为分析其保护性能不足的原因,探究故障位置这一变量对压力释放阀动作情况及泄压效果的影响是十分必要的。

早期变压器配备的压力释放装置称为安全气管(防爆管),当油箱内部压力骤增时,管道端部爆破封盖破裂,喷油释放故障压力^[4]。由于爆破片破裂后造成油箱内部绝缘油与空气连通,会导致变压器绝缘油劣化,中国20世纪70年代末从美国引进了压力释放阀,代替了安全气道。压力释放阀开启后可自动闭合,被广泛应用于油浸式变压器、电抗器、互感器、有载调压分接开关等。依据国家标准GB/T 6451—2023,800 kVA以上的油浸式变压器需配备压力保护装置^[5]。

针对压力释放阀泄压防爆作用及安装位置的研究,现有研究大多仅关注变压器内部某一特定位置发生故障时的场景,或仅凭试验现象定性地指出压力释放阀的泄放效果具有显著的空间依赖性。文[6]指出压力释放阀一般布置于大型变压器两端,有必要增大口径提高其泄压能力。文[7]以一台安装3个压力释放阀的换流变压器为研究对象,发现不同压力释放阀布置方式对顶盖处超压影响较大,建议在顶盖上绕组斜上方位置及网侧套管周围安装压力释放阀。文[8]中对100 MVA变压器进行仿真研究,认为在低阻抗故障期间,变压器可能因压力过高而破裂,仅靠单一压力泄放装置难以充分保护变压器。文[9]对安装在有载分接开关上的压力释放阀膜盘及弹簧运动进行了理论建模,利用开发的数值方法分析得出压力释放阀开启时间落后于设备内部压力峰值出现的时间的结论,并借助优化算法对最优的装置结构参数进行了定量求解,使得排油泄压能力得到提升。

作为研究压力释放阀泄压效果的基础性工作,国内外学者对变压器内部电弧故障下油压升高机

理及仿真技术开展了一系列研究。H. Trenchem等人通过对试验数据的总结和分析首次提出断路器油中故障电弧能量与故障气体之间存在70~100 mL/kJ的线性关系^[10]。R. J. Ringlee等学者在1959年基于变压器油枕中电弧试验研究提出了首个充油变压器内部故障压力的预测模型^[11]。M Foata等学者针对薄壁腔体内不可压缩流体,通过正交分量叠加和运动方程的数值求解得到了故障动态压力的解析解,进而采用Pisces仿真工具对理论计算结果进行了验证^[12]。2008年,法国SERGI公司建立了考虑多因素的变压器内部故障两相流仿真模型,但其压力峰值仿真结果与真实燃弧试验结果差距较大^[13-15]。近年来,闫晨光等学者在变压器内部故障及非电量保护领域开展了大量理论与仿真研究^[17,9,16-19],并在真型变压器中进行内部电弧故障试验,建立了电弧气泡动力学模型,在此基础上利用数值方法对油压波动和油箱形变进行仿真计算,仿真与试验结果一致性良好^[20]。

文中根据电弧能量持续注入下的油中气泡的动力学模型,建立了电弧故障压力计算模型,对一台实际换流变压器进行有限元建模,开展考虑压力释放阀开启的流固耦合仿真计算,对比不同故障深度下的压力释放阀动作时间,以及压力释放阀开启与不开启两种情况下的变压器内部油压升高情况,研究了故障深度对压力释放阀保护性能的影响。

1 理论建模

变压器内部常规所用绝缘油是矿物油,主要成分为多种烃类物质。当发生电弧故障时,电弧将瞬间释放出巨大能量会引发局部绝缘油的汽化,形成一定体积的高压气体空腔,致使变压器内部油压急剧升高。当压力释放阀所在位置的油压达到其动作阈值时,压力释放阀开启,与外界大气压连通,减缓压力增长。此外,当油箱受力发生弹塑性变形会吸收部分能量,同样使内部压力升高得到缓解。基于此,本节对压力释放阀结构和动作原理进行了分析,建立了考虑气泡、绝缘油、变压器箱壁相互作用的电弧故障压力计算模型。

1.1 压力释放阀结构及动作原理

典型的压力释放阀结构剖面图见图1,结构1为安装法兰,结构2、4、5分别为底部、顶部和侧向密封垫,结构3为受油流冲的动作盘,结构7为内外圈两根弹簧,结构3、7为压力释放阀的关键动作结构,结构6为压力释放阀外罩,保护污渍堆积,结构8为

