

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.010

## 换流变压器升高座电弧故障压力仿真分析

潘志城<sup>1</sup>, 王宁<sup>2</sup>, 邓军<sup>1</sup>, 郑久江<sup>2</sup>, 谢志成<sup>1</sup>, 张晋寅<sup>1</sup>

(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. 沈阳变压器研究院有限公司, 沈阳 110000)

**摘要:** 换流变压器的燃弧故障会导致变压器损坏甚至引起邻近的变压器或其他电气设备损坏, 对变电站造成严重的破坏, 影响到电网的安全稳定运行。文中针对换流变压器的薄弱环节—升高座内部的燃弧故障, 采用数值仿真计算开展了换流变压器升高座内部故障条件下的故障特征研究, 分析了升高座内部不同燃弧能量下的升高座筒身等效压力及应力分布, 指出在电弧能量的情况下, 通过加强器壁材料性能不能起到有效地抗爆作用, 需要研发有效地泄压措施。

**关键词:** 换流变压器; 电弧故障; 数值仿真

### Simulation Analysis of Arc Fault Pressure in Converter Transformer Elevated Seat

PAN Zhicheng<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>2</sup>, DENG Jun<sup>1</sup>, ZHENG Jiujiang<sup>2</sup>, XIE Zhicheng<sup>1</sup>, ZHANG Jinyin<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Shenyang Transformer Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

**Abstract:** The arcing fault of converter transformer will lead to damage to transformer and even to adjacent transformers or other electrical equipment, which will cause serious damage to substation and affect the safe and stable operation of the power grid. Aiming at the weak link of the converter transformer, namely arcing fault inside the elevated seat, the numerical simulation is used in this paper to perform the fault characteristics study under the internal fault condition of the converter transformer elevated seat, analyze the equivalent pressure and stress distribution of the elevated seat under different arcing energy of elevated seat. It is pointed out that under the arc energy enhancing the material properties of the wall can not achieve anti-explosion effects and it is therefore necessary to develop effective pressure relief measures.

**Key words:** converter transformer; arc fault; numerical simulation

## 0 引言

超高压直流输电工程具有损耗小、输送容量大、潮流快速可控、易于联网的特点, 加上中国电力负荷需求与能源资源呈逆向分布, 国家提出了“西电东送”发展战略, 进一步促进了大容量远距离的电力输送模式的发展。已经投运、实施、规划了多项 HVDC 工程, 包括云南—广东、向家坝—上海、哈密南—郑州、滇西北—深圳等±800 kV 特高压直流输电工程。其中, 昌吉—古泉线±1 100 kV 特高压直

流输电工程是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、输送距离最远的直流输电工程, 建设中的“昆柳龙”直流工程, 是世界上电压等级最高、输送容量最大的三端混合直流输电工程。

当换流变压器内部发生短路故障时, 变压器绝缘油会迅速分解产生可燃性气体, 变压器内部压力随之急剧上升, 当内部压力大于变压器机械结构最大承受压力时, 变压器可能会由于遭受到压力冲击而损坏, 引起大面积停电、减负荷, 影响电网的运行效率以及经济效益<sup>[1-9]</sup>。更为严重的是, 如果继电保

护装置拒动或延迟动作,换流变压器则有可能造成爆炸、起火事故,对周围设备及人员造成安全威胁,带来不可预料的经济损失,见图1。



图1 某换流站故障换流变事故照片

Fig. 1 Accident photo of the faulty converter transformer at a certain converter station

针对目前所面临的问题,目前已有不少试验及数值分析研究。总体而言,不同的变压器类型、型号所表现出的破坏特征具有一定的相似,但是从定量上则具有很大的差别,与变压器结构特征、电弧故障发生的部位、能量等诸多因素有关<sup>[10-17]</sup>,对于变压器结构的强度设计提出了要求<sup>[18-20]</sup>。

