

大型电力变压器非电量保护研究进展与展望

李博宇¹, 郝治国¹, 张康海¹, 董嘉陶¹, 郑玉平², 薛众鑫²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安;

2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 211106, 南京)

摘要: 电力变压器是电网中承担电能传输与电压调节任务的核心装置,其油箱内部电弧故障易引发燃爆甚至火灾事故,从而造成恶劣的影响甚至人员伤亡。业界工作者根据变压器内部电弧故障引发的非电参量特性的保护原理,开发了相应的保护装置。该类装置与电气量保护装置相配合,共同承担维护电力变压器安全稳定运行的重要职责。针对大型电力变压器,阐述了其内部电弧故障引发非电参量变化的物理过程及其内在机理;分类归纳了当前现场实际应用的非电量保护装置及其保护原理;梳理了现阶段针对变压器内部电弧故障引发非电参量特性开展的实验探究与仿真分析的研究现状,以及新型非电量保护装置的设计开发;总结了当前非电量保护原理及装置的不足与面临的挑战;展望了电弧引发的非电参量特性、新型保护原理和保护装置等方面的未来研究方向。该研究可为大型电力变压器新型继电保护技术的研究提供理论参考与工程指导。

关键词: 电力变压器;非电量保护;电弧;保护原理;保护装置

中图分类号: TM772 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604004 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0042-16

A Review of Research Progress and Prospect of Non-Electric Protection for Large Power Transformers

LI Boyu¹, HAO Zhiguo¹, ZHANG Kanghai¹, DONG Jiatao¹,

ZHENG Yuping², XUE Zhongxin²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: Power transformers are core equipment in electrical grids, responsible for power transmission and voltage regulation. Internal arc faults within the transformer tank can easily lead to combustion, explosions, and even fires, resulting in severe consequences and casualties. Based on the protection principles that rely on the non-electrical parameter characteristics induced by internal arc faults, corresponding protection devices have been developed in the industry. These devices work in coordination with electrical protection equipment to collectively ensure the safe and stable operation of power transformers. This paper first elaborates on the physical processes and underlying mechanisms of the non-electrical parameter changes caused by internal arc faults in large power transformers. Then, the non-electric protection devices currently applied in the field, along with their operating principles, are categorized and summarized. The current research status concerning experimental

investigation and simulation analysis of the non-electrical parameter characteristics induced by internal arc faults is reviewed, together with the design and development of new types of non-electric protection devices. Furthermore, the shortcomings and challenges faced by current non-electric protection principles and devices are summarized. Finally, future research directions are outlined, including the characteristics of non-electrical parameters caused by arcs, novel protection principles, and the development of protection devices. This work is expected to provide theoretical reference and engineering guidance for the research of new relay protection technologies for large power transformers.

Keywords: power transformer; non-electric protection; arc; protection principle; protection device

随着我国经济实力的快速增长,电网规模和装机容量也随之连年攀升。作为电网中承担电能传输与电压调节任务的核心装置,每一台大型变压器的运行状态,都直接关系到电网的安全稳定运行。然而,在众多输变电设施中,由于变压器的强迫停运率始终居高不下,严重影响了电力系统的安全稳定运行,因此引起行业内的重视^[1]。

当油浸式电力变压器内部发生燃弧故障时,变压器油在高温电弧作用下迅速裂解,短时间内产生的大量高压气体向外传播压力波,从而使油箱内部压力骤升,箱体承受的载荷激增,若继电保护装置未能及时动作,将引发油箱箱体破裂,甚至发生爆燃起火事故。国际大电网会议(CIGRE)A2.33 变压器专项研究小组调查结果表明:油浸式电力变压器在内部电弧故障下,有15%的概率引发箱体破裂与爆燃事故^[2]。国内泉城变电站、邻水变电站、重庆变电站相继于2019年、2022年、2024年发生了变压器燃爆事故,造成了严重的经济损失。

继电保护是电力系统安全运行的第一道防线,对维护电力变压器的安全稳定运行具有重要意义。然而,日益复杂的电网形态对变压器继电保护的性提出了更加严格的要求。现有变压器主保护分为过流保护、电流差动保护以及非电量保护。其中,电流差动保护装置经历了机电式、晶体管式、微机式的发展,以其原理简单、判据明确、响应速度快等显著优势,成为变压器内部保护的主力军。然而,电流差动保护在原理方面仍存在缺陷与技术不足,例如,励磁涌流误动引起的可靠性问题^[3],对小匝间短路故障灵敏度不足的问题^[4-5],仍未解决。

针对电气量保护的固有缺陷,业界工作者根据变压器内部电弧故障引发的非电参量特征,开发了响应于游离气体汇集以及变压器油异常涌动的瓦斯继电器,响应于油箱内压力上升的压力释放装置及

速动油压继电器。其中,重瓦斯保护动作所需故障电弧能量较高,且对油流速度变化的响应较慢,保护灵敏性与速动性不足,提升余地较小^[6]。轻瓦斯保护在故障早期的严重缺陷阶段(产气量较大)能够响应,其在国内数起变压器燃爆事故发生前均发出过报警信号,显示出独特的优越性。然而,由于集气速率较低,保护速动性差,且无法进一步辨识气体组分,在非故障集气情况下易发生误动,可靠性不足,目前,大部分轻瓦斯保护仅触发报警信号^[7]。压力作为引起油箱破裂最直接的原因,其信号传播速度较快,与故障的关联性较强,但压力释放装置以及速动油压继电器的动作,对油箱内的压力水平及其上升速度要求较高,且在外部短路冲击引发的压力波动下,易发生误动。综上所述,诸多非电参量均具有其独特优势,但现阶段非电量保护原理单一,可靠性不足等问题突出。因此,进一步挖掘非电参量特性,发挥其独特优势,弥补其性能不足,对于完善变压器保护体系,保证大型电力变压器安全稳定运行具有重要意义。

本文阐述了变压器内部电弧故障引发非电参量变化的物理过程及其内在机理;分类归纳了当前现场实际应用的非电量保护装置及其保护原理;梳理了现阶段,针对变压器内部电弧故障引发非电参量特性开展的实验探究与仿真分析的研究现状,以及新型非电量保护装置的设计与开发;总结了当前非电量保护原理及装置的不足与面临的挑战;最终,对电弧引发的非电参量特性、新型保护原理和保护装置等方面的未来研究方向进行了展望。

1 大型电力变压器非电量保护分类及保护原理

变压器内部的常见故障包括:单相接地短路、相间短路以及匝间短路等。调查分析发现,约55%的

电力变压器故障是由匝间短路所引发。对于单相接地以及相间短路等故障,其引起的差电流较为显著,电流差动保护具有良好的动作性能。对于匝间短路故障,当短路匝数较多时,差电流较为显著,电流差动保护装置一般能够有效判断并快速切除;而当短路匝数较小时,变压器绕组端部电气量的变化极小,电流差动保护装置无法灵敏动作并切除故障^[8]。但此时,故障部位会产生极大的匝间环流,其值甚至可达额定电流的百倍,该环流产生的高能电弧将对变压器绕组造成恶劣损伤,致使匝间短路故障进一步发展,短路匝数进一步扩大,甚至演变为接地短路故障。在这种情况下,利用故障电弧能量转化过程中呈现的非电量特征(如气体产生、油流涌动、压力骤升)所构建的非电量保护具有更高的灵敏度。

目前,应用于大型电力变压器的非电量保护主要包括瓦斯保护、压力保护以及油温高保护,以荆门-南阳-长治 1 000 kV 特高压交流工程主变为例^[9],其非电量保护配置如表 1 所示。

表 1 特高压工程主变非电量保护配置^[9]

Table 1 Configuration of non-electric protection for main power transformer in ultra-high voltage projects^[9]

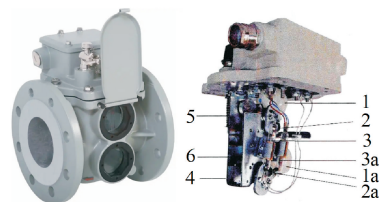
保护类别	动作参量	限值	动作后果
本体重瓦斯	油流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.5	跳闸
本体轻瓦斯	集气体积/mL	200	报警
上层油温过高	油温/ $^{\circ}\text{C}$	95	报警
上层油温高	油温/ $^{\circ}\text{C}$	75	报警
压力释放	压力/kPa	70	报警
冷却器全停	油温/ $^{\circ}\text{C}$	85	报警

1.1 瓦斯保护

针对油浸式电力变压器内部故障导致的产气以及油流涌动现象,德国专家 Max Buchholz 于 1921 年发明了 Buchholz 继电器,即初代瓦斯继电器。该继电器适用于附带油枕的变压器,安装于油枕连接管中间。

