

换流变压器内部电弧故障超压仿真研究

周 盟^{1,2}, 罗传仙^{1,2}, 郭家旭³, 周正钦^{1,2}, 张 芃³, 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)

摘要: 换流变压器内部电弧故障将引起油箱内部油压骤升, 可能导致油箱破裂甚至严重的爆炸起火事故, 严重威胁电力系统安全稳定运行。本文以实际的 500 kV 特高压换流变压器为研究对象, 基于 ANSYS 平台进行多场耦合数值仿真计算, 得到不同故障条件下换流变压器内部超压的时空分布特征。仿真结果表明, 设备内部电弧故障期间瓦斯气泡动态增长, 油压随瓦斯气泡脉动而骤升并表现出明显的波动特征, 换流变压器本体内部油压空间分布不均。本研究对于换流变压器减压防爆、结构优化具有一定的参考意义。

关键词: 换流变压器; 内部电弧故障; 超压; 数值仿真

DOI: 10.12067/ATEEE2308030

文章编号: 1003-3076(2024)05-0068-08

中图分类号: TM772

1 引言

随着我国特高压直流输电的快速发展, 在运的大容量、高电压等级换流变压器数量迅速增加。换流变压器是直流输电的核心设备, 其安全稳定运行意义重大^[1,2]。换流变压器内部发生电弧故障后, 巨大的电弧能量会立即汽化、分解周围绝缘油并形成快速膨胀的气泡, 该气泡压缩周围绝缘油引起油压骤升^[3]。骤升的油压将导致换流变压器油箱出现局部应力集中, 一旦应力超过油箱极限, 油箱将会破裂甚至引发严重的爆炸起火事故。近年来, 换流变压器因内部电弧故障导致的油箱破裂、爆炸起火事故时有发生, 严重威胁电力系统安全稳定运行。

变压器内部故障导致的油压升高长期以来是国内外学者广泛研究的课题, 目前相关研究主要集中在配电变压器及电力变压器的故障超压特征。该领域的研究最早可追溯到 20 世纪 50 年代, 学者 H. TRENCHAM 在 1953 年研究油断路器时通过总结、分析试验数据, 首次提出故障产气率即电弧故障能量与气体体积之间满足线性关系, 气体组分为 70% 的氢气, 25% 的 C_2H_2 和 5% 的其他烃类^[4]。此后,

多数研究人员针对故障产气率得到较为一致结论, 认为故障产气率满足线性关系, 在 50 ~ 100 mL/kJ 之间^[5,6]。1960 年, 文献[7]针对油枕电弧故障进行了理论研究, 提出了适用于油浸式变压器的故障油压预测模型。在 20 世纪 70 年代, 文献[8]提出了一个油浸式配电变压器内部气体空间中电弧引起的压力升高幅值的经验方程, 它主要与电流、电弧持续时间、电弧长度和油箱几何参数有关。1988 年, 文献[9]提出了一个重要的表达式, 通过考虑油箱膨胀系数和电弧产气率来估计油箱内的瞬时压力上升。2008 年, 法国 SERGI 公司研究人员在总结前人提出的变压器可压缩两相流“5 方程”模型的基础上, 将变压器仿真计算模型由二维升至三维进行求解^[10]。2010 年, 文献[11]提出了一种基于显式分析的数值方法来模拟电弧故障的机械效应, 对电力变压器以及电抗器内部电弧故障引起的压力升高、油箱破裂过程进行了数值仿真研究。2020 年, 文献[12]介绍了向电力变压器油箱内注入压缩空气的试验方法, 设计并测试了一个可以承受 20 MJ 电弧故障超压影响的变压器油箱。2021 年, 文献[13]开展了变压器升高座燃弧试验, 得到了不同故障条件

收稿日期: 2023-08-22

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)

作者简介: 周 盟(1991-), 男, 湖北籍, 工程师, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术;

闫晨光(1987-), 男, 陕西籍, 副教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统继电保护(通信作者)。

下升高座内部故障油压的变化特性。2014 年以来,文献[14-18]对电力变压器内部故障电弧产气、油压升高和箱体形变进行了试验研究、理论建模和仿真模拟,发现故障油压随瓦斯气泡脉动而波动,并提出了基于压力特征的变压器数字式非电量保护原理。与传统电力变压器相比,特高压换流变压器容量大、电压等级高,其发生故障时短路电流和故障能量也相应更大,内部油压升高更为明显。受运输尺寸及重量限制,换流变压器内部结构设计更加紧凑,因而其故障超压上升速率更快。