文中采用数值仿真计算,针对某换流变压器升高座开展内部故障条件下的变压器强度安全研究。

## 1 有限元模型

### 1.1 模型建立

根据实际换流变升高座结构进行合理的简化,其三维模型见图2。升高座模型基本参数见表1。

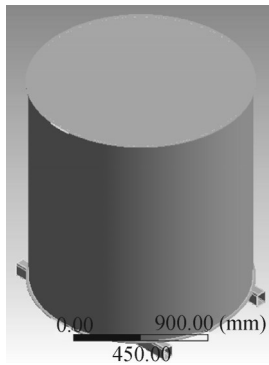


图2 换流变升高座三维模型图

Fig. 2 Model diagram of the converter transformer hoist seat

升高座的结构材料为Q235钢,其弹性模量为 $2.18 \times 10^5$  MPa,泊松比为0.3,密度为 $7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,受拉屈服强度为235 MPa,抗压屈服强度为235 MPa,抗拉极限强度为460 MPa。

材料采用双线性各向同性硬化模型,在应力小于235 MPa时,材料处于弹性阶段,应力与应变成正比关系,符合胡克定律。屈服极限后的强化阶段,

表1 升高座模型基本参数

Table 1 Basic parameters of the hoist seat model

模型变量	参数
半径/mm	1 540
高度/mm	1 700
体积/mm <sup>3</sup>	$7.24 \times 10^7$
质量/kg	568.72
零件数量	5
节点数	599 323
单元数	85 490
单元类型	四面体、六面体

此时产生的形变在应力卸载后不能全部消除,会出现残余变形。

### 1.2 控制方程

计算交流电弧能量 $W_{arc}$ 的基本公式为

$$W_{arc} = \int_0^{\Delta t} u_{arc} i_{arc} dt \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta t$ 为燃弧时间; $u_{arc}$ 为电弧两端的压降; $i_{arc}$ 为电弧电流。

为了使式(1)便于积分,可认为电弧电压 $u_{arc}$ 始终为正值,将 $i_{arc}$ 取绝对值得

$$W_{arc} = \int_0^{\Delta t} u_{arc} |i_{arc}| dt \quad (2)$$

计算电弧电压与电弧长度 $l_{arc}$ 和绝对压强 $p$ 的关系为

$$u_{arc} = 55 l_{arc} \sqrt{p} \quad (3)$$

在计算交流电弧能量时,一般假设不计阴极和阳极附近的电压降。这是因为燃弧尖峰和熄弧尖峰出现的时间相对来说极短,且出现的时间通常在电流过零点附近,因此在这个过程中析出的电弧能量很小,可以忽略。

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。如变压器绝缘油在运输、储存过程中不可避免会溶解氧气、氮气等气体,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。变压器内部故障电弧的能量平衡见图3。

基于上述分析,油中内部电弧故障能量平衡表达式可以表示为

$$W_{arc} = W_{rad} + W_{cond} + W_{conv} + W_{mv} + W_{loss} + W_{heat} + W_{chem1} + W_p - W_{chem2} \quad (4)$$

式(4)中: $W_{arc}$ 为故障电弧输入的电能; $W_{rad}$ 为电弧的辐射能量; $W_{cond}$ 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

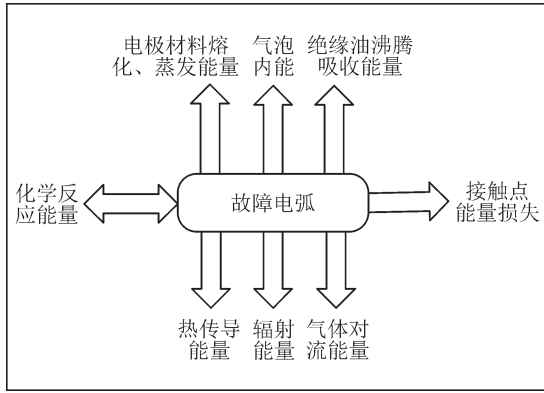


图3 变压器内部故障电弧的能量平衡示意图

Fig. 3 Energy balance diagram of transformer internal fault arc

油达到沸点的能量;  $W_{chem1}$  为将绝缘油裂解成气体的化学能;  $W_p$  为气泡内气体增加的内能;  $W_{chem2}$  为蒸发的金属蒸汽和周围气体之间化学反应的能量。