机械指示杆、结构9为报警微动开关、结构10为手推复位杆、结构16为脱扣盘、结构17为微动开关传动轴共同构成报警装置。

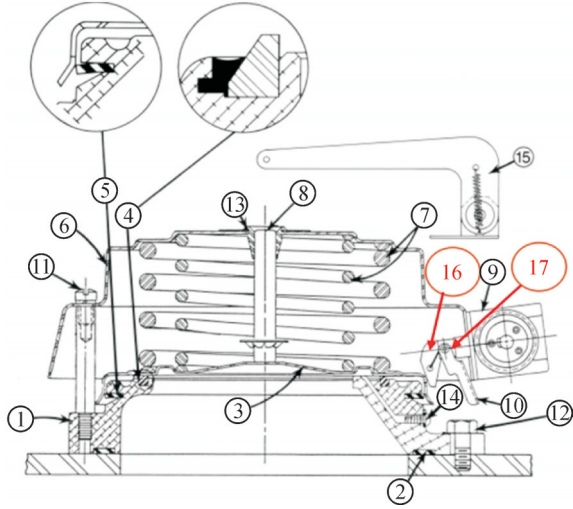


图1 压力释放阀结构剖面图

Fig. 1 Structure sectional drawing of pressure relief valve

对于结构16、17,在变压器油流冲击作用下,膜盘上的油压大于弹簧系统的压缩力时,膜盘开始朝上移动,带动脱扣盘逆时针转动,此时脱扣盘大圆部分离开微动开关传动轴,微动开按钮弹出,接点导通,发出动作信号。脱扣盘具体为两个不同半径的半圆结构,正常状态下,脱扣盘的大圆与微动开关传动轴接触,对其产生一定的挤压,当压力释放阀动作时,膜盘向上带动脱扣盘逆时针转动,旋转到小圆部位时,微动开关传动轴弹出,带动辅助接点动作并发出报警信号。此外,也可以通过机械指示杆动作报警,膜盘开始朝上移动的同时带动指示杆向上运动,由于指示杆带变径设计,指示杆粗的部分将挤压微动开关操作按钮,带动触点变位,当泄压完毕,膜盘向下运动,指示杆细的部分不再挤压微动开关操作按钮,触点复位。

1.2 电弧故障压力计算模型

根据闫晨光等学者的研究,故障气泡脉动发展特性是电弧能量、流体区域边界、绝缘油物理性质的多元函数^[20]

$$\begin{aligned} \ddot{R}R^2\left(\frac{1}{R}-\frac{1}{r}\right)+\dot{R}^2\left(\frac{3}{2}-\frac{2R}{r}+\frac{R^4}{2r^4}\right)=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{4\mu\dot{R}}{R}+\right. \\ \left.\frac{2\sigma}{R}+p_1\right)-\frac{3(\gamma-1)}{\rho R^3}\left[4\mu\int_{t_0}^t R(\tau)\dot{R}^2(\tau)d\tau\right]+ \\ \frac{3(\gamma-1)}{4\pi\rho R^3}\left(\alpha W_{arc}-2\pi\rho\dot{R}^2R^3+\frac{2\pi\rho}{r}\dot{R}^2R^4+U_0\right)- \\ \frac{3(\gamma-1)}{\rho R^3}\left[\int_{t_0}^t p_1(\tau)R^2(\tau)\dot{R}(\tau)d\tau+\int_{t_0}^t 2\sigma R(\tau)\dot{R}(\tau)d\tau\right] \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: R 及其一、二阶导数分别为气泡半径、半径变化速度与加速度; ρ 为绝缘油密度; r 为气泡中心与有限腔体边界之间的距离; σ 为表面张力系数; p_1 为边界压力; μ 为黏性系数; $\gamma=c_p/c_v$ 为定压比热与定容比热之比; U_0 为气泡产生瞬间具有的内能; W_{arc} 为电弧能量; α 为能量转化系数。

在变压器流场的建模中,考虑到电弧故障引起的油流属于典型的高雷诺数瞬态湍流,流动范围广、尺度差异大,而文中关注的是压力传播与平均流动结构而非湍流细尺度特征,因此采用基于雷诺平均方程(RANS)的湍流模型能够在保证计算稳定性和工程精度的前提下显著降低计算成本,便于分析不同情况下压力释放阀的泄压效率,并引入了Boussinesq假设,该模型动量输运方程可表示为:

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}+\bar{u}_k\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}\right)=-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right)+\frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$R_{ij}=-\overline{\rho u_i u_j}=\mu_T\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu_T\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k}\delta_{ij}-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: \bar{u}_i 、 \bar{u}_j 、 \bar{u}_k 为雷诺平均速度矢量的分量,下标遵循爱因斯坦求和约定; R_{ij} 为雷诺应力张量; $\overline{u_i}$ 、 $\overline{u_j}$ 、 $\overline{u_k}$ 是雷诺脉动速度分量; \bar{p} 是压力的雷诺平均值; δ_{ij} 为克罗内克函数; μ_T 是湍流粘性。 k 是湍流动能, ε 是湍流耗散率,建模中采用了标准 k - ε 模型,其输运模型为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]-\rho\varepsilon+ \\ G_k+G_b-Y_M+S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{C_{\varepsilon 1}\varepsilon}{k}G_k+ \\ \frac{C_{\varepsilon 1}\varepsilon}{k}C_{\varepsilon 3}G_b-\rho\frac{C_{\varepsilon 2}\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \quad (5)$$

式(4)、(5)中: G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能产生; G_b 为由浮力引起的湍流动能产生; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; S_k 为由于平均速度梯度产生的湍流动能; S_ε 为平均旋转速率产生的附加项; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $C_{\varepsilon 3}$ 为常数。

在内部故障期间,流体域和固体域相互耦合影响,在两场边界处需满足边界条件:

$$u_s=u_i \quad (6)$$

$$f_s=f_i \quad (7)$$

式(6)、(7)中: u_s 和 u_i 分别为固体和流体边界处位移; f_s 和 f_i 分别为固体和流体边界处应力。

2 仿真模型及设置

2.1 仿真模型

文中以一台实际的ZZDFPZ-406000/500-400型换流变压器为例开展仿真研究。考虑到计算效率及仿真结果的精度要求,根据实际变压器的装配体模型进行了合理的简化,绘制三维几何模型见图2,模型主要参数见表1,压力释放阀1距油箱顶盖前方边界0.53 m、左侧边界3.51 m,压力释放阀2距油箱顶盖后方边界0.53 m,右侧边界1.16 m。