本文通过分析电弧故障后气泡脉动机理,建立油中电弧作用下瓦斯气泡动力学模型以及绝缘油流体力学模型。在 ANSYS 平台中搭建真实的换流变压器模型,对故障油压进行多物理场耦合仿真计算。对比不同故障条件下的内部油压升高特征,总结故障期间油压时空分布规律。

2 理论建模

换流变压器发生内部故障时,电弧将瞬间释放出巨大能量汽化周围的绝缘油。其中的碳氢化合物分子在电弧的作用下化学键发生断裂,这些 C-C 键和 C-H 键断裂后产生氢原子和游离基团,碳、氢等元素和游离基经过复杂的化学反应生成分子链更短的氢气和低分子的烃类,包括 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CO 、 CO_2 、 C_2H_2 ,这类气体被称为变压器的故障气体^[19]。图 1 展示了变压器电弧故障期间瓦斯气泡行为及箱体形变过程。

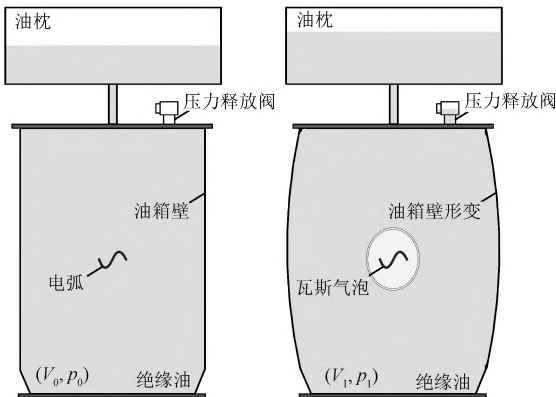


图 1 电弧故障期间瓦斯气泡及箱体形变示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas bubbles and tank deformation during arcing fault

换流变压器内部绝缘油初始体积为 V_0 ,故障气体将形成高温高压蒸汽气泡,而此时周围绝缘油仍维持在较低的压力 p_0 ,因此气泡会急剧膨胀并挤压

周围绝缘油。绝缘油体积被压缩至 V_1 ,其压力骤升至 p_1 。同时,油箱壁在骤升的油压作用下发生形变,而油箱壁的形变又在一定程度上缓解了油压的升高。随着气泡膨胀,其内压逐渐降低,当低于绝缘油油压后气泡开始收缩。总体而言,换流变压器内部电弧故障下油压升高是一个复杂的耦合问题,涉及电弧能量注入、瓦斯气泡脉动以及绝缘油流场变化等因素相互作用。故障超压幅值以及波动程度主要受电弧能量影响,同时略微受绝缘油体积模量、粘性系数等参数影响。而故障位置和绕组结构会直接影响故障超压在油箱内的分布。

2.1 电弧能量注入下的气泡脉动问题

换流变压器内部故障电弧是油压升高现象的源头。电弧能量的主要影响因素在于电弧电流、电弧电压以及电弧持续时间。电弧上的电压是弧电流与电弧电阻的乘积,而电弧介质的电阻大小是由介质中弧电流消耗的热能所致的游离程度决定,由于介质电阻受热惯性等因素影响,因此电弧的伏安特性是非线性的^[20]。

换流变压器内部故障电弧释放的能量为^[14]:

$$W_{\text{arc}} = \int_{t_0}^t P_{\text{arc}} dt = \int_{t_0}^t u_{\text{arc}} i_{\text{arc}} dt \quad (1)$$

式中, W_{arc} 为电弧能量; 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。

为方便计算,可认为电弧电压 u_{arc} 恒为正值,因此式(1)可简化为:

$$W_{\text{arc}} = \int_{t_0}^t u_{\text{arc}} \cdot |i_{\text{arc}}| dt \quad (2)$$