## 2 仿真计算

升高座故障点一般位于筒壁中轴心上, 监测点位于升高座上盖外面中心点, 故障点、监测点设置见图4。

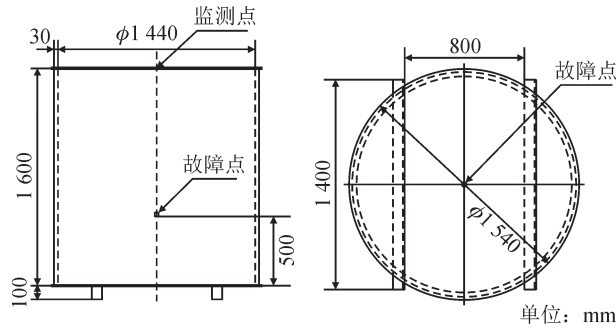


图4 升高座故障点、监测点仿真设置

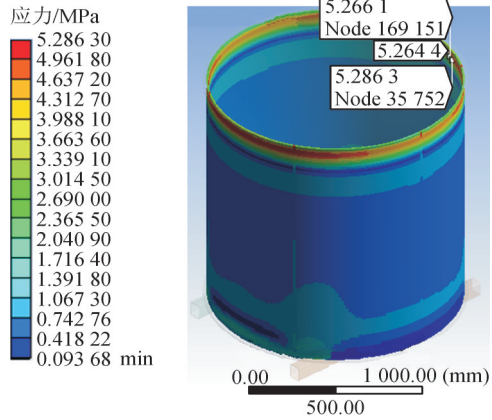
Fig. 4 Simulation settings for the hoist seat failure point and monitoring point

故障能量选取分别为0.005、2、8、15 MJ。根据各个不同能量的电弧故障的动态仿真分析, 得到升高座结构不同部位的压强曲线, 根据压强的峰值, 转换成静态压强值, 然后计算开关油室和升高座的强度与变形。

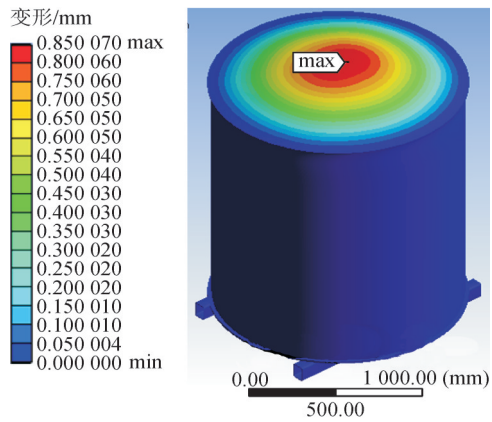
### 2.1 故障能量5 kJ下的仿真结果分析

针对换流变压器升高座进行总能量为5 kJ的电弧故障动态仿真分析, 根据计算结果得到该故障能量下所产生的升高座器身最大压强为0.01 MPa, 以此作为升高座器身结构的压力作用荷载。

分析换流变升高座的应力分布与变形情况, 其应力分布与总体变形见图5, 计算结果见表2。



(a) 应力



(b) 变形

图5 5 kJ能量故障时升高座应力与变形

Fig. 5 Stress and deformation of the elevated seat during a 5 kJ energy failure

表2 5 kJ能量下升高座强度计算结果

Table 2 Calculation results of elevated seat strength under 5 kJ energy

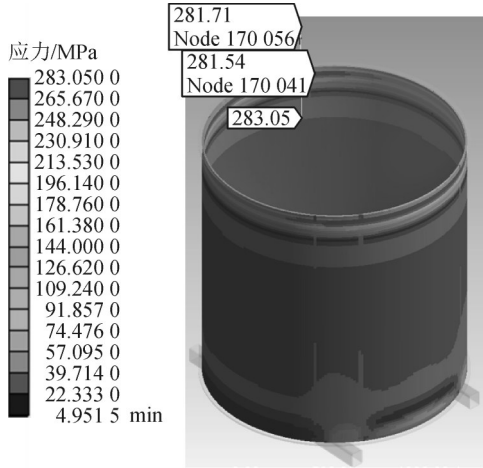
最大应力/MPa	平均应力/MPa	许用应力/MPa	最大变形/mm
5.2863	0.9810	235.0000	0.8500