经过数十年的发展,目前国内应用的瓦斯继电器主要为国产 QJ 系列开口杯挡板式瓦斯继电器和 EMB 公司的 URF 型及 BF 型双浮球式瓦斯继电器,其内部结构如图 1 所示。根据 GB/T 14285—2023《继电保护和安全自动装置技术规范》规定:应在额定容量为 0.8 MW 以上的变压器与室内额定容量大于 0.4 MW 的变压器上安装瓦斯继电器。

针对变压器内部发生的故障或异常工况,瓦斯继电器以 3 种方式进行响应^[10]。当变压器内部发生轻微产气故障时,如局部放电、局部过热、低能电弧,瓦斯继电器内部液面下降,上浮子下降至既定位



1—上浮子;1a—下浮子;2—上浮子恒磁磁铁;2a—下浮子恒磁磁铁;
3—上开关系统磁开关管;3a—下开关系统磁开关管;4—框架;
5—测试机械;6—挡板。

图 1 BF 型双浮球式瓦斯继电器及其内部结构

Fig. 1 BF type double float Buchholz relay and its internal structure

置,并带动磁开关管触点闭合,发出报警信号。当变压器内部发生严重故障时,如电弧故障、严重过热,故障点处将产生大量高温高压气体,推动油箱内部的绝缘油,通过油枕连接管向油枕涌动,冲击瓦斯继电器内的浮球与挡板,当油枕连接管内的油流速度超过动作门槛值(一般设置为 $0.6 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)时,挡板转动至既定位置,下开关系统磁开关管触点闭合,并发出跳闸信号切除变压器。当变压器因油箱箱壁破损等原因出现绝缘油持续泄露时,变压器内绝缘油液面下降,上、下浮子先后下降,继电器相继发出报警信号与跳闸信号。

瓦斯继电器作为油浸式电力变压器核心非电量保护装置,其性能仍存在诸多缺陷。近年来,重瓦斯误动造成的变压器非计划停运在电网中时有发生^[11-12]。目前,针对传统重瓦斯保护的研究,均聚焦于误动原因分析、动作特性探究以及校准整定方法的优化。文献[13-14]构建了变压器内部电磁场-结构场-流场耦合模型,对外部短路冲击下变压器内部的油流进行了仿真分析,并基于真型变压器平台开展了外部短路冲击实验。研究发现:外部短路引发的热效应以及绕组振动均会引起油箱内部的油流涌动,油枕连接管内的油流速度有可能达到重瓦斯动作阈值,从而发生误动。文献[15-16]基于计算流体力学(CFD)的仿真分析,对重瓦斯的动作特性进行了探究,研究发现,挡板式瓦斯继电器因挡板-弹簧结构的惯性存在动作延迟,需油流速度持续高于阈值才能触发保护,这导致了该断电器对故障响应的迟滞;反向油流冲击下,挡板回位力强,误动概率低,但高速涡流可能引发异常信号。文献[17-18]通过 CFD 仿真与实验探究,对现行瓦斯继电器校验方法以及设备进行了分析,提出了新型的动态校准平台以及阈值的整定方法。

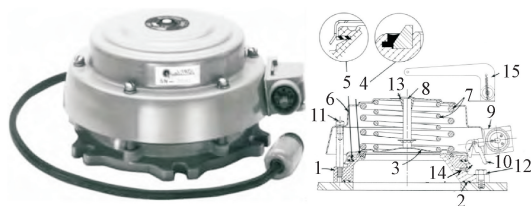
针对轻瓦斯保护,目前的研究主要集中在保护

动作原因的分析,以及保护动作后处理方法的总结。文献[19-20]对故障进行了溯源分析,将轻瓦斯的动作工况归纳为以下几点:①内部轻微故障产气;②内部非故障产气;③外部气体入侵;④励磁涌流、外部短路等导致的变压器振动;⑤继电器二次系统失效;⑥气压温度等环境因素。文献[21-22]对轻瓦斯动作后游离气体的颜色、气味、可燃性与故障类型的关联性进行了统计,结果表明:①检测到无色透明、无刺激性气味且不具备可燃性的气体时,通常表明瓦斯继电器存在外部空气侵入现象;②检测到淡黄色且燃点较高的气体时,可判定为设备内部木质固体绝缘材料在电、热缺陷作用下的分解产物;③检测到刺激性气味的白色或浅灰色气体,且具有可燃性时,可判定为油纸绝缘发生局部放电损伤;④检测到深色焦油味气体,且具有可燃性时,可判定为绝缘油发生裂解反应。

1.2 压力保护

针对油浸式电力变压器内部故障引发的压力骤升现象,GB/T 6451—2023《油浸式电力变压器技术参数和要求》规定:三相变压器和密封式单相变压器均应装有压力保护装置,当变压器油箱内压力达到安全限值时,压力保护装置应可靠地释放压力。国内在运的大型油浸式电力变压器配备的压力保护装置主要为压力释放阀与速动油压继电器。

(1)压力释放阀。压力释放阀多安装于变压器油箱顶盖或侧壁上部,其实物及内部结构如图2所示。



1—安装法兰;2—密封垫;3—膜盘;4—密封垫;5—密封垫;
6—外罩;7—弹簧;8—动作指标杆;9—报警开关;10—手推复位杆;
11—螺栓;12—螺栓;13—衬套;14—放气塞;15—信号杆。

图2 压力释放阀及其内部结构

Fig. 2 Pressure relief valve and its internal structure

当油箱内部产生高能电弧时,引发的瞬间能量在释放过程中使得油箱内压力激增,该压力作用于压力释放阀膜盘上,当压力达到设定阈值时,压力释放阀将克服弹簧弹力冲开膜盘,排出油气混合物,从而释放压力,并同时发送机械报警信号。当压力减小并达到关闭压力阈值后,压力释放阀将自动关闭^[23]。经过数十年的发展,相较于早期的安全气道、防爆膜等压力释放装置,压力释放阀具有误差小、开启速度快(2 ms内开启)、自动复位、可重复使用等优

点。但在实际运行过程中,一方面,由于本身泄放能力的局限(释放口径最大为130 mm),压力释放阀只能保护产生压力上升速率低于 $15 \text{ kPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 的故障;另一方面,在外部短路故障冲击引起的油箱内部压力波动下,压力释放阀存在误动风险。

(2)速动油压继电器。动作于变压器油箱内压力上升速率的速动油压继电器,能够弥补压力释放阀在故障响应方面的缺陷,其内部结构如图3所示。速动油压继电器独立安装于变压器油箱侧面上部,可变气室用于对油箱中的压力变化速率进行检测。在固定气室中,平衡器使其内部压力的变化速率随之增大,膜盒中的膜片在固定气室与可变气室的压力变化速率差产生的压力差作用下发生位移。当油箱中压力变化速率达到设定阈值时,发信开关被膜片推动,保护被启动。当压力变化速率不同时,对应速动油压继电器的动作时间也不同,从而实现在故障早期,压力快速上升阶段,对压力的动态响应与保护^[23]。

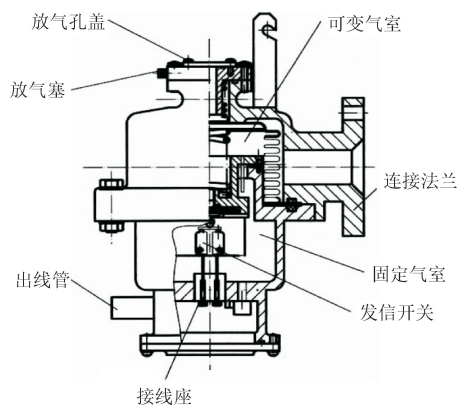


图3 速动油压继电器结构

Fig. 3 Sudden oil pressure relay structure

通过压力释放阀与速动油压继电器的相互配合,可以实现压力较高时的有效释放,压力上升速率较大时的动作跳闸。但受限于机械式装置,阈值整定与校准较为困难,外部短路冲击下的误动问题依然存在。目前,针对压力保护装置的研究较少,且多集中于对装置的动作特性,校验方式的探究,以及误动原因的分析。文献[24]构建了描述油压以及压力释放阀动态特性的数学模型,对压力释放阀的动作特性进行了CFD仿真分析,从而提供了压力释放阀动作过程中流体行为的完整描述。文献[25-26]对压力释放阀以及速动油压继电器的校验方法进行了探讨,并提出了新型的压力保护装置校准方法以及校准装置。文献[27]开展了外部短路冲击实验与压力波动仿真分析,研究发现,外部短路电流产生的电