对于油中电弧,电弧电流基本等于短路电流,一般是比较容易求解的,针对匝间短路故障,存在如下关系:

$$i_{\text{arc}} = i_1 + i_c \quad (3)$$

式中, i_1 为原边电流; i_c 为故障环流。

电弧电压由于影响因素较多,其具有一定的随机性。J. B. DASTOUS 等学者认为电弧电压 u_{arc} 由电弧长度以及绝对压强决定^[21]:

$$u_{\text{arc}} = 55 l_{\text{arc}} \sqrt{p_{\text{arc}}} \quad (4)$$

式中, l_{arc} 为电弧长度; p_{arc} 为绝对压强。

若忽略电极附近的压降及燃弧、熄弧尖峰,可认为电弧电压仅与弧长有关^[22]:

$$u_{\text{arc}} = E l_{\text{arc}} \quad (5)$$

式中, E 为弧柱电场强度,根据现场油中电弧试验结果,取 70 V/cm。

电弧能量在电弧燃烧过程中会转化为各种不同类型的能量形式。油中电弧在燃烧时金属蒸汽的存在会和绝缘油中溶解的氧气发生化学反应,这会释放一定的能量影响电弧能量平衡。此外,电弧在燃烧过程中还伴随着强光、辐射、高压波、烧蚀和声等现象,基于上述分析,油中电弧故障能量平衡表达式可以表示为:

$$W_{\text{arc}} = W_{\text{rad}} + W_{\text{cond}} + W_{\text{conv}} + W_{\text{mv}} + W_{\text{loss}} + W_{\text{heat}} + W_{\text{chem1}} + Q - W_{\text{chem2}} \quad (6)$$

式中, W_{rad} 为电弧产生的辐射能量; W_{cond} 为电弧热传导的能量; W_{conv} 为气体对流的能量; W_{mv} 为电极材料熔化和蒸发所需要的能量; W_{loss} 为接触点损失的能量; W_{heat} 为使周围绝缘油达到沸点的能量; W_{chem1} 为将绝缘油裂解成气体的化学能; Q 为注入瓦斯气泡的能量; W_{chem2} 为蒸发的金属蒸汽和周围气体之间化学反应的能量。

在电弧能量的持续注入下,瓦斯气泡内能也随之变化。根据热力学第一定律,电弧作用下的瓦斯气泡满足如下的热力学平衡关系:

$$U_b = Q - W_b + U_0 \quad (7)$$

式中, U_b 为瓦斯气泡内能; W_b 为气泡膨胀对外做功; U_0 为气泡初始内能。

气泡在脉动过程中对流体做的功 W_b 为:

$$W_b = 4\pi \int_{t_0}^t p_b(\tau) R(\tau)^2 \dot{R}(\tau) d\tau \quad (8)$$

式中, p_b 为气泡内压; R 和 \dot{R} 分别为瓦斯气泡半径和瓦斯气泡边界运动速度; τ 为积分变量。

换流变压器发生内部故障期间绝缘油运动符合 Navier-Stokes (NS) 方程:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{f} - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (9)$$

式中, \mathbf{u} 为流体速度矢量; \mathbf{f} 为质量力; p 为压力; ρ 为流体密度; ν 为流体运动粘性系数。

由于流体在运动、压缩过程中保持连续,因而流场中任意一点处的速度矢量满足如下方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)并转化为球坐标形式,之后进行积分得到有限域内气泡动力学方程^[23]:

$$\begin{aligned} & \ddot{R} R^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r_d} \right) + \dot{R}^2 \left(\frac{3}{2} - \frac{2R}{r_d} + \frac{R^4}{2r_d^4} \right) \\ &= \frac{1}{\rho} \left[\frac{(\gamma - 1) U_b}{V_b} - \frac{4\mu \dot{R}}{R} - \frac{2\sigma_{\text{oil}}}{R} - p_d \right] \end{aligned} \quad (11)$$

式中, \ddot{R} 为瓦斯气泡边界处加速度; r_d 为气泡到边界的距离; p_d 为流体边界压强; γ 为瓦斯气体比热比; V_b 为瓦斯气泡体积; μ 为绝缘油动态粘度系数; σ_{oil} 为绝缘油表面张力系数。

2.2 流体力学模型

考虑到换流变压器几何结构不规则以及流场受气泡挤压瞬态变化较大,换流变压器内部流体行为将呈现出明显的湍流特征。雷诺数平均方法 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 在数值模拟湍流时具有计算时间较短、实用性较广等优点,因此在变压器流场的建模中,本文采用了基于雷诺数平均方法。模型引入了布辛涅司克假设,使雷诺平均方程封闭。雷诺平均动量方程如下^[24]:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (12)$$