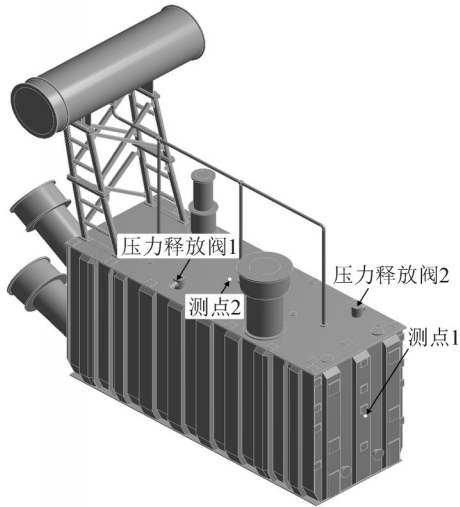


图2 变压器三维几何模型及测点位置

Fig. 2 Geometric model of the simulated transformer and measurement point locations

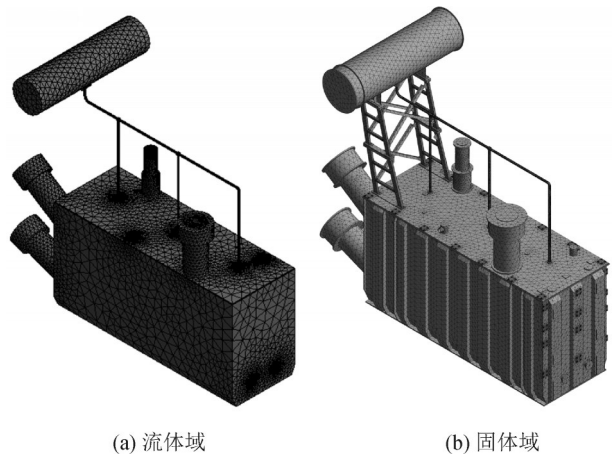
表1 换流变压器主要铭牌及结构参数

Table 1 Main nameplates and structural parameters of the converter transformer

参数	数值
额定容量/MVA	406
额定电流/A	1 339.5(网侧) 4 081.3(阀侧)
空载电流/%	0.08
油箱长度/宽度/高度/mm	9 384/3 474/4 671
铁窗宽度/高度/mm	1 296/3 000
铁心长度/宽度/高度/mm	6 780/1 234/4 340

目前仿真软件对于流体与固体区域的计算都必须用到网格,网格划分的质量是影响计算资源消耗与求解精度的关键因素,为平衡误差与计算成本,需要进行合理的网格划分,由于变压器结构相对复杂,且部件尺寸较小,而四面体单元在处理复杂几何时具有较强的适应性,可在保证几何细节完整性的前提下实现较高质量的自动化网格生成,因此适用于变压器油箱及内部流体域。同时,仿真中在转角等关键区域均进行了适当加密处理,以提高

计算精度,经网格无关性验证,最终网格划分结果见图3。图3中,流体域生成四面体单元共计302 123个,节点74 753个,平均网格质量为0.83;固体域划分后单元数236 327个,节点数434 104个,平均质量0.51。



(a) 流体域 (b) 固体域

图3 变压器网格剖分图

Fig. 3 Mesh of the simulated transformer

2.2 仿真设置

仿真变压器在油箱顶盖上配置了2个压力释放阀,如图2所示,其泄压口径为 $\phi 130$ mm,动作压力为80 kPa。JB/T 7065—2015《变压器用压力释放阀》规定压力释放阀的开启时间小于等于2 ms,确保快速响应电弧故障引发的油压骤升^[21],由于开启时间很短,因此可将压力释放阀等效为一个压力出口,开启后认为出口处压力为大气压强。

流体材料为化学式为 $C_{16}H_{29}$ 的油气混合物,密度为895 kg/m³,体积模量为140 MPa,粘度系数为0.003 32 Pa·s。变压器的结构材料为Q235钢,其密度为7 850 kg/m³,杨氏模量为203 GPa,切线模量为1.65 GPa,泊松比为0.3,屈服应力为235 MPa,抗拉强度为460 MPa,采用双线性各向同性硬化模型。

利用用户自定义函数控制式(1)所描述的气泡边界节点的运动,采用扩散光顺与局部网格重构法进行瞬态仿真,以避免仿真计算中网格极度扭曲、质量差的现象。综合考虑计算精度与稳定性,在经过多次仿真计算测试后,在80 ms电弧故障持续时间内,计算时间步长设置为0.1 ms,这样既能保证网格的合理运动,也能使计算效率达到较高水平。

3 仿真分析

文中研究在变压器内部不同深度发生电弧故障时,压力释放阀动作时间以及对油压升高的影响,共开展3组仿真,各故障位置见图4:算例1故障

位置设置在两芯柱中间的顶部位置;算例2故障位置设置在两芯柱中间的中部位置;算例3故障位置设置在两芯柱中间的底部位置,故障电弧能量均为2 MJ。在仿真中设置了两个压力测点,测点1位于换流变顶盖中心,测点2位于右侧箱壁中心,见图4。