应力最大值产生于上盖与筒壁连接处, 应力最大值为5.2863 MPa, 小于升高座材料Q235的许用应力值, 因此判定升高座强度满足安全要求。

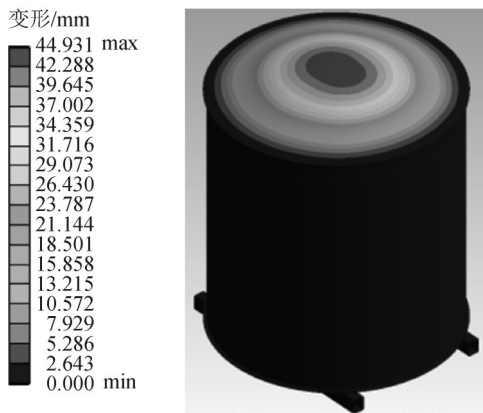
### 2.2 故障能量2 MJ下的仿真结果分析

针对换流变压器升高座总能量为2 MJ的电弧故障仿真分析。根据分析结果可以得到, 2 MJ故障能量在升高座器身所产生的压强为0.57 MPa, 将其施加到升高座结构上, 得到的应力分布与总体变形见图6, 计算结果见表3。

由图6可见, 应力最大值产生于上盖与筒壁连接处, 最大值为283.05 MPa, 该部位应力值已经超出Q235材料的许用应力值, 认为顶盖已经产生较大塑性变形或损坏, 因此该部位结构强度不满足要求; 结构总体平均应力只有51.87 MPa, 说明其余大部分部位的材料强度是满足要求的。因此, 只需要在上



(a) 应力



(b) 变形

图6 2 MJ能量故障时升高座应力与变形

Fig. 6 Stress and deformation of the Hoist seat during a 2 MJ energy failure

表3 2 MJ能量下升高座强度计算结果

Table 3 Calculation results of hoist seat strength under 2 MJ energy

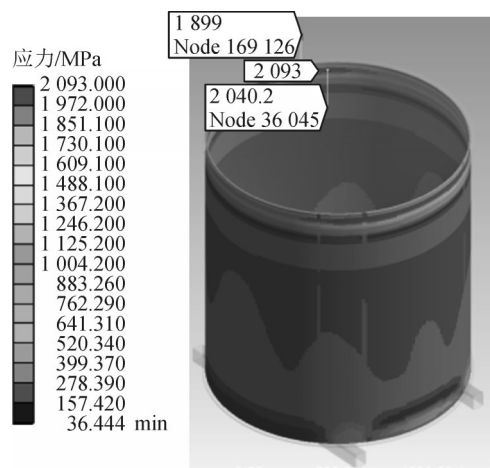
最大应力/MPa	平均应力/MPa	许用应力/MPa	最大变形/mm
283.05	51.87	235.00	44.93

盖与筒壁连接处加强安全设计,根据应力结果,该部位采用Q345即可满足要求。

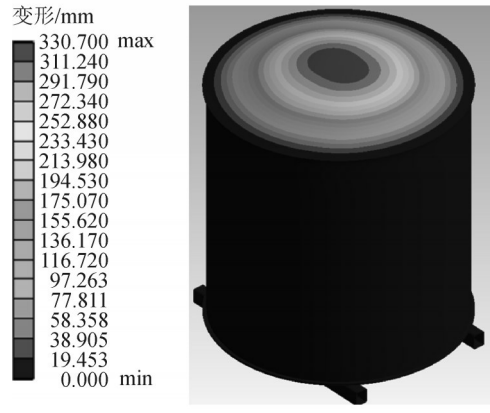
### 2.3 故障能量8 MJ下的仿真结果分析

针对换流变压器升高座进行了总能量为8 MJ的电弧故障仿真分析。根据分析结果得到8 MJ故障能量在升高座器身所产生的压强为4.18 MPa,将其施加到升高座结构上,得到的应力分布与总体变形见图7,计算结果见表4。

由图7可见,应力最大值产生于上盖与筒壁连接处,最大值为2 903 MPa,已经远超Q235材料的许用应力值,顶盖已经损坏,因此结构强度不满足安全要求;平均应力达到381.67 MPa,表明升高座结构整体已不满足强度要求。因此,已经不能通过提高



(a) 应力



(b) 变形

图7 8 MJ能量故障时升高座应力分布与变化情况

Fig. 7 Stress distribution and changes of the hoist seat during an 8 MJ energy failure

表4 8 MJ能量下升高座计算结果

Table 4 Calculation results of hoist seat under 8 MJ energy

最大应力/MPa	平均应力/MPa	许用应力/MPa	最大变形/mm
2 093.00	381.67	235.00	330.70

材料型号来实现安全要求,必须采取泄压设计方案才可能满足安全性要求。

### 2.4 故障能量15 MJ下的仿真结果分析

针对换流变压器升高座进行的总能量为15 MJ的电弧故障仿真分析可以得到,15 MJ故障能量在升高座器身的下所产生的压强为10.76 MPa,将其施加到升高座结构上,得到的应力分布与总体变形见图8,计算结果见表5。