式中, x_i, x_j 和 x_k 为空间坐标; \bar{u}_i 为流体速度矢量时均部分在 x_i 方向上的分量; \bar{p} 为平均压力分量; R_{ij} 为雷诺应力张量^[24]:

$$R_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (13)$$

式中, μ_t 为湍流动态粘度; δ_{ij} 为 Kronecker delta 符号; k 为湍流动能。

本文采用了具有较好数值稳定性和计算精度的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型研究故障期间换流变压器内部流场特征量分布情况。标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型可表示为^[25]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \varepsilon + \\ & \frac{1}{\rho} (G_k + G_b - Y_M + S_k) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \frac{C_{2\varepsilon} \varepsilon^2}{k} + \\ & \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{\rho k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + \frac{S_\varepsilon}{\rho} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, u_i 为流体速度矢量 \mathbf{u} 的第 i 个分量; ε 为湍流耗散率; G_b 和 G_k 分别为由浮力和平均速度梯度产生的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献; S_k 和 S_ε 均为源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为常数; σ_k 和 σ_ε 为湍流普朗特数。

3 仿真模型与设置

3.1 换流变压器几何模型及网格剖分

本文以一台实际的 500 kV 特高压换流变压器为研究对象,通过仿真分析该换流变压器在内部电弧故障期间的油压时空分布特征。该型号换流变压器采用单相两心柱两旁轭式铁心结构,在几何模型中将铁心和绕组简化为两个圆筒,如图 2 所示。几何模型中还适当忽略了对仿真结果影响不大的细小部件。换流变压器模型长约 9.5 m,宽约 3.2 m,高约 4.7 m。之后,在 ANSYS 平台进行网格剖分并建立有限元模型,如图 3 所示。一般而言,尺寸更小的网格可以一定程度上提高计算精度,但同时每一迭代步长下的计算时间也会增加。因此综合平衡计算精度与时间,将换流变内部流体域剖分为 542 589 个单元和 134 361 个节点。

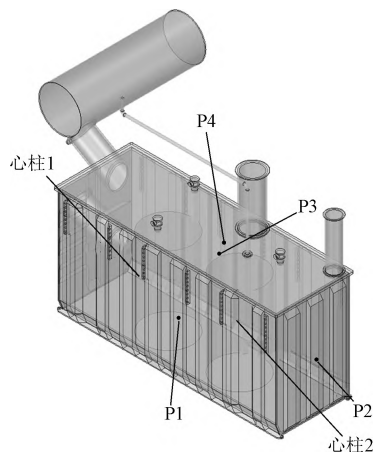


图 2 换流变压器几何模型

Fig. 2 Geometric model of converter transformer

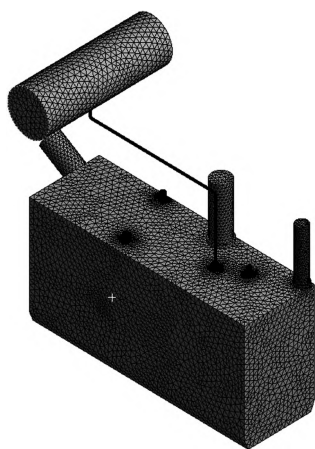


图 3 换流变压器有限元模型

Fig. 3 Finite element model of converter transformer

3.2 材料属性

流体的压缩性一般来说较小,随着压强和温度的变化,流体的密度仅有较小的变化,在多数情况下可以忽略压缩性的影响。但是在换流变压器内部电弧故障过程中,流场受气泡膨胀影响变化幅度较大,且变化过程非常迅速,此时流体的密度变化就不可忽略,因此需要考虑流体的可压缩性。本文仿真选用的绝缘油材料是化学式为 $C_{16}H_{29}$ 的油气混合物,其密度为 895 kg/m^3 ,粘度系数为 $3.32 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。此外,在仿真计算中还考虑了流体的湍流、粘性和重力效应。

3.3 边界条件

根据故障瓦斯气泡模型,仿真中瓦斯气泡的边界运动使用 Fluent 软件中的用户自定义函数 (User's Defined Function, UDF) 描述。由于故障初期瓦斯气泡膨胀较快,其几何形状的迅速改变会导致网格形状的剧烈变化。在这种情况下,网格可能会出现极度变形、质量较差的现象,甚至产生负体积错误。因此本文采用扩散光顺与局部网格重构法不断对发生大变形的网格进行矫正。将上述气泡动力学方程控制的特定运动赋予气泡边界节点。