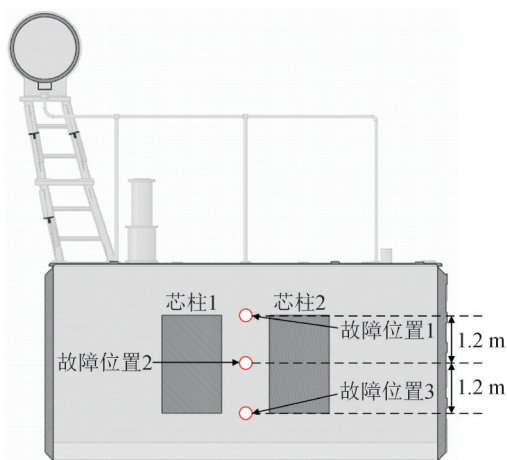


图4 各算例故障位置示意图

Fig. 4 Fault location diagram for each case

3.1 顶部故障位置仿真结果分析

算例1模拟了换流变压器柱1和柱2中间顶部处发生电弧故障时,压力释放阀不开启与开启两种情况下的油压升高。以顶部故障位置压力释放阀不开启情况为例,变压器内部油压分布变化与油箱形变分布见图5。故障发生后,由故障源处产生的超压迅速向变压器内部四周传播,由于故障位置1靠近变压器顶盖,相较于其他区域,顶盖中心处率先感受到压力升高,随后压力开始向左右两侧以及变压器下部传播,逐渐扩展至整个内部空间。而后压力分布整体上呈现出较为均匀的态势,但仍可观察到压力在时间和空间上的波动变化,到 $t=80$ ms故障结束时,整个变压器内部的压力达到一个相对均匀的最大值。

顶盖中心处测点的压力变化曲线见图6,测点油压从故障发生后2 ms开始迅速攀升,由于油压升高具有时空差异性,不同位置的的压力释放阀并非同时感受到压力冲击,其动作有先后顺序。如图5(a)所示,由于阀1距故障位置较近,因此最先感受到油压升高,在故障发生后4.2 ms便迅速开启,开启后对油压升高起到一定的抑制作用,使得油压相较于未开启压力释放阀时略微下降。随后,压力传递到距离故障点稍远的压力释放阀2所在位置,在 $t=8.2$ ms时,压力释放阀2处的压力达到其开启阈值,压力释放阀2动作。随着时间推移,两条曲线上的压力值差距逐渐扩大,在故障结束时刻,不开启压力释放阀时油压达到450.4 kPa,而开启压力释放阀时油压

为391.3 kPa,降低了13.1%。

右壁面中心测点处的压力变化曲线见图7,相比顶盖中心,该测点距离故障点较远,其油压升高的时间明显滞后,在10 ms时油压开始缓慢上升,两个压力释放阀在开启初期泄压效果不显著,直到15 ms左右观察到开启压力释放阀的算例曲线开始低于未开启压力释放阀的算例曲线。此外,和测点1的曲线类似,测点2的油压曲线同样呈波动上升趋势,不开启压力释放阀时测点2在 $t=80$ ms时油压达到最大值,为412.3 kPa,开启压力释放阀时油压最大值降低至371.1 kPa,压力释放阀的开启使测点2的油压最大值下降了10.0%,表明压力释放阀的动作及空间布局对故障超压缓解效果具有重要影响。

3.2 中部故障位置仿真结果分析

本小节算例2分别模拟了换流变压器柱1和柱2中部位置发生电弧故障的工况,对比压力释放阀不开启与开启两种情况下油压的升高情况。顶盖中心测点1记录的油压变化曲线见图8,与算例1中顶部故障的情况相比,由于中部故障位置距离顶盖较远,压力传播到顶盖中心的时间明显较晚,从图8可以看出,测点1处的油压大约从 $t=4$ ms时开始上升,随着油压持续升高,在 $t=7.7$ ms时,压力释放阀1率先开启,油压上升趋势得到初步缓解,在 $t=10.0$ ms时压力释放阀2开启。测点2油压初始升高情况与3.1节类似,大约在10 ms时开始逐渐升高,电弧故障发生的位置显著影响了关键位置感受到压力上升的时间,见图9。

中部故障位置两个测点的油压曲线同样在 $t=80$ ms时达到最大值,在不采取压力释放措施的情况下,测点1处最高油压为450.8 kPa,相较之下,开启压力释放阀后油压最大值为400.2 kPa,下降了11.2%。对于右侧油箱壁测点2处,压力释放阀不开启与开启的油压最大值分别为429.4 kPa和397.6 kPa,相差7.4%。

3.3 底部故障位置仿真结果分析

算例3模拟了柱1和柱2中间的底部位置发生电弧故障时,压力释放阀不开启与开启的情形。底部故障点距顶盖距离最远,因此测点1油压从 $t=7$ ms时才开始上升,受绕组等结构的阻碍影响,压力传播的路径较长且复杂,导致两个压力释放阀的动作时间更为缓慢。具体的,压力释放阀1在 $t=12.1$ ms时开启,压力释放阀2在 $t=15.3$ ms时开启。不开启压力释放阀的仿真工况中测点1处的油压最大值为450.2 kPa,而压力释放阀开启后油压最大值为408.3 kPa,降低了9.3%,见图10。