对比图5-8及表2-4的计算结果可见,升高座承受8 MJ以上故障能量的情况下,升高座结构整体已不满足强度要求。

## 3 结论

文中针对换流变压器升高座内部电弧故障,分

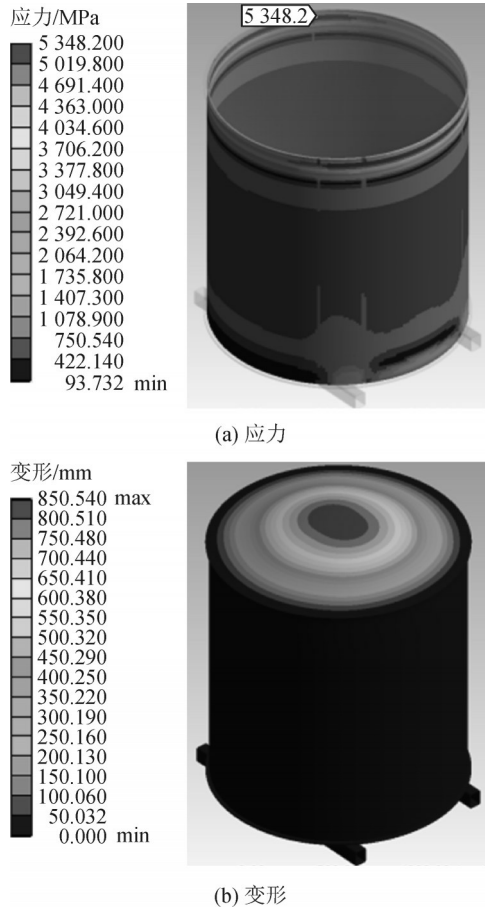


图8 15 MJ 能量故障时升高座应力分布与变化情况

Fig. 8 Stress distribution and changes of the hoist seat during a 15 MJ energy failure

表5 15 MJ 能量下降高座计算结果

Table 5 Calculation results of hoist seat under 15 MJ energy

最大应力/MPa	平均应力/MPa	许用应力/MPa	最大变形/mm
5 348.20	981.64	235.00	850.54

别进行了0.005、2、8、15 MJ 4种故障能量情况下的压强和器身应力仿真分析。结果表明:

1)故障能量大小对于流场内部压力影响显著,升高座结构受到的压力幅值随着故障能量增加急剧增大,而对压力分布的影响不大。

2)采用不同故障能量下等效压强进行升高座结构分析,得到的箱壁应力及变形分布规律是相似的,箱壁的应力薄弱部位在上盖与筒壁的连接处。

3)在刚性设计的情况下,故障能量在2 MJ 以下时,可以采用局部提高材料型号的方法满足强度要求;但随着故障能量的增大,刚性设计已经无法满足安全要求,必须采取泄压阀或防爆膜等措施。

参考文献:

[1] 龙 启,杨 旭,薛淑鹏,等.基于圆坐标表征法的换流变压器励磁涌流辨识研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(9):118-129.

LONG Qi, YANG Xu, XUE Shupeng, et al. Research on identification of converter transformer inrush current based on circular coordinate representation method[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 118-129.

[2] 孔令哲,何柏娜,李 辉,等.低压直流断路器拓扑参数对燃弧时长影响研究[J].南方电网技术,2024,18(2):39-46.

KONG Lingzhe, HE Baina, LI Hui, et al. Research on the influence of topology parameters of low-voltage dc circuit breaker on arcing duration[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 39-46.

[3] 杜长青,徐明友,刘城欣,等.基于马尔科夫状态空间法的换流变压器继电保护系统可靠性[J].电网与清洁能源,2025,41(2):22-32.

DU Changqing, XU Mingyou, LIU Chengxin, et al. A reliability analysis of converter transformer relay protection systems based on markov state space method[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(2): 22-32.

[4] 廖 波.某电站主变压器电容式套管爆炸分析及处理[J].水电与新能源,2021(7):73-75.

LIAO Bo. Analysis and treatment of a condenser bushing explosion accident of the main transformer in a power station[J]. Hydropower and New Energy, 2021(7): 73-75.