将油枕处流体的边界设置为压力出口,压强为大气压强。压力释放阀在流体压强超过其开启压力后动作,同样设置为压力出口,可表示为:

$$p_{\text{out}} = p_0 \quad (16)$$

式中, p_{out} 为压力出口压强; p_0 为大气压强,取 101.3 kPa 。

换流变压器内部流体剩余边界设置为固壁,并应用无滑移边界条件:

$$v_r = 0 \quad (17)$$

式中, v_r 为流体边界的相对速度。

4 典型故障算例

4.1 算例 1:心柱 1 网侧绕组中部发生 2 MJ 电弧故障

算例 1 计算了换流变压器心柱 1 绕组中部发生 2 MJ 电弧故障时的油压分布,故障持续时间为 80 ms。故障期间换流变压器本体内部三维流场压力云图如图 4 所示。为全面反映换流变油箱不同壁面及顶盖处的压力特征,仿真中设置了四个压力测点,其中测点 P1、P2 和 P3 分别位于换流变压器前壁面、右壁面和后壁面中心处,测点 P4 位于顶盖靠近油枕连接管处,各测点位置如图 2 所示。

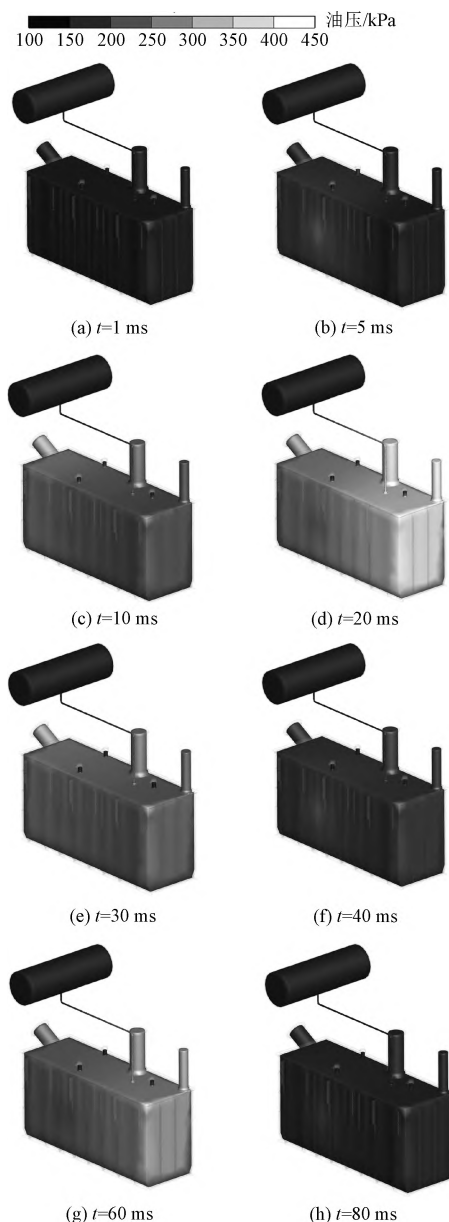


图4 算例1电弧故障期间油压分布云图

Fig. 4 Oil pressure distribution during arcing fault in case 1

由图4可知,换流变压器内部故障超压在空间上呈现出明显的非均匀分布特征,同时在时间上展现出明显的波动特性。在故障开始时刻,可认为换流变压器内部电弧产生区域有非常小的初始瓦斯气泡。随着电弧的持续作用,瓦斯气泡开始迅速膨胀,故障点附近绝缘油被急剧压缩,形成升高速率极快的动态超压。在 $t=5\text{ ms}$ 时,从图4(b)中可以观察到靠近故障点的前壁面处的油压率先升高,该处压强约为 296 kPa ,而此时换流变压器内其余位置油压较低。随后绝缘油进一步被压缩,流体局部密度的变化会扩散到整个流体域,进而导致整体压力变化。

在 $t=10\text{ ms}$ 时,换流变压器内压力升高较为明显,油箱内部平均压强超过 200 kPa 。此后在 $t=20\text{ ms}$ 时,网侧套管附近出现了压力集中现象,局部油压超过 400 kPa 。此时气泡体积即将达到第一个峰值,绝缘油的压缩性达到最大。在 $t=40\text{ ms}$ 时,由于瓦斯气泡开始收缩,换流变压器网侧套管处压力并未继续升高。在此后的 20 ms 内,由于气泡的再次膨胀,换流变压器内部油压再次升高。在故障最后 20 ms 内,由于气泡二次收缩,油压再次降低,在故障结束时油箱内平均油压约为 140 kPa 。