动力会导致绕组的剧烈振动,从而引发油箱内压力升高,压力释放阀误动作。

1.3 油温高保护

变压器内部温度升高是反映其运行状态和安全传输容量的重要指标。油浸式变压器内部的绝缘材料包括绝缘纸板与绝缘油等,这两者会随温度的升高而加速老化,相关研究表明:温度每升高 6°C ,绝缘油老化速率加快 1 倍,使用寿命减少 $1/2^{[26]}$ 。大型电力变压器非电量保护中配置油温高保护,以保证设备温度不过高,该保护主要包括:顶层油温保护、绕组温度保护、变压器冷却器全停延时跳闸保护。根据 DL/T 572—2021《电力变压器运行规程》规定:

(1) 变压器应配备温度保护装置,当运行温度过高,顶层和绕组温度以并行的方式分级动作于信号。

(2) 对于强油循环风冷(水冷)变压器,当冷却系统全部切除时,允许在额定负载下运行 20 min 以上,若顶层油温未达到 75°C ,则允许温升至 75°C ,但冷却器全停状态下最久运行不得超过 1 h。

目前,对于油温高保护的研究主要集中在两个方面。一方面是对变压器温升计算与热点温度预测方法的研究,主要分为场的方法和路的方法,且大多集中于稳态工况的计算^[29],少部分文献是针对系统的异常工况^[30-32](如直流偏磁、谐波干扰、过载)造成的局部热点温升,但缺少适用于实时动态计算的模型和方法。另一方面,针对变压器的温度测量装置也开展了大量研究。传统的测量方法主要基于热电阻以及红外测温^[33],然而该方法受限于材料以及传感原理,难以准确测得绕组的热点温度。近年来,基于光纤光栅的温度传感器成为研究的热点,其具有精度高、抗干扰、响应快等优点,并且能够直接安装在设备内部,目前已被广泛应用于变压器的温度监测中^[34-35]。

2 油浸式电力变压器内部电弧故障引发的非电参量特性研究

2.1 故障产气特性

当油浸式变压器内部发生局部放电、过热、电弧故障等异常工况时,油纸绝缘在缺陷作用下将会分解产生气体,其相关特征是反映变压器运行状态的重要指标。当缺陷产气量较低时,如轻微局部放电,气体将重新溶解于油中;当产气量较高时,如剧烈放电或电弧击穿,气体溶解达到饱和,部分气体将以游离态的形式上浮、汇集。针对以上两种情况,电力行业从业人员分别开发了油中溶解气体分析(DGA)

与瓦斯继电器来对油浸式变压器进行监测与保护。

(1) 故障气体组分含量分析。油中故障气体的特征可分为组分含量(化学)与动态特性(物理)两个方面。针对故障气体的组分含量分析,国内外研究人员已经开展了大量的研究工作,主要聚焦于油中溶解气体的成分及比例分析。DGA 技术体系的发展过程中先后形成了 3 类标志性诊断方法,分别是特征气体分析法、IEC 三比值法及其衍生的改良方法。

特征气体分析法是通过解析变压器内部不同类型的故障(放电、过热、电弧)与油纸绝缘裂解产生的特征气体组分之间的对应关系,对变压器内部运行状态进行定性分析。DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》中对不同类型故障产生的特征气体总结归纳如表 2 所示。

表 2 不同类型故障产生的主要及次要特征气体
Table 2 Primary and secondary characteristic gases produced by different types of faults

故障类型	主要特征气体	次要特征气体
油过热	$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_4$	$\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_6$
油和纸过热	$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_4, \text{CO}$	$\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_6, \text{CO}_2$
油纸绝缘中局部放电	$\text{H}_2, \text{CH}_4, \text{CO}_2$	$\text{C}_2\text{H}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_2\text{H}_2$
油中火花放电	$\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_2$	
油中电弧	$\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_4$	$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6$
油和纸中电弧	$\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_4, \text{CO}$	$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{CO}_2$

各特征气体的增长速率也一定程度上反映了变压器内部的故障情况,DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》也给出了针对油中溶解气体上升速率注意值的参考值。随着特高压直流输电工程的建成投运,在运的换流变压器设备数量急剧增加,其内部绝缘介质在运行中承受的交直流复合电压对材料性能提出了新的要求,相应的,也将对故障产气特性造成一定影响。国内外学者对此开展了大量的实验研究,对交、直流以及交直流复合电压下的绝缘油产气特性进行了对比分析^[36-38],DGA 技术得到了进一步的优化。

相比基于特征气体的定性分析方法,比值法是如今国内外更为主流的研究方向。应用油中溶解气体组分比值的 DGA 技术,其理论基础源自学者 Halstead^[39]提出的热解动态平衡理论,该理论表明:在油纸绝缘系统的裂解过程中,特征气体生成活化能的差异会导致其生成速率与温度存在动态相关性。随着故障点温度的升高,不同种类的特征气体依次达到最大生成速率,并遵循 $\text{H}_2, \text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_2\text{H}_4, \text{C}_2\text{H}_2$ 的活化能递增规律,且各组分气体的相

对产生速率在既定温度下固定不变。国际电工委员会(IEC)选取 CH_4/H_2 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 作为特征参数进行故障诊断,形成经典的 IEC 三比值法,并纳入 IEC60599 国际标准^[40]。我国研究人员在 IEC 三比值法的基础上,结合国内工程实践经验,对该方法进行了改良与细化,并纳入 DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》中。除此之外,还有大量研究人员在三比值法的基础上进行进一步开发,形成了诸多图示比值法,如 Duval 等^[41]提出的三角法、Mansour 等^[42-43]提出的五角形法等,这些方法对三比值法无法覆盖的故障情况进行了补充。目前,诸多 DGA 方法在最初基础上已经有了长足的发展,但依旧存在诸多问题:识别精度与效率较低,比值边界过于绝对等。

针对油浸式设备内部缺陷及故障产生的游离气体组分,目前相关研究较少。文献[44]开展了电、热类缺陷实验,并对产生的油中溶解气体,以及游离气体的组分进行了分析,研究发现,在局放能量较低时,生成的气体全部溶解于油中;当故障能量较高,故障点温度达到 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 时,矿物油以及酯油将分解产生 H_2 与烃类气体,并且气体产量与放电能量之间呈线性关系。文献[45]开展了针板结构油纸绝缘放电实验,并对收集到的游离气体进行分析,结果表明:在缺陷发展过程中,每秒放电量达到 $0.4\text{ C}\cdot\text{s}^{-1}$ 后开始收集到游离气体,气体成分主要为 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 与 CO 。文献[46]结合游离气体组分分析,对 DGA 三比值法进行了改进,研究结果认为,可通过游离气体组分中 C_2H_4 与 C_2H_6 的含量,区分热类缺陷与电类缺陷,但该研究所开展实验类型有限,未给出具体的监测方案。

综上所述,目前针对油浸式电力变压器内部缺陷,及故障产生的气体组分的特征分析,大多针对油中溶解气体,并从中发展出形式繁多的 DGA 方法,从而在故障类型、油中溶解的特征气体以及各组分比例间建立了对应关系。然而,这些方法的准确性仍有巨大的提升空间,且装置寿命普遍较短。此外,针对缺陷及故障产生的游离气体组分,分析方法及原理方面的相关研究较少,也并未应用于在线监测或继电保护。

(2)游离气体动态特性研究。当油浸式电力设备因内部缺陷及故障产生游离气体时,与油中溶解气体扩散不同,游离气体需经过较长时间的运动,并最终汇聚至瓦斯继电器集气盒中,才可以进行检测与分析。所以,气体的动态特性将直接影响基于游

离气体的状态监测及保护性能。因此,针对游离气体汇集过程中,气液两相流动态行为的研究具有重要意义。

针对液体中气泡的运动行为,已有学者对此展开研究。文献[47]建立了描述气泡在水中运动行为的微分方程,得到了气泡速度与水深解析关系式。而随着数值仿真分析软件的发展,研究人员开始对气泡的动态行为,以及形状变化进行仿真分析。文献[48]根据黏性液体中气泡上升的实验数据,对比分析了最新的 3 种界面跟踪仿真求解器,以及传统流体体积法,仿真结果表明:基于几何重建技术的新型数值界面跟踪方法对于气泡上升和类似问题的仿真结果更准确,计算速度更快。同时,由于试验设计的难度,仿真手段在分析多个气泡的运动形态及其相互作用方面的优势更为显著。文献[49]采用 Level Set 方法对两个水平以及竖直排列的气泡在水中的动态行为进行了仿真模拟,结果表明:竖直排列以及水平排列的不同尺寸气泡在上升过程中会发生聚并;水平排列的同尺寸气泡对则会发生靠近、远离、靠近的循环过程。