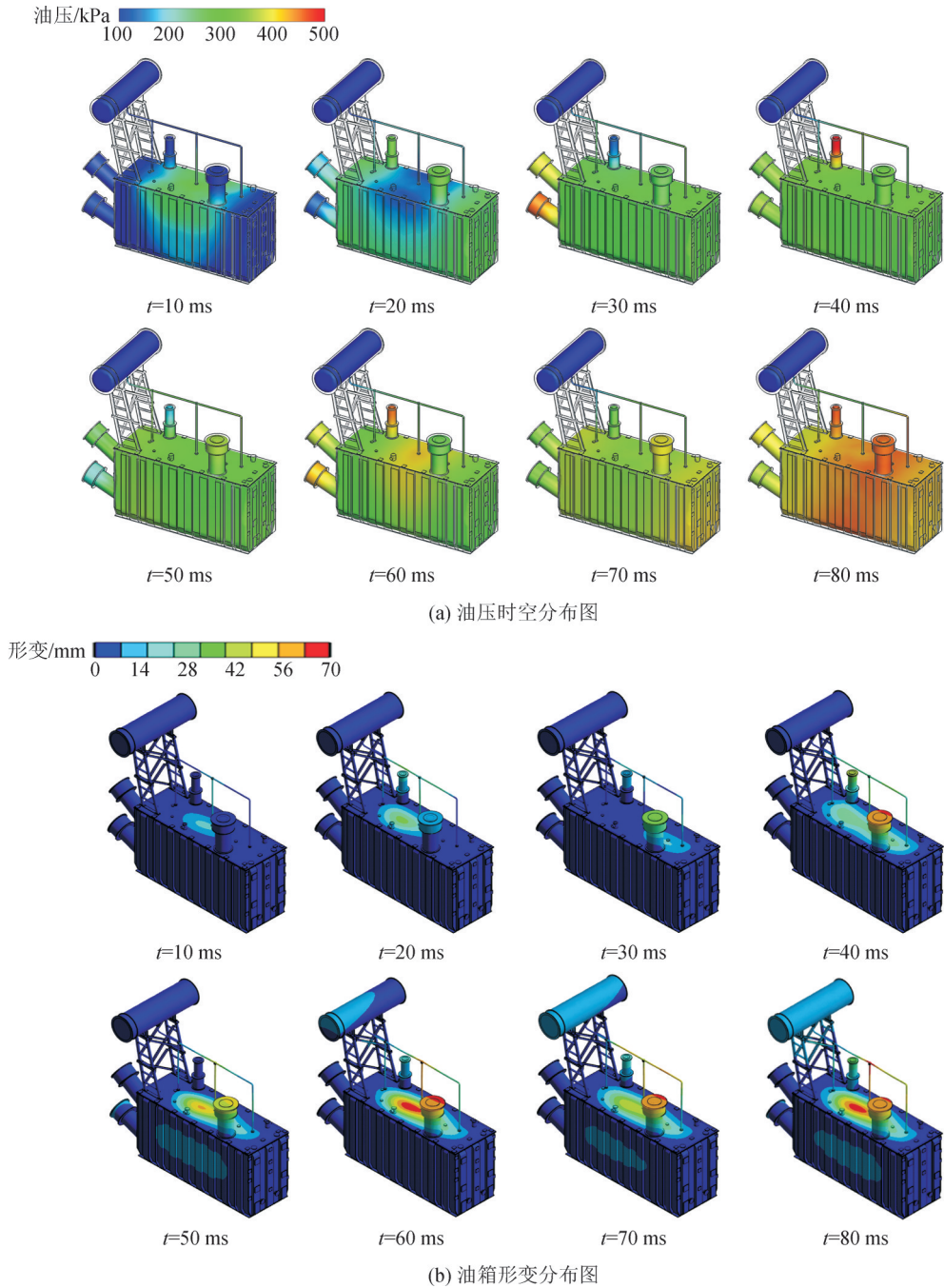


图5 算例1压力释放阀不开启时仿真结果

Fig. 5 Simulation results of pressure relief valve of case 1

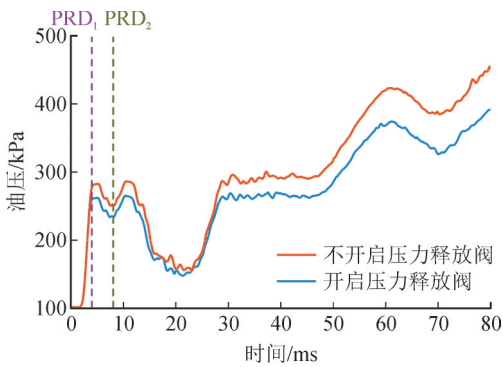


图6 算例1中测点1处油压对比

Fig. 6 Comparison of oil pressure at point 1 in cases 1

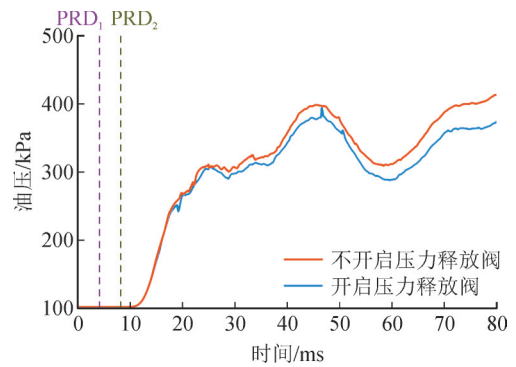


图7 算例1中测点2处油压对比

Fig. 7 Comparison of oil pressure at point 2 in case 1

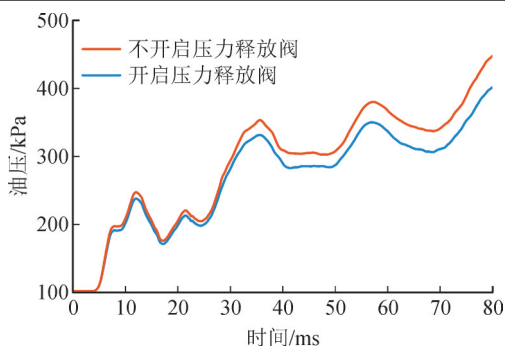


图8 算例2中测点1处油压对比

Fig. 8 Comparison of oil pressure at point 1 in case 2

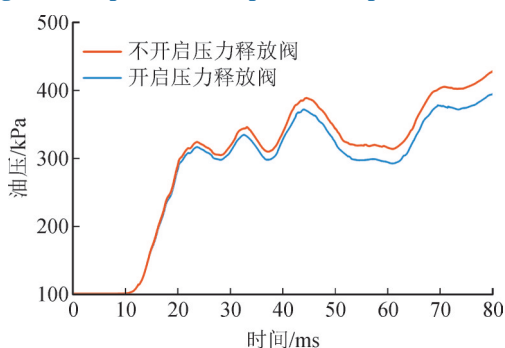


图9 算例2中测点2处油压对比

Fig. 9 Comparison of oil pressure at point 2 in case 2

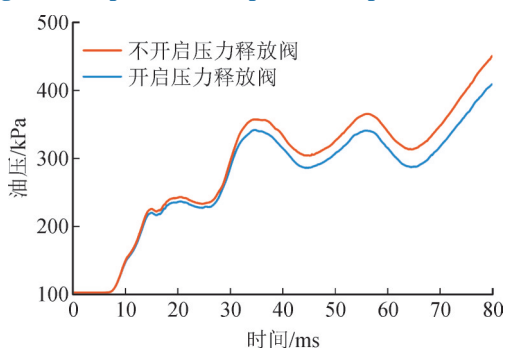


图10 算例3中测点1处油压对比

Fig. 10 Comparison of oil pressure at point 1 in case 3

算例3在测点2处的油压变化曲线见图11,由于3个故障位置与测点2之间的距离大致相当,且故障位置1(顶部)和3(底部)相对测点2的位置大致对称,所以底部故障时测点2的油压变化情况与3.1节顶部故障的情况表现出高度相似,然而,由于底部发生故障时压力释放阀开启时间较晚,其开启使得在故障结束时刻油压最高值从440.4 kPa降至409.8 kPa,降低了6.9%。

文中对比了不同故障深度条件下压力释放阀的动作时间及其泄压效果,见表2、3。其中,压力释放阀的泄压效果通过比较开启与不开启压力释放阀两种方案下油压最大值下降百分比得出。对比3组算例结果,可以发现故障位置对压力释放阀泄压效果具有显著影响:随着故障位置由顶盖逐渐向底部