图5绘制了换流变压器心柱1网侧绕组中部发生 2 MJ 电弧故障时产生的瓦斯气泡体积变化曲线。从图5中可以看出,瓦斯气泡在电弧故障期间整体呈现脉动增长的趋势,并经历了两次明显的脉动过程。故障开始初期在电弧能量的注入下瓦斯气泡迅速膨胀,并于 $t=24.0\text{ ms}$ 达到第一个峰值,为 33.1 L 。之后由于周围油压上升以及瓦斯气泡内压的降低,气泡开始进入收缩过程,并在 $t=36.6\text{ ms}$ 收缩到最小值 27.1 L 。之后瓦斯气泡再次膨胀,第二个峰值为 59.2 L 。故障结束时气泡体积稳定在 59 L 左右。

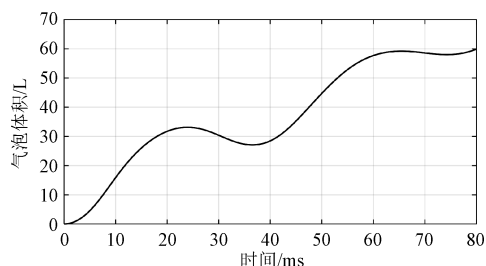


图5 算例1瓦斯气泡脉动曲线

Fig. 5 Curve of gas bubble volume in case 1

图6展示了算例1中换流变内部P1、P2、P3、P4四个位置的故障油压曲线。仿真结果表明,受脉动的瓦斯气泡影响,换流变压器内故障超压出现了两次明显波动。由于气泡脉动能量耗散以及压力释放阀的泄压效果,尽管气泡体积第二个峰值大于第一个峰值,但第二个油压峰值明显低于首个油压峰值。具体地,P1点处油压率先升高,最大升高速率超过 23 MPa/s 。P2点第一个油压峰值最大,达到了 430 kPa 。P3点和P4点油压较为相似,分别于 $t=19.8\text{ ms}$ 和 $t=58.4\text{ ms}$ 达到第一和第二波峰,幅值分别为 383 kPa 和 291 kPa ,故障结束时两点处油压约为 123 kPa 。

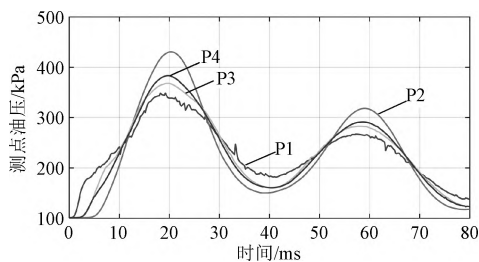


图6 算例1各测点油压曲线

Fig. 6 Oil pressure curves at measuring points in case 1

4.2 算例2:心柱1网侧绕组上端部发生4 MJ 电弧故障

本节以换流变压器心柱2绕组上端部发生电弧故障为例,利用本文提出的数值方法计算换流变压器故障后本体内部油压变化及分布情况,如图7所示。故障持续时间为80 ms,释放的总电弧能量为4 MJ。仿真中四个压力测点位置与算例1相同。

与算例1不同,算例2中的电弧故障发生在心柱1绕组上部且能量较高,因而算例2中整体油压较高并且心柱1上部附近的油压率先升高。在 $t=5$ ms时,从压力云图上可以观察最靠近故障点的前壁面压力已开始升高,气泡附近的压强已超过360 kPa。此时虽然气泡已经膨胀到一定的体积,然而油箱内其余位置油压仍然较低。之后绝缘油继续被压缩,距离故障点较近的油箱顶盖和前壁处的油压开始升高。在 $t=20$ ms时,油箱内部压力升高较为明显,其中网侧套管局部油压较高,为570 kPa,这是由于网侧套管体积较小,易出现压力集中。在此后20 ms内,由于气泡与油压的相互作用,油压的升高抑制了气泡的进一步膨胀,流场的压力逐渐下降。在 $t=60$ ms时,换流变压器内部油压再次升高,部分位置超过500 kPa。在故障结束时油箱内超压有所降低且分布较为均匀,约为330 kPa。对比两组算例可以观察到,算例2故障结束时油箱内部超压远高于算例1,因此在面对较大能量的电弧故障时,压力释放阀的泄压性能可能无法匹配持续快速上升的油压。