聚焦油浸式电力设备内部的气泡动态行为,现有研究主要针对设备内部的典型电场、流场以及温度场与气泡动态行为之间的耦合关系。文献[50]分析了气泡在极不均匀电场下的动态特性,研究结果表明:气泡会在电场作用下发生平行于电场方向的拉伸与加速运动,尤其是 μm 级气泡,当电场强度足够大时,小气泡将成对上升并进一步增强局部电场,从而更易引发局部放电。文献[51-52]对油流作用下气泡的动态行为,及其引发的局部放电特性进行了研究,结果表明:静态油域中,气泡沿电场方向拉伸,并进行频率为 100 Hz 的周期性振动,从而导致电场畸变,局部放电增强;在水平油流作用下,气泡垂直于电场方向拉伸,电场强度降低,但瞬态不规则变形可能导致局部电场的增强;局放强度随流速的增大先快速上升后缓慢下降。文献[53]开展了不同温度下,流动变压器油中悬移气泡的放电实验,结果表明:温度变化将引发油中悬移气泡的总体积、气泡尺寸以及局部场强的变化,从而影响放电特性;随温度的升高,悬移气泡引起的局部放电重复率先迅速下降后逐渐上升,平均放电量则一直下降。

针对液体中游离气体动态特性的研究,主要聚焦于局部气体运动规律或微观小气泡的动力学特性以及流场、电场、温度场等对其的影响机制,而针对油浸式设备内部宏观气体迁移、聚集规律的系统性

研究鲜少见文献。此外,相关特性在保护领域的应用以及对轻瓦斯的影响也未开展深入探索,存在显著空白。

2.2 故障油压特征

当油浸式电力设备内部发生高能电弧故障时,放电通道内的瞬态能量释放过程,将引发油纸绝缘材料发生剧烈裂解,在 ms 级时间尺度内生成多组分混合气体。高温高压气体使得油-气界面上压力梯度急剧增大,并导致油箱内动态压力分布的剧烈变化。当内部压力持续升高,箱体所承受载荷增大,将会发生油箱形变、破裂甚至爆炸。鉴于油浸式电力变压器爆燃事故的严重危害性,作为最直接引发事故的物理量,自 20 世纪 60 年代起,便开始有大量学者对油浸式变压器内部电弧故障引发的压力升高的理化过程、幅值及分布特征以及油箱耐压水平等开展了相关研究。IEEE C57.156—2016 标准^[54]中总结了当时的研究进展,提出了一种油箱内部静压力的计算方法,并广泛应用于油箱结构设计中。然而,该方法仅限于对油箱内静态压力的计算,与实际电弧引发的压力动态波形有较大差异,存在较大的局限性,已不适用于特高压变压器的设计与防护,相关研究仍需进一步展开。

现阶段,针对油浸式电力变压器内部高能电弧引发的压力特征的研究主要通过两种手段:一种是基于模型与真型变压器开展实验,对电弧故障下的压力波形特征进行监测与分析;另一种是基于数值仿真技术的等效建模与分析。

真型变压器内部燃弧实验成本高昂且风险较高,2010 年以前,仅有国外研究人员开展了为数不多的变压器内部燃弧故障实验(共计 62 组实验)。这些实验分别于 2002 年由法国电力公司开展^[55],于 2004 年由巴西电能研究中心和法国 SEGRI 公司联合开展^[56]。虽然实验目的是测试 SEGRI 公司研发的排油注氮压力释放装置的性能,但是实验期间对变压器内部压力的监测数据也极具参考价值。随后,在 2012 至 2017 年期间,日本电力工业中央研究院 Tadokoro 等^[57-58]在充油小型密闭容器中开展了工频电流燃弧实验,以探究密闭容器内电弧引发的压力特征,研究发现:在内部电弧激励下,压力波动上涨,压力的升高及波动特性主要由气泡的体积变化、气泡的动态行为及电弧深度决定。随着实验技术的发展与成熟,我国也具备了开展油中大功率燃弧实验的能力。目前,有研究人员先后以变压器升高座以及有载分接开关油室作为实验平台开展实

验。文献[59]中所开展的实验为目前电弧电流最大(有效值为 63 kA)的油中工频燃弧实验,结果表明:有载分接开关油室的顶部与底部压力均呈现先波动上升后迅速下降的特征。文献[60]中则开展了目前累积电弧能量最大(56 MJ)的油中工频燃弧实验,结果表明,由于电弧持续时间较长,在前期展现出的压力特征与文献[59]中的一致,后期则随着电弧能量的持续注入,压力再次缓慢上涨。

虽然开展油中燃弧实验是研究其引发的压力特征最直接的方法,但实验中一般仅能对实验容器壁上的压力进行测量,而无法对压力在容器中的传播过程进行有效研究。因此,通过数值仿真技术,构建电弧产生压力源的等效模型,仿真分析压力在油箱中的传播分布规律,以及与箱体的作用关系同样是开展研究的重要手段。

目前的仿真方法主要可分为气液两相流模型与声学模型。气液两相流仿真模型是将高能电弧中用以气化分解绝缘油的能量转化为故障点的产气量,并将其作为模拟电弧迅速产气过程的高压注气源,再结合流体力学方程求解压力的时空分布规律。此方法的基础是电弧能量与注气源的转化关系,而目前针对此问题众说纷纭。CIGRE 组织于 2013 年发布的指南中^[2],对过往研究人员进行的电弧产气实验结果进行了统计分析,结果表明:电弧产气量可表示为电弧能量的线性函数,但实验得到的产气速率存在差异。目前,多数研究人员选择 $100 \text{ cm}^3 \cdot \text{kJ}^{-1}$ (标准情况)作为保守假设的产气系数。除此之外,部分研究人员也认为电弧的产气速率会随其持续时间的增加而逐渐减小。文献[56]通过实验数据拟合给出了产气与电弧能量之间的对数关系式。文献[57]也指出电弧产生后的 100 ms 内,产气速率由 $1320 \times 10^3 \text{ cm}^3 \cdot \text{kJ}^{-1}$ 降为 $170 \times 10^3 \text{ cm}^3 \cdot \text{kJ}^{-1}$ (高温常压)。

针对电弧产气仿真模拟的气液两相流模型,最早由 Baer 等^[61]提出,模型包含 2 个连续性方程、2 个动量方程、2 个能量方程以及 1 个界面拓扑方程。而后,Kapila 等^[62]、Murrone 等^[63]先后在此模型基础上进行简化,忽略了气液界面的机械平衡过程,提出了经典的 5 方程模型。后续研究人员如 Roseberg 等^[64]、Muller 等^[65]基于 5 方程模型对变压器内部电弧引发的压力分布变化开展了大量仿真,并与实验结果进行了对比分析,虽然两者得到的压力峰值较为吻合,但波形上存在差异,并且该仿真方法计算量较为庞大。

声学模型是将电弧产生的脉动气泡视为一个压力源,该压力源会发生膨胀-收缩并向外传播压力波。此方法的基础是需要通过电弧能量结合气体状态方程计算气泡内部压力,从而作为边界条件输入到仿真模型中。而后,压力波在变压器油中的传播过程通过瞬态声学波动方程进行描述,当压力波传播至箱壁时,两者通过声固耦合方程相互作用。闫晨光等^[66-67]基于此类模型对 220 kV 变压器内部电弧故障进行了仿真分析,得到了其压力分布变化规律及油箱形变特征。该方法计算量相对较小,但仿真结果的准确性在一定程度上依赖压力源的计算方法。

现阶段开展的油浸式变压器内部电弧引发的压力特征研究,多集中于内部压力分布与峰值的估算,内部高压作用下箱体力学响应特性的分析,以及油箱结构优化方案的提出。然而,对于电弧故障引发的压力参量动态波动的频率特征关注较少,相关研究多见于水下爆炸^[68]以及液电效应^[69]等场景,研究对象尚未聚焦于油浸式电力设备,也并未形成完善的继电保护方案与装置,压力保护装置的开发也多聚焦于压力释放装置泄放能力的提升。

2.3 故障油流特征

油浸式变压器在正常运行过程中,由于绕组发热以及外部油循环的作用,油箱内部本身存在较为显著的油流涌动,具体表现为:热油上浮,并由变压器油箱上部进入外部散热器(自冷式除外),降温后经变压器油箱下部流回油箱。然而,当变压器发生异常工况时,会导致内部流场发生显著改变,主要可分为 3 种情况:一是内部故障电弧裂解油纸绝缘材料引发剧烈产气,导致变压器油的涌动;二是局部热缺陷引发温度升高,导致变压器油受热膨胀;三是短路故障电流引发绕组剧烈振动,对周围的变压器油造成扰动。针对这 3 种典型工况,均有学者开展大量研究。