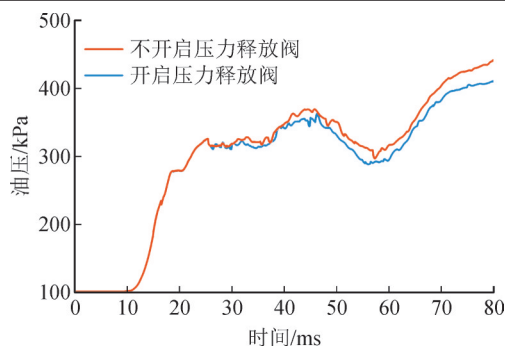


图11 算例3中测点2处油压对比

Fig. 11 Comparison of oil pressure at point 2 in case 3

深入,压力传播至顶盖处的时间越长,导致压力释放阀感受到压力增长的时间变长,从而使其开启速度变慢。具体而言,当故障发生在靠近变压器顶盖的位置时,由于压力释放阀的迅速开启,测点1和2油压最大值下降率最高,泄压效果最为明显;当故障发生在底部位置时,压力释放阀的开启时间延后,导致油压最大值的降低率较低,泄压效果最差。

表2 各算例中压力释放阀动作时间

Table 2 Operation time of pressure relief valve in each case

算例	压力释放阀 1/ms	压力释放阀 2/ms
1	4.2	8.2
2	7.7	10.0
3	12.1	15.3

表3 不同故障位置下的泄压效果比较

Table 3 Comparison of pressure relief effect at different fault locations

测点 标号	故障 位置	不开启压力释放 阀油压最大值/kPa	开启压力释放阀油 压最大值/kPa	泄压 效果/%
	顶部	450.4	391.3	13.1
1	中部	450.8	400.2	11.2
	底部	450.2	408.3	9.3
	顶部	412.3	371.1	10.0
2	中部	429.4	397.6	7.4
	底部	440.4	409.8	6.9

3.4 不同电弧能量仿真结果分析

为进一步探究电弧能量对压力释放阀动作特性及泄压效果的影响,本节在中部故障位置的基础上,增设了电弧能量为1 MJ与4 MJ的算例以对比分析压力释放阀开启时间及油压变化。不同电弧能量下压力释放阀动作时间及泄压效果见表4,随着故障能量从1 MJ增大至4 MJ,压力释放阀的开启时间明显提前。以压力释放阀1为例,其在1 MJ能量下于14.0 ms动作,而在4 MJ能量下动作时间提前至5.3 ms,这是因为更高的电弧能量注入导致压力上升速率更快,使得压力能够更早达到压力释放阀