图8绘制了换流变压器心柱1网侧绕组上端部发生4 MJ电弧故障时产生的瓦斯气泡体积变化曲线。与算例1相比,由于电弧能量较大,在该组算例中瓦斯气泡的脉动过程相对不明显,大体上呈现阶梯上升的趋势。瓦斯气泡在 $t=24.2$ ms达到第一个峰值48.3 L。之后的大约10 ms气泡体积基本维持在48 L左右。随后气泡开始继续膨胀,在故障结束时其体积达到了125.3 L。

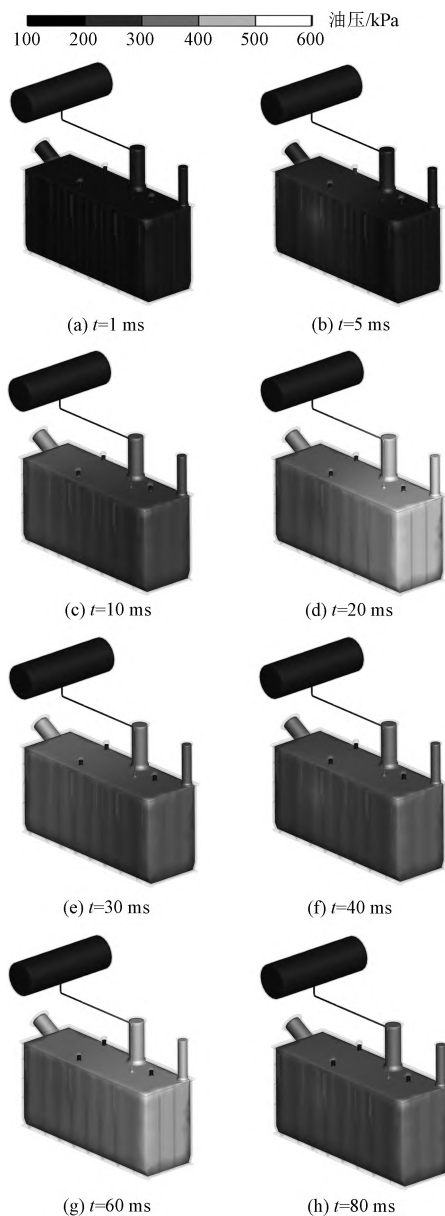


图7 算例2电弧故障期间油压分布云图

Fig. 7 Oil pressure distribution during an arcing fault in case 2

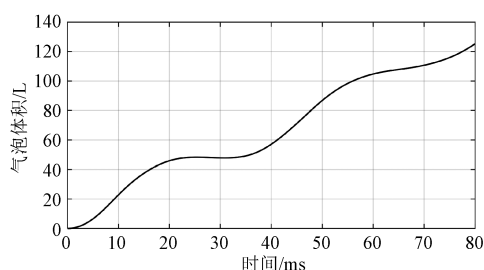


图8 算例2瓦斯气泡脉动曲线

Fig. 8 Curve of gas bubble volume in case 2

图9绘制了算例2中换流变压器内部P1、P2、P3、P4四个位置的油压曲线。由于算例2的电弧能

量相较于算例1更大,算例2中故障超压的幅值明显高于算例1且波动程度相较于算例1更为缓和。这是由于更大的电弧能量注入抑制了瓦斯气泡的收缩过程。P1点油压最先开始上升,上升速率达到22.6 MPa/s。P2点的油压在 $t=20.0$ ms时达到第一个波峰570 kPa,此后由于气泡的收缩开始迅速下降,在经历了两次脉动后为333 kPa。测点P3和P4处油压也同样呈现波动趋势,经历两次波动后,最终油压也维持在330 kPa左右。

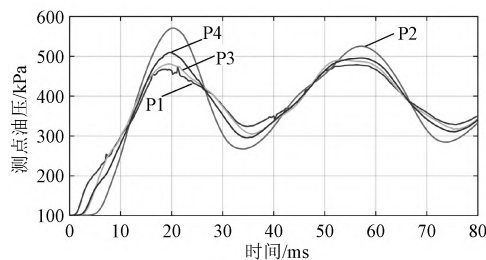


图9 算例2各测点油压曲线

Fig. 9 Oil pressure curves at measuring points in case 2

5 结论

本文以实际500 kV换流变压器作为研究对象,开展内部电弧故障油压建模以及定量计算。结果表明:换流变压器内部发生电弧故障时,瓦斯气泡快速膨胀引起油箱内部压力骤升。换流变压器内部油压升高与故障能量存在正相关关系。能量为4 MJ的电弧故障可导致油箱内出现峰值超过570 kPa的局部超压。此外,故障超压在脉动的瓦斯气泡驱动下表现出波动特征,并且受油箱内部结构影响在空间上分布不均。本项研究可替代危险昂贵的现场燃弧试验,为换流变压器非电量保护提供理论模型和仿真手段。