当变压器内部发生电弧击穿故障时,短时间内的产气量将挤压周围变压器油向外涌动。虽然如前文所述,电弧能量与气体产量之间的转换关系还没有统一的结论,但是通过仿真数据与试验数据在不同测点位置流场变化对比^[70]可以看出仿真结果整体趋势的正确性。电弧故障会在故障位置附近短时间内释放大能量,产生大量故障气体和极高的压力,导致电弧位置附近变压器油的流速迅速升高,并不断向外扩散。由于油枕连接管处距离故障位置一般较远,压力和流速传播需要一定的时间,因此可以观察到明显的延时^[71]。同时,传播过程中的衰减会导致故障位置附近明显的流速波动,而油枕连接

管处的流速则主要呈现缓慢上升的趋势,相应的速度波动并不明显^[72]。

当变压器内部产生过热缺陷时,会导致局部损耗增加、热点温度升高,周围变压器油会发生热膨胀甚至分解产气,油流分布特征发生改变。若在轻微故障情况下考虑热效应的影响,则发生故障后,瓦斯继电器入口处的流速在几秒内达到峰值,之后则略微下降并趋于稳定^[73]。若热点温度较高时,若考虑变压器油受热分解和膨胀产气的情况,则发现随着温度的升高,流速不断增大,当温度足够高时,重瓦斯继电器处的流速可以超过整定动作值^[74]。

当变压器发生短路故障时,流经绕组的电流迅速升高,绕组所受电动力增大,从而使得绕组的振动加剧,绕组振动会进一步推动周围变压器油的运动。与电弧产气和变压器热缺陷导致的油流变化不同,绕组剧烈振动不仅能在变压器内部故障的情况下发生,也可能由变压器外部故障导致。相比于热缺陷对油流的缓慢影响,绕组振动的影响更为迅速、持续时间更短,一般为两个周期左右。对于研究绕组振动导致的油流涌动情况,设置外部故障不仅可以降低热效应和电弧的影响,而且更加安全。因此,对于绕组振动影响的研究多考虑了变压器的外部故障。文献^[75]设置不同外部故障情况,基于试验研究得到了瓦斯继电器流油速度变化规律,研究发现:从故障发生到检测出油流速度变化之间存在明显的延时。文献^[76]则通过在变压器中性点上安装超导故障限流器以降低故障电流,研究发现,对于相同的故障,降低故障电流后油流涌动发生了明显的降低。

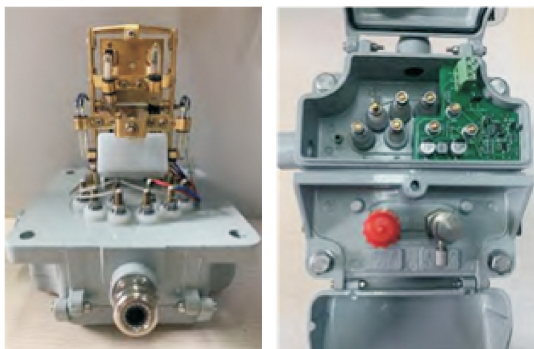
综上所述,现阶段针对变压器故障引发的内部流场变化的研究多集中于过热缺陷下的热流耦合分析与外部短路冲击引发的油流波动及瓦斯继电器误动问题,而针对内部严重电弧故障剧烈产气下的油流变化的研究较少。另外,研究大多通过仿真分析,鲜少开展基于真型油浸式设备的故障模拟实验。

3 新型非电量保护原理与装置

3.1 基于油流特征的新型非电量保护

随着特高压工程的逐步推进,传统瓦斯继电器难以满足特高压变压器安全稳定运行需求,重瓦斯拒动、误动事故时有发生,基于油流特征的新型非电量保护亟待开发。华北电力大学万书亭研究团队^[77-79]针对瓦斯继电器的动作特性进行了深入研究,在传统瓦斯继电器结构基础上进行改造,通过加入了霍尔传感器,开发出可实时监测挡板转角、角速

度的新型瓦斯继电器,实物如图 4 所示。在此基础上,提出了基于挡板角速度以及初始角加速度的新型非电量保护方法,与基于挡板动作时长的故障程度识别方法。



(a)内部结构 (b)霍尔传感信号处理模块

图 4 新型瓦斯继电器^[78]

Fig. 4 New type Buchholz relay^[78]

西安交通大学郝治国研究团队、华北电力大学齐波研究团队联合南瑞集团共同搭建了 110 kV 真型变压器非电参量特性实验平台,该平台如图 5 所示。实验通过空气压缩机注入高压气体的方式模拟了不同程度的电弧故障,并在油枕连接管处安装了外置的超声流量计,用于对其内油流速变化情况的实时监测。在此基础上,提出了基于实时油流速度的新型非电量保护^[71]。同时,华北电力大学齐波团队研制的新型光学流速传感器在试验中展现出优越性能,为保护方案的落地奠定了硬件基础^[72]。



图 5 110 kV 真型变压器非电参量特性实验平台^[71]

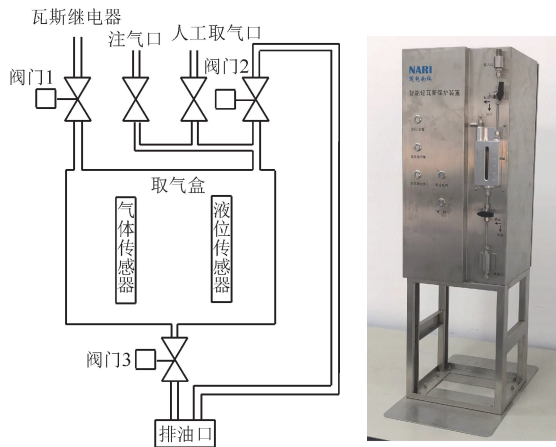
Fig. 5 110 kV prototype transformer non-electrical parameter characteristics experimental platform^[71]

3.2 基于游离气体特征的新型非电量保护

目前,受窝气等因素影响,传统轻瓦斯保护可靠性不足,在现场应用中仅以报警模式工作。我国电网为提升轻瓦斯告警的可靠性,制定了相关规程,在

轻瓦斯动作后,需进行人工取气分析,以进一步确认是否有事故发生,这一举措也带来极大的安全隐患,电力检修人员伤亡偶有发生。而近年来发生的多起变压器燃爆事故中,轻瓦斯由于在事故发生前均发出报警信号,显示出其独特的优越性,国内部分特高压变压器上轻瓦斯保护已改为投跳闸信号。

针对轻瓦斯保护存在的可靠性不足、人工取气安全隐患高等问题,西安交通大学联合南瑞集团对油浸式电力变压器内部典型缺陷下,游离气体的产生规律及组分特性进行了深入研究,设计并研制了新型轻瓦斯保护装置^[80],其结构和实物如图 6 所示。该装置在现有瓦斯继电器的基础上,实现了自动取气、自动分析与处理、远程上报报告以及定检分析等功能,并基于游离气体体积及其组分含量,形成了进一步的精细化轻瓦斯保护判据,大幅提升了轻瓦斯保护的可靠性,并在一定程度上消除了人工取气带来的安全隐患。



(a)结构示意图

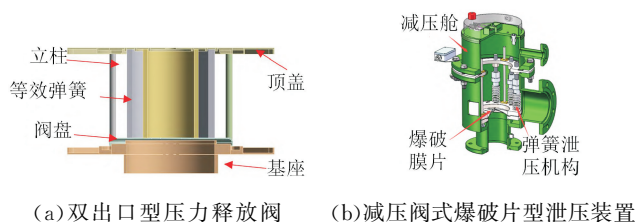
(b)实物图

图 6 新型轻瓦斯保护装置^[80]

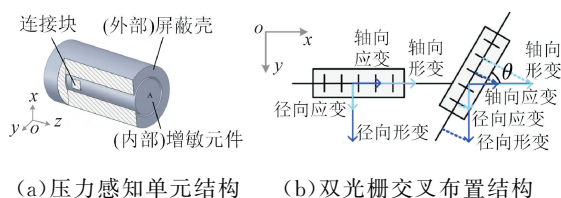
Fig. 6 New type gas protection device^[80]

3.3 基于油压特征的新型非电量保护

鉴于内部压力升高是引发变压器油箱形变、破裂的直接原因,大量学者以变压器防爆为目标开展研究^[81-82],而基于油压特征的新型非电量保护研究鲜见于文献,也无完整装置落地。部分研究人员针对压力释放阀的结构及安装位置的优化开展了研究,文献[83-84]对油浸式变压器内部电弧故障下的压力分布特征展开了仿真分析,研究结果发现,压力释放阀布置位置对其动作时间与释压效果均有影响。文献[85-86]提出了新型压力释放装置,其结构如图 7 所示。相较于传统压力释放阀,两者均表现出更加优良的泄放性能与结构强度。