的动作阈值。

表4 不同电弧能量下压力释放阀动作时间及泄压效果对比
Table 4 Comparison of operation time and pressure relief effect at different arc energies

电弧能量/MJ	PRD ₁ 动作时间/ms	PRD ₂ 动作时间/ms	测点1泄压效果/%	测点2泄压效果/%
1	14.0	20.3	7.5	5.8
2	7.7	10.0	11.2	7.4
4	5.3	7.4	8.6	7.3

1、2、4 MJ故障下压力释放阀开启的算例中油压变化曲线见图12,尽管4 MJ故障下压力释放阀开启最快,但无法抵消巨大电弧能量输入导致的压力峰值飙升,泄压效果的提升并非随故障能量增大呈线性增长,泄压后的绝对压力值仍远高于低能量工况,因此,对于大容量变压器而言,单纯依靠压力释放阀不足以应对高能量内部故障。

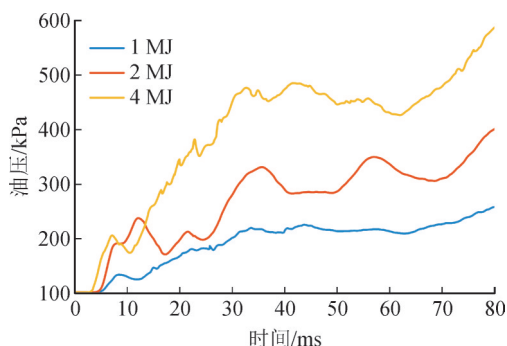


图12 不同故障能量下测点1处油压对比

Fig. 12 Comparison of oil pressure at point 1 under different fault energies

4 结论

近年来,安装有压力释放阀的变压器及其组件因内部短路导致的爆炸起火事故时有发生,压力释放阀因自身动作速度慢、泄压能力差而饱受质疑。但由于缺乏有效的理论模型与数值仿真方法,当前对变压器内部电弧故障场景下压力释放阀泄压效果的研究尚不充分。文中建立了考虑压力释放阀开启的变压器内部故障油压计算理论及仿真模型,基于一台真实换流变压器模型参数,开展了不同深度电弧故障条件下油浸式变压器压力释放阀开启时间和泄压效果的对比研究,得出以下结论:

1)变压器内部发生电弧故障时,会引起油压迅速升高,在空间和时间上呈现出波动变化。

2)电弧故障的位置深度是影响压力释放阀开启时间的关键因素,不同深度的电弧故障导致压力释放阀响应时间差异显著;对于电弧能量这一因素,故障能量越高,压力峰值越高,压力释放阀动作越

快,但其泄压效果的提升呈非线性。

3)故障位置越深,压力释放阀的泄压效果越差。在2 MJ的电弧能量下,变压器靠近顶部的位置发生电弧故障时,压力释放阀在顶盖中心测点处的泄压效果可达13.1%;在底部位置发生故障时,顶盖中心测点处泄压效果降低至9.3%。

参考文献:

- [1] 徐惠,罗传仙,张静.基于加性模型的电力变压器油中溶解气体预测方法研究[J].电网与清洁能源,2025,41(7):27-35.
XU Hui, LUO Chuanxian, ZHANG Jing. Research on the prediction method for dissolved gases in transformer oil based on additive models[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(7): 27-35.
- [2] 邱晟璇,王松,刘子瑞,等.基于FRA法和CNN的变压器绕组故障诊断研究[J].大电机技术,2025(3):108-116.
QIU Shengxuan, WANG Song, LIU Zirui, et al. Research on fault diagnosis of transformer windings based on FRA method and CNN [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(3): 108-116.
- [3] 国家能源局,中国电力企业联合会.2023年全国电力可靠性年度报告[R].北京:国家能源局电力可靠性管理和工程质量监督中心,2024.
National Energy Administration, China Electricity Council. 2023 national electric reliability annual report[R]. Beijing: National Energy Administration Power Reliability Management and Engineering Quality Supervision Center, 2024.
- [4] 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.
- [5] 油浸式电力变压器技术参数和要求:GB/T 6451—2023[S].2023.
Technical parameters and requirements for oil-immersed power transformers: GB/T 6451—2023[S].2023.
- [6] 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.
- [7] 程林,周盟,郭家旭,等.特高压换流变压器压力释放阀布置方式[J].电网与清洁能源,2024,40(4):44-53.
CHENG Lin, ZHOU Meng, GUO Jiaxu, et al. A study on the arrangement of pressure relief devices in UHV converter transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4):44-53.
- [8] FOATA M, DASTOUS J B. Power transformer tank rupture prevention[C]//International Conference on Large High Voltage Electric System, Conference International des Grands Reseaux Electriques. France: CIGRE, 2010:102.
- [9] YAN Chenguang, LIU Hao, XU Che, et al. Limitations and performance of pressure relief devices in on-load tap changer compartments under arcing faults[J]. IEEE Transactions on Power Deliv-