参考文献 (References):

- [1] 王昊天, 李军浩, 宋颜峰, 等. 换流变压器基波及谐波作用下损耗分布与特性的研究 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40 (10): 10-17.
WANG Haotian, LI Junhao, SONG Yanfeng, et al. Study on loss distribution and characteristics under fundamental wave and harmonics of converter transformer [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40 (10): 10-17.
- [2] 王栋, 詹振宇, 王伟, 等. 换流变压器振动噪声问题研究综述 [J]. 电工电能新技术, 2022, 41 (11): 28-42.
WANG Dong, ZHAN Zhenyu, WANG Wei, et al. Review on vibration and noise of converter transformer [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41 (11): 28-42.
- [3] 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.
- [4] TRENCHAM H. Circuit breaking [M]. London: Butterworth Scientific Publications, 1953.
- [5] GOTO K, MIRUA Y. The pressure rise during the internal fault in oil-filled transformer [C] //CIGRE SC12 Colloquium. Paris, France, 1988.
- [6] 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.
- [7] ROBERTS N. 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.
- [8] MAHIEU W. Prevention of high-fault rupture of pole-type distribution transformers [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94 (5): 1698-1707.
- [9] KAWAMURA T, UDEA M, ANDO K, et al. Prevention of tank rupture due to internal fault of oil-filled transformer [C] //CIGRE 1988 Session. Paris, France, 1988.
- [10] BRADY R, MULLER S, BRESSY G D, et al. Prevention of transformer tank explosion part 2: Development and application of a numerical simulation tool [C] //2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. Chicago, USA, 2008.
- [11] DASTOUS J B, LANTEIGNE J, FOATA M. Numerical method for the investigation of fault containment and tank rupture of power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (3): 1657-1665.
- [12] SAMUEL B, DASTOUS J B. Design and testing of an arc resistant power transformer tank [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35 (2): 699-706.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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] YAN C, ZHANG P, GUO J, et al. An improved coupled FE-circuit model for turn-to-turn short-circuit faults inside converter transformers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59 (5): 8400205.
- [19] 查申龙. 变压器故障气体宽带光声光谱技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- ZHA Shenlong. Transformer fault gas detection based on the broadband photo-acoustic spectroscopy [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [20] 苗世洪, 朱永利. 发电厂电气部分 (第五版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [21] Working group A2.33. Guide for transformer fire safety practices [R]. Paris: CIGRE, 2013.
- [22] 尚振球. 交流电弧能量计算曲线的绘制和应用 [J]. 西安交通大学学报, 1963 (1): 81-95.
- SHANG Zhenqiu. AC arc energy calculation curve and application [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1963 (1): 81-95.
- [23] 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.
- [24] 温正, 石良成, 任毅如. Fluent 流体计算应用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- WEN Zheng, SHI Liangcheng, REN Yiru. Fluent fluid computing application tutorials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [25] HINZE J O. Turbulence [M]. New York: McGraw-Hill Publishing Co., 1975.

Numerical study on overpressure caused by arcing faults inside a converter transformer

ZHOU Meng^{1,2}, LUO Chuanxian^{1,2}, GUO Jiaxu³, ZHOU Zhengqin^{1,2}, ZHANG Peng³, YAN Chenguang³

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210061, China;

2. Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The arcing fault inside a converter transformer will result in a sudden rise of oil pressure inside the tank, which may lead to tank rupture or even serious explosion and fire, seriously threatening the safe and stable operation of the power system. This paper takes the actual 500 kV UHV converter transformer as the research object, and carries out numerical simulations on the ANSYS platform to obtain the spatial and temporal distribution characteristics of the oil pressure inside the converter transformer during the arcing fault. The simulation results show that the gas bubble grows dynamically during the arcing fault inside the equipment, the oil pressure rises abruptly with the pulsation of the gas bubbles and shows obvious fluctuation characteristics, and the spatial distribution of oil pressure inside the converter transformer is uneven. This study has certain reference significance for the converter transformer pressure reduction and explosion-proof and structure optimization.

Key words: converter transformer; internal arcing fault; overpressure; numerical simulation