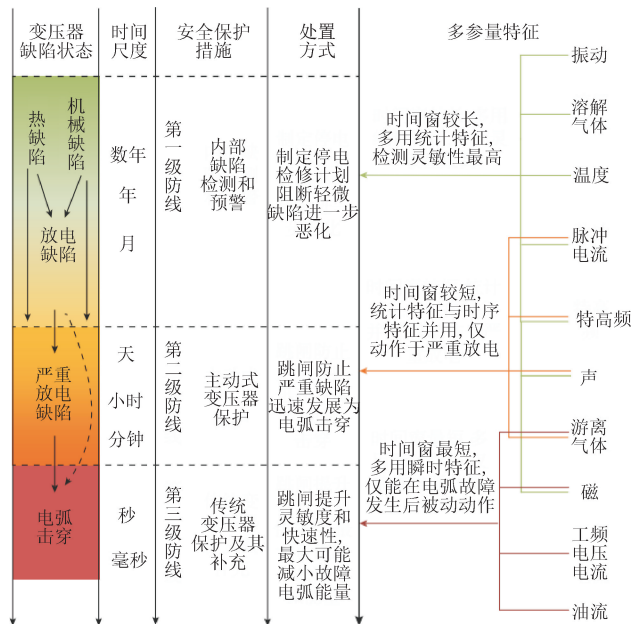
图 7 新型压力释放装置^[85-86]Fig. 7 New type pressure relief device^[85-86]

此外,西安交通大学郝治国研究团队基于内部电弧故障与外部短路冲击下变压器油箱内部瞬态油压的差异性特征,提出了多种新型非电量保护方法^[87-88]。近年来,传感技术的逐渐成熟,也为新型压力保护装置的落地奠定了硬件基础。特变电工股份有限公司开发的智能压力释放阀实现了对于油压的实时监测^[89];华北电力大学齐波团队^[90]开发的新型光学高灵敏度压力传感器,能够适用于各类油浸式电力设备内部压力监测,其结构如图 8 所示。

图 8 新型光学压力传感器^[90]Fig. 8 New type optical pressure sensor^[90]

3.4 基于局放信息的主动保护

随着变压器电压等级与容量的不断攀升,故障电弧功率及累积能量也随之增大。近年来,发生的多起变压器燃爆事故均表明,传统继电保护受断路器开断时间限制,减小电弧累积能量空间较小,难以满足设备安全稳定运行需求。因此,研究人员将视野拓展至电弧故障发生前的缺陷发展阶段,这一阶段引发的多种参量变化同样蕴含丰富信息,且此时变压器的状态并未恶化至不可挽回的程度,有较为充足的时间进行判别并发出对应动作指令。西安交通大学郝治国研究团队联合南瑞集团针对真型变压器开展了大量实验研究,开创性地提出了大型电力变压器安全运行 3 级防线,其架构如图 9 所示。针对故障发生前的严重缺陷阶段,融合电-磁-声-气多参量特征,设立了变压器主动保护防线,旨在严重电弧故障发生前灵敏感知、可靠辨识、主动跳闸,将事故扼杀于未然^[91]。

图 9 大型电力变压器安全运行 3 级防线^[91]Fig. 9 Three-level defense system for safe operation of large power transformers^[91]

4 结论与展望

非电量保护作为电力变压器继电保护体系的重要组成部分,在识别内部电弧故障、过热缺陷等异常状态方面具有电气量保护不可替代的优势。当前广泛应用的非电量保护装置,虽在工程实践中发挥了一定作用,但仍存在原理单一、响应速度慢、易受外部干扰等问题。在特高压、大容量变压器快速发展的背景下,传统非电量保护在灵敏性、速动性和可靠性方面面临严峻挑战。通过对电弧故障引发的非电参量特性的深入研究,已有部分新型保护原理与装置逐步涌现,展现出良好的应用前景。为进一步提升非电量保护性能,保障电力变压器安全稳定运行,未来应在以下方向进一步开展深入研究。

(1)多参量融合与智能诊断:结合人工智能技术,构建基于电-磁-声-气-流多物理参量信息融合互补的故障诊断与保护体系,全面提升保护的灵敏性、可靠性、速动性。

(2)动态特性建模与仿真优化:加强对电弧故障下,变压器内部油流、压力、气体等物理量时空分布规律的多场耦合仿真研究,建立更精确的物理与数学模型,为保护阈值整定与装置设计提供理论支撑。

(3)真型变压器试验平台与试验技术:基于真型电力变压器,搭建缺陷及故障模拟试验平台,开展典型缺陷及故障演化模拟试验,推动新型保护装置的

校验标准化、规范化。

(4)新型传感技术与装置的开发:推动光纤传感、超声测量等先进传感技术在非电量保护中的应用,实现对关键参量的高精度、高可靠性的实时监测。

(5)主动保护与预防性维护:从故障后保护向故障前阻断转变,发展基于严重缺陷特征(如局部放电、产气、振动)的主动保护策略,提升变压器的运行安全性与寿命管理水平。

参考文献:

- [1] 国家能源局,中国电力企业联合会. 2024 年全国电力可靠性年度报告 [EB/OL]. (2025-03-31)[2025-08-20]. <https://prpq.nea.gov.cn/uploads/file1/20250611/68494e033b8b1.pdf>.
- [2] WG A2.33. Guide for transformer fire safety practices [EB/OL]. [2025-09-05]. <https://www.e-cigre.org/publications/detail/537-guide-for-transformer-fire-safety-practices.html#:~:text=WG%20A2.33%20was%20formed%20to%20study%20the%20key,and%20apply%20best%20practices%20of%20transformer%20fire%20safety.>
- [3] TURNER R A, SMITH K S. Transformer inrush currents [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2010, 16(5): 14-19.
- [4] 万达,伍志荣,韩金华,等. 简析大型变压器类设备绕组匝间短路故障录波和油气相色谱特征 [J]. 变压器, 2024, 61(7): 57-66.
WAN Da, WU Zhirong, HAN Jinhua, et al. Analysis of fault waveform recording and oil gas chromatography characteristics of breakdown between turns in large transformer equipment windings [J]. Transformer, 2024, 61(7): 57-66.
- [5] 咸日常,陈蕾,耿凯,等. 接地变压器低压绕组匝间短路故障的电磁特征研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 74-82.
XIAN Richang, CHEN Lei, GENG Kai, et al. Research on electromagnetic characteristics of short circuit faults in low-voltage windings of grounding transformers [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 74-82.
- [6] 吴嘉竣. 500 kV 变电站主变重瓦斯误动作情况及改进措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [7] 张云峰. 变压器瓦斯保护误动原因分析及应对措施 [J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 300-302.
ZHANG Yunfeng. Reason and measure about transform gas protect motion [J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 300-302.
- [8] 王维俭,王祥珩,王赞基. 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [9] 常勇,张海燕,李晶,等. 交流特高压工程充油设备非电气量保护研究及运行经验 [J]. 华中电力, 2009, 22(5): 16-19.
CHANG Yong, ZHANG Haiyan, LI Jing, et al. Research and operation experience on the non-electric quantity protection of the oil-immersed equipment of UHVAC project [J]. Central China Electric Power, 2009, 22(5): 16-19.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. 变压器用气体继电器: JB/T 9647—2014[S]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [11] 杨贤,柯春俊,周丹. 防止 500 kV 壳式变压器重瓦斯保护误动策略研究及应用 [J]. 变压器, 2015, 52(3): 60-65.
YANG Xian, KE Chunjun, ZHOU Dan. Research on prevention strategy and its application for heavy gas protection malfunction of 500 kV shell-type transformers [J]. Transformer, 2015, 52(3): 60-65.
- [12] 李振. 几起变压器重瓦斯保护误动原因分析及预防措施探究 [J]. 东北电力技术, 2019, 40(12): 42-44.
LI Zhen. Analysis and prevention of several mistakes in transformer heavy gas protection measure [J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(12): 42-44.
- [13] 周丹,李正圆,孙文星,等. 外部短路冲击下瓦斯保护动作性能研究 [J]. 高压电器, 2019, 55(1): 120-127.
ZHOU Dan, LI Zhengyuan, SUN Wenxing, et al. Research on the gas protection performance under external short-circuit faults [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 120-127.
- [14] YAN Chenguang, HAO Zhiguo, DANG Yiqi, et al. Oil flow surge test for 110 kV power transformer during external short circuit faults [C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [15] 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.
- [16] 李胜男,韩冬冬,周鑫,等. 基于 CFD 的瓦斯继电器反向油流动作研究 [J]. 能源研究与信息, 2020, 36(4): 222-227.
LI Shengnan, HAN Dongdong, ZHOU Xin, et al. Research on the reverse oil flow action of Buchholz relay by CFD [J]. Energy Research and Information,