[5] 张 润,邱志斌,童志鹏,等.基于红外图像目标检测与偏斜矫正的变压器套管发热缺陷检测方法[J].南方电网技术,2024,18(9):59-68.

ZHANG Run, QIU Zhibin, TONG Zhipeng, et al. Detection method of transformer bushing thermal defect based on infrared image target detection and skew correction[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 59-68.

[6] 王 仁,庄杰龙,郑 雄,等.换流变压器接地电流分析与仿真计算[J].变压器,2024,61(4):6-11.

WANG Ren, ZHUANG Jielong, ZHENG Xiong, et al. Converter transformer group current analysis and simulation[J]. Transformer, 2024, 61(4): 6-11.

[7] 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.

[8] 杨金鑫,廖才波,胡 雄,等.基于DGA与TPE-LightGBM的变压器故障诊断[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):70-77.

YANG Jinxin, LIAO Caibo, HU Xiong, et al. Transformer fault diagnosis based on DGA and TPE-LightGBM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 70-77.

[9] 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及发展趋势[J].电测与仪表,2024,61(2):1-9.

QIN Yiwei, ZHANG Penghe, SONG Runan, et al. Arc fault diagnosis technology and trend of development in novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 1-9.

[10] 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.
- [11] 余文强, 付小伟, 吕波, 等. 基于剩磁影响的变压器诊断试验结果治理方法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(11): 12-20.  
YU Wenqiang, FU Xiaowei, LYU Bo, et al. A management method for transformer diagnostic test results based on remanent flux influence[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(11): 1-11.
- [12] 程欣, 孙悦, 黄威, 等. 计及维护操作影响的变压器内部潜伏性故障率预测模型[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 170-176.  
CHENG Xin, SUN Yue, HUANG Wei, et al. Prediction model of internal latent failure rate of transformer considering the influence of maintenance operation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 170-176.
- [13] 李多, 张莲, 赵娜, 等. 基于混合特征选择和 INGO-DHKELM 的变压器故障诊断方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(8): 19-28.  
LI Duo, ZHANG Lian, ZHAO Na, et al. Transformer fault diagnosis method based on hybrid feature selection and INGO-DHKELM[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(8): 19-28
- [14] 侯赛, 成润坤, 刘达. 基于二次采样和集成学习方法的变压器故障预测[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 40-47.  
HOU Sai, CHENG Runkun, LIU Da. Transformer fault forecast based on re-sampling and integrated learning approach[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 40-47.
- [15] 赵欣宇, 杨黎波, 董一夫, 等. 变压器油蒸气爆炸与泄爆过程数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(8): 31-35.  
ZHAO Xinyu, YANG Libo, DONG Yifu, et al. Numerical simulation of transformer oil vapor explosion and venting process [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(8): 31-35.
- [16] 余阳, 阮娅琳, 杨黎波, 等. 换流变压器油蒸汽爆炸的三维仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 155-161.  
YU Yang, RUAN Yalin, YANG Libo, et al. 3D simulation of oil vapor explosion in converter transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 155-161.
- [17] 张少华, 蒋慧灵, 刘国平. 某特高压变压器爆炸事故数值模拟重构[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(3): 356-359.  
ZHANG Shaohua, JIANG Huiling, LIU Guoping. Numerical simulation and reconstruction of explosion accident of an UHV transformer[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(3): 356-359.
- [18] 杜振斌, 李曼, 路素银, 等. 电力变压器开关油箱爆炸的强度分析[J]. 机械工程师, 2020(10): 128-129.  
DU Zhenbin, LI Man, LU Suyin, et al. Strength analysis of explosion for power transformer switch tank[J]. Mechanical Engineer, 2020(10): 128-129.
- [19] 包金山, 杨定坤, 张靖, 等. 基于特征提取与 INGO-SVM 的变压器故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 24-32.  
BAO Jinshan, YANG Dingkun, ZHANG Jing, et al. Transformer fault diagnosis method based on feature extraction and INGO-SVM [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 24-32.
- [20] 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.

潘志城(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事换流变故障诊断和高电压试验技术的研究工作(E-mail: 827432969@qq.com)。

王宁(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事变压器高电压试验技术的研究工作(通信作者)(E-mail: wangning@stri.com.cn)。