- ery, 2024, 39(4): 2520-2529.
- [10] TRENCHAM T. Circuit breaking[M]. London: Butterworth Scientific Publications, 1953.
- [11] RINGLEE R J, ROBERTS N W. Tank pressures resulting from internal explosions[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1959, 78(4): 1705-1710.
- [12] FOATA M, IORDANESCU M, HARDY C. Computational methods for the analysis of explosions in oil-insulated electrical equipment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(1): 286-293.
- [13] 姜 岚, 陈云桥, 王 爽, 等. 基于实际气体模型的油浸式变压器爆炸应力分布研究[J]. 变压器, 2024, 61(1): 29-34.
JIANG Lan, CHEN Yunqiao, WANG Shuang, et al. Study on stress distribution of oil-immersed transformer explosion based on actual gas model[J]. Transformer, 2024, 61(1): 29-34.
- [14] 刘苗苗, 胡 攀, 韦 虹. 基于 Ansys Maxwell 的气隙边缘效应对电感参数的影响[J]. 变压器, 2024, 61(1): 35-39.
LIU Miaomiao, HU Pan, WEI Hong. Influence of air gap edge effect on inductor parameters based on Ansys Maxwell[J]. Transformer, 2024, 61(1): 35-39.
- [15] 冯玉辉, 高 超, 杨中卿. 核电大型变压器现场绝缘干燥技术研究与应用[J]. 变压器, 2024, 61(1): 47-50.
FENG Yuhui, GAO Chao, YANG Zhongqing. Research and application of low frequency heating technology for large nuclear power transformer windings [J]. Transformer, 2024, 61(1): 47-50.
- [16] 陈一棕, 陈宗让, 张 芑, 等. 特高压换流变压器匝间短路故障建模与仿真[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(10): 43-51.
CHEN Yicong, CHEN Zongrang, ZHANG Peng, et al. Modeling and simulation of interturn short-circuit faults in ultra-high voltage converter transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(10): 43-51.
- [17] 闫晨光, 徐 彻, 曹 培, 等. 电力变压器瓦斯继电器暂态动作特性研究[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(5): 1-7.
YAN Chenguang, XU Che, CAO Pei, et al. Research on transient characteristics of power transformer gas relay[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(5): 1-7.
- [18] 闫晨光, 郝治国, 张保会, 等. 电力变压器油箱形变破裂建模及仿真[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 180-187.
YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Modeling and simulation of power transformer tank deformation and rupture [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 180-187.
- [19] 闫晨光, 郝治国, 张保会. 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. Power transformer digital protection based on internal pressure characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6405-6412.
- [20] YAN Chenguang, XU Che, LIU Hao, 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.
- [21] 吴奇松, 夏君宇, 赵国庆, 等. CVT 电容分压器末端放电故障分析 [J]. 变压器, 2024, 61(1): 62-65.
WU Qisong, XIA Junyu, ZHAO Guoqing, et al. Analysis of discharge fault at end screen of CVT capacitor voltage divider[J]. Transformer, 2024, 61(1): 62-65.
- 刘志峰(1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为绝缘介质的检测分析及故障诊断(E-mail: 1412149786@qq.com)。
廖建平(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为绝缘介质的检测分析及故障诊断。
张 翠(1994—), 女, 硕士, 工程师, 从事电力保护系统研究(通信作者)(E-mail: zujianjishu@126.com)。
- (上接第 84 页)
- 度诊断方法[J]. 电子设计工程, 2025, 33(14): 144-149.
LIN Shi. The high-precision diagnosis method for transformer fault based on the improved gray wolf algorithm to optimize BP neural network[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(14): 144-149.
- [16] 李国伟, 唐 琪, 王俊波, 等. 基于经验小波变换的电力变压器绕组松动故障诊断振动分析[J]. 电子设计工程, 2025, 33(10): 98-102.
LI Guowei, TANG Qi, WANG Junbo, et al. Vibration analysis of power transformer windings loosening fault diagnosis based on empirical wavelet transform[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(10): 98-102.
- [17] ZHENG Weiyang, CHENG Zhiguang. An inner-constrained separation technique for 3-D finite-element modeling of grain-oriented silicon steel laminations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(8): 2277-2283.
- [18] ZHENG Weiyang, CHEN Xinhong. Subspace correction method for computing magnetic shields in large power transformers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(5): 1-6.
- [19] 张贤国, 康宏彪, 陈宇鹏, 等. 降低大型电力变压器铁心噪声的工艺措施[J]. 电气制造, 2010(12): 32-33.
ZHANG Xianguo, KANG Hongbiao, CHEN Yupeng, et al. Process measures for reducing core noise of large power transformer[J]. Electrical Manufacturing, 2010(12): 32-33.
- [20] 鲁殿国. 优化和控制大型变压器铁心夹紧力降低本体噪声[J]. 变压器, 2012, 49(3): 25-27.
LU Dianguo. Optimization and control of core clamping force of large transformer to reduce transformer noise[J]. Transformer, 2012, 49(3): 25-27.
- 陈晓刚(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 长期从事安全生产、环保与科技创新工作, 统筹制定浙江公司科技发展规划, 负责进行输变电设备安全、环保相关的科研(E-mail: carlexg1980@126.com)。
刘兰荣(1978—), 女, 硕士, 正高级工程师, 长期从事变压器相关基础研究和关键共性技术的研究工作, 包括变压器关键材料特性、振动与噪声关键技术、电磁热仿真研究等(通信作者)(E-mail: 53856276@qq.com)。