- 2020, 36(4): 222-227.
- [17] 兰昊, 张思青, 于凤荣, 等. 基于 CFD 对 BF 型双浮球瓦斯继电器油流整定值的校验 [J]. 中国电力, 2016, 49(S1): 1-5.
- LAN Hao, ZHANG Siqing, YU Fengrong, et al. CFD-based check on the oil flow setting values of BF type double-float Buchholz relay [J]. Electric Power, 2016, 49(S1): 1-5.
- [18] 江丹宇, 吕鹏瑞, 韦教玲, 等. 瞬态油流冲击下气体继电器动作特性试验研究 [J]. 变压器, 2021, 58(2): 57-61.
- JIANG Danyu, LYU Pengrui, WEI Jiaoling, et al. Study on action characteristics of gas relay under transient oil flow shock [J]. Transformer, 2021, 58(2): 57-61.
- [19] 潘志城, 刘秀珍, 欧松松, 等. 换流变压器空载合闸过程中气体继电器误动原因分析和抗振性能研究 [J]. 变压器, 2023, 60(4): 55-60.
- PAN Zhicheng, LIU Xiuzhen, OU Songsong, et al. Cause analysis and anti-vibration performance study of gas relay in process of no-load closing of converter transformer [J]. Transformer, 2023, 60(4): 55-60.
- [20] 钮志峰. 220 kV 变压器轻瓦斯保护动作分析及处理 [J]. 华电技术, 2017, 39(3): 49-50.
- NIU Zhifeng. Analysis and treatment of light gas protection operation in 220 kV transformer [J]. Huadian Technology, 2017, 39(03): 49-50.
- [21] 王亚梦. 变压器轻瓦斯保护动作分析 [J]. 农村电气化, 2019(3): 74.
- WANG Yameng. Analysis of light gas protection operation in transformer [J]. Rural Electrification, 2019 (3): 74.
- [22] 杨宗学. 变压器轻瓦斯保护动作原因及处理方法 [J]. 四川水利, 2015, 36(6): 74-75.
- YANG Zongxue. Causes and treatment methods of light gas protection operation in transformer [J]. Sichuan Water Conservancy, 2015, 36(6): 74-75.
- [23] 施广宇, 王新建. 速动油压继电器和压力释放阀的特性及投调方式 [J]. 变压器, 2008, 45(10): 39-42.
- SHI Guangyu, WANG Xinjian. Characteristics and commission mode of pressure relief device and quick action oil-pressure relay [J]. Transformer, 2008, 45(10): 39-42.
- [24] XUE Qiannan, WANG Hanfeng, LIU Hao, et al. Numerical investigation of transformer pressure relief valve operation characteristics [C]//2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEET). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 266-270.
- [25] 陆雅婷. 变压器压力释放阀校准装置的研制 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.
- [26] 王来善. 大型电力变压器压力释放特性及校准方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [27] YAN Chenguang, WEI Yuzhou, XU Che, et al. Experimental verification and electromagnetic-mechanics-acoustic field coupling analysis of transformer pressure relief valve malfunctions due to external short-circuit faults [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 1-4.
- [28] HARLOW J H. 电力变压器工程 [M]. 保定天威保变电气股份有限公司, 译. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [29] 苏小平, 陈伟根, 胡启元, 等. 基于解析-数值技术的变压器绕组温度分布计算 [J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3164-3170.
- SU Xiaoping, CHEN Weigen, HU Qiyuan, et al. Calculation for transformer winding temperature distribution by numerical analytical technology [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3164-3170.
- [30] TAHERI S, GHOLAMI A, FOFANA I, et al. Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic conditions [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 86: 68-75.
- [31] RAMAMURTHY J R, CHIESA N, HØIDALEN H K, et al. Influence of voltage harmonics on transformer no-load loss measurements and calculation of magnetization curves [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 146: 43-50.
- [32] 张弦亮, 郝建, 刘丛, 等. 变压器绕组热缺陷温度演化规律及其辨识方法 [J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1548-1559.
- ZHANG Xianliang, HAO Jian, LIU Cong, et al. Temperature distribution evolution of transformer windings thermal defect and its identification method [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1548-1559.
- [33] MASSARONI C, CAPONERO M A, D'AMATO R, et al. Fiber Bragg grating measuring system for simultaneous monitoring of temperature and humidity in mechanical ventilation [J]. Sensors, 2017, 17(4): 749.
- [34] 王恩, 赵振刚, 曹敏, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的油浸式变压器多点温度监测 [J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1543-1549.
- WANG En, ZHAO Zhengang, CAO Min, et al. Multi point temperature monitoring of oil immersed transformer based on fiber Bragg grating [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1543-1549.
- [35] LU Ping, BURIC M P, BYERLY K, et al. Real-time

- monitoring of temperature rises of energized transformer cores with distributed optical fiber sensors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1588-1598.
- [36] ZHOU Y X, SHA Y C, JIANG X X, et al. Gas generation characteristics of transformer oil under combined AC-DC voltages in the process of arcing [C]//2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 718-721.
- [37] BAO Lianwei, LI Jian, LEI Xiao, et al. Gas generation properties of oil-paper insulation under pulsating voltage [C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 172-175.
- [38] 张书琦, 苑清, 齐波, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘气隙放电模型油中溶解气体诊断 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 50-56.
ZHANG Shuqi, YUAN Qing, QI Bo, et al. Diagnosis of DGA for air-gap discharge model in oil paper insulation under AC-DC composite voltage [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(3): 50-56.
- [39] HALSTEAD W. A thermodynamic assessment of the formation of gaseous hydrocarbons in faulty transformers [J]. Journal of the Institute of Petroleum, 1973, 59(569): 239-241.
- [40] IEC. Mineral oil-filled electrical equipment in service-Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis: IEC 60599-2015 [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2015.
- [41] DUVAL M, DUKARM J. Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(4): 21-27.
- [42] MANSOUR D E A. A new graphical technique for the interpretation of dissolved gas analysis in power transformers [C]//2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 195-198.
- [43] MANSOUR D E A. Development of a new graphical technique for dissolved gas analysis in power transformers based on the five combustible gases [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2507-2512.
- [44] BORSI H, DURNKE K, GOCKENBACH E. Relation between faults and generated gases in transformer liquids [C]//Proceedings of 1999 IEEE 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 487-490.
- [45] ZHENG Yuping, LI Xuefei, WU Chonghao, et al. Corona discharge characteristics and free gas generation law in insulating oil [C]//2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 230-234.
- [46] ZHOU Xiu, TIAN Tian, LIU Ningbo, et al. Fault diagnosis method of oil-immersed transformer based on the production pattern of free gas and dissolved gas in oil [C]//2022 Asia Power and Electrical Technology Conference (APET). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 263-268.
- [47] 刘胜, 杨成渝, 王平义. 水中气泡运动规律的研究 [J]. 重庆交通学院学报, 2007, 26(3): 136-139.
LIU Sheng, YANG Chengyu, WANG Pingyi. Study on the law of bubble movement in water [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2007, 26(3): 136-139.
- [48] JOISHI M, GUPTA A. Numerical validation of bubble rising in a viscous liquid using advanced interface tracking methods [C]//Fluid Mechanics and Fluid Power (Vol. 2). Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 491-496.
- [49] 赵知辛, 王焕然, 李彦鹏, 等. 用 Level Set 方法对水下两个气泡运动的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 11-15.
ZHAO Zhixin, WANG Huanran, LI Yanpeng, et al. Numerical simulation on motion of two underwater bubbles using level set method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 11-15.
- [50] 刘秋实, 李庆民, LADISLAS N E, 等. 极不均匀电场下绝缘油中气泡动力学特性与迁移机制 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3460-3469.
LIU Qiushi, LI Qingmin, LADISLAS N E, et al. Bubble dynamics and migration mechanism in insulation oil under extremely inhomogeneous electric field [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3460-3469.
- [51] TANG Ju, ZHANG Yongze, PAN Cheng, et al. Impact of oil velocity on partial discharge characteristics induced by bubbles in transformer oil [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1605-1613.
- [52] 张永泽, 唐炬, 潘成, 等. 流动变压器油中气泡动力学行为及电场分布仿真 [J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2004-2012.
ZHANG Yongze, TANG Ju, PAN Cheng, et al. Simulation of the bubble dynamics and electric field distribution

- bution in flowing transformer oil [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2004-2012.
- [53] 张永泽,唐炬,潘成,等. 温度对流动变压器油中悬移气泡局部放电特性的影响与作用机制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1357-1367.
- ZHANG Yongze, TANG Ju, PAN Cheng, et al. Effects of temperature on partial discharge characteristics induced by suspended bubbles in flowing transformer oil and the mechanism [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1357-1367.
- [54] IEEE. IEEE guide for tank rupture mitigation of liquid-immersed power transformers and reactors: C57. 156-2016 [S]. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2016: 1-26.
- [55] PERIGAUD G, BRESSY G, MULLER S, et al. Numerical investigations to prevent transformer tank explosion [C]//TechCon 2008. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2008.
- [56] MULLER S, BRADY R, DE BRESSY G, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 1 experimental tests on large transformers [C]//ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. New York, NY, USA; ASME, 2008: 357-365.
- [57] 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.
- [58] TADOKORO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Pressure rises due to arc under insulating oil in closed vessel: pressure fluctuation of depth direction in oil [J]. Electrical Engineering in Japan, 2018, 202(2): 43-53.
- [59] 李金忠,汪可,任家帆,等. 分接开关油室电弧故障压力传播过程研究 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7651-7658.
- LI Jinzhong, WANG Ke, REN Jiafan, et al. Study on pressure propagation process of arc fault in OLTC oil chamber [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7651-7658.
- [60] 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.
- [61] BAER M R, NUNZIATO J W. A two-phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition (DDT) in reactive granular materials [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1986, 12(6): 861-889.
- [62] KAPILA A K, MENIKOFF R, BDZIL J B, et al. Two-phase modeling of deflagration-to-detonation transition in granular materials: reduced equations [J]. Physics of Fluids, 2001, 13(10): 3002-3024.
- [63] MURRONE A, GUILLARD H. A five equation reduced model for compressible two phase flow problems [J]. Journal of Computational Physics, 2005, 202(2): 664-698.
- [64] ROSEBERG T, JANKOVIC I, HEDDING R. Transformer tank rupture: a protection engineer's challenge [C]//2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2017: 1-29.
- [65] MULLER S, BOIARCIUC M P, PERIGAUD G. Protection of oil-filled transformer against explosion: numerical simulations on a 200 MVA transformer [C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009: 1-8.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 张阿漫,汪玉,闻雪友,等. 水下爆炸气泡动态特性研究综述 [J]. 船舶力学, 2009, 13(5): 828-840.
- ZHANG A'man, WANG Yu, WEN Xueyou, et al. Review of the dynamics of the underwater explosion bubble [J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(5): 828-840.
- [69] 李元,孙滢,刘毅,等. 液电效应及电火花震源的研究现状与展望 [J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 753-765.
- LI Yuan, SUN Ying, LIU Yi, et al. Electrohydraulic effect and sparker source: current situation and prospects [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 753-765.
- [70] ZHANG Shuai, ZHAO Linjie, ZHANG Wei, et al. Simulation analysis of oil velocity features under internal arc discharge conditions in transformer [C]//2024

- 4th International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2024; 508-511.
- [71] LI Boyu, HAO Zhiguo, LI Simeng, et al. Response characteristics of the Buchholz relay and novel non-electric-parameter protection methods [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 4103-4113.
- [72] 滕皓楠. 变压器内部电弧放电情况下油流速场分布特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2023.
- [73] 张傲宇. 考虑瓦斯继电器的大型变压器多物理场耦合分析计算[D]. 保定: 华北电力大学, 2024.
- [74] 杨海晶, 晏东日, 石光, 等. 油浸式变压器油流速与温度场关联性建模 [J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 140-144.
- YANG Haijing, YAN Dongri, SHI Guang, et al. Correlation modeling of oil flow rate and temperature field in oil-immersed transformer [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 140-144.
- [75] TIAN Bing, FAN Xiaopeng, XU Zhenheng, et al. Oil flow velocity variations in transformer cooling systems under variable loads and inter-turn short-circuit conditions [C]//2023 International Conference on Power System Technology. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2023; 1-4.
- [76] YAN Chenguang, LIU Hao, XU Che, et al. Suppression of transformer oil surges caused by external short-circuit faults using an SFCL [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(8): 1-5.
- [77] 万书亭, 张泽翰, 李少鹏, 等. 基于新型瓦斯继电器挡板旋转角速度的重瓦斯报警新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 152-159.
- WAN Shuting, ZHANG Zehan, LI Shaopeng, et al. A new method for a heavy gas alarm based on rotational angular velocity of the baffle of a new gas relay [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 152-159.
- [78] 万书亭, 张泽翰, 吕鹏瑞, 等. 基于瓦斯继电器挡板动作时长特性的变压器重瓦斯故障程度识别方法 [J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1965-1972.
- WAN Shuting, ZHANG Zehan, LÜ Pengrui, et al. Recognition for transformer heavy gas fault degree based on gas relay baffle operating time characteristic [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1965-1972.
- [79] 万书亭, 韦教玲, 吕鹏瑞, 等. 基于瓦斯继电器挡板旋转初始角加速度的油浸式变压器非电量保护方法 [J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2498-2505.
- WAN Shuting, WEI Jiaoling, LÜ Pengrui, et al. Non-electric protection method for oil-immersed transformer based on initial angular acceleration of baffle rotation of gas relay [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2498-2505.
- [80] 郑玉平, 彭凯, 李雪飞, 等. 基于游离气体特征的新型轻瓦斯保护技术 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 165-172.
- ZHENG Yuping, PENG Kai, LI Xuefei, et al. Novel Buchholz protection technology based on characteristics of free gas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 165-172.
- [81] 周远翔, 李宇航, 赵义焜, 等. 变压器电弧故障防爆燃技术现状与发展趋势 [J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4273-4296.
- ZHOU Yuanxiang, LI Yuhang, ZHAO Yikun, et al. State and prospects of explosion-combustion prevention technology for transformer arc faults [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4273-4296.
- [82] 贾云飞, 汲胜昌, 李金忠, 等. 变压器油中工频电弧特性及变压器防爆研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2910-2926.
- JIA Yunfei, JI Shengchang, LI Jinzhong, et al. Overview on the characteristics of power frequency arc in transformer oil and transformer explosion protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2910-2926.
- [83] CHEN Suwen, GUO Zechen, DU Gan, et al. A balanced design concept of anti-explosion and design scheme of pressure relief device of UHV transformer [C]//2021 3rd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2021; 95-99.
- [84] 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.
- [85] 卢理成, 董弘川. 特高压变压器油箱防爆措施及改进研究 [J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1): 64-70.
- LU Licheng, DONG Hongchuan. Study on explosion proof measures and improvements for the UHV transformer tank [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 64-70.
- [86] 罗亮, 邱勇令, 李金忠, 等. 油浸式变压器新型压力释放阀动力学分析 [J]. 变压器, 2022, 59(9): 20-29.
- LUO Liang, QIU Yongling, LI Jinzhong, et al. Dynamic analysis of a new pressure relief valve for oil-immersed transformer [J]. Transformer, 2022, 59(9): 20-29.

- [87] 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.
- [88] 西安交通大学. 基于压力变化趋势的油浸式变压器数字式非电量保护方法: CN201910151881. X[P]. 2020-01-21.
- [89] 刘灿东, 李峰, 谢璐佳, 等. 基于压力温度特征智能感知技术的变压器智能压力释放阀研究 [J]. 变压器, 2023, 60(3): 12-15.
LIU Candong, LI Feng, XIE Lujia, et al. Research on intelligent pressure relief valve of transformer based on intelligent sensing technology of pressure and temperature characteristics [J]. Transformer, 2023, 60(3): 12-15.
- [90] 冀茂, 黄猛, 郑玉平, 等. 一种适应变压器内部环境的高灵敏光学压力感知方法 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3826-3835.
JI Mao, HUANG Meng, ZHENG Yuping, et al. High sensitive pressure optical sensing method adapted to transformer internal environment [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3826-3835.
- [91] 郑玉平, 郝治国, 薛众鑫, 等. 大型电力变压器安全运行与主动保护技术探索 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 1-12.
ZHENG Yuping, HAO Zhiguo, XUE Zhongxin, et al. Exploration of safe operation and active protection technology for large-capacity power transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 1-12.

(编辑 刘懿莹)

团队介绍:

西安交通大学电力系统保护控制团队致力于新型电力系统保护与控制研究,在电力主设备保护、交直流电网保护、电力系统安全稳定分析和控制等领域进行了大量的理论研究和探索。团队成员包括教授 2 人,副教授 2 人,助理教授 2 人,硕、博士研究生 40 余人。团队负责人郝治国,西安交通大学教授,博士生导师,电气学院副院长。现任 IEEE PES 电力系统保护控制技术委员会(中国)副秘书长,中国电机工程学会国际合作委员会、继电保护专委会委员,中国量度继电器和保护设备标准化委员会委员,中国能源研究会新型电力系统保护和控制专业委员会委员。团队代表性研究成果包括:提出了阻断故障发展的变压器主动保护技术,已逐步应用于保护装置设计与工程实践;面向新能源直流汇集送出需求,提出了基于电压反行波特征的单端超高速保护方法,助力实现新能源基地高效可靠送出;创新性提出基于功率-频率多项式拟合的频率安全评估方法,实现了暂态频率最大偏差的实时评估,开发了不依赖模型、基于最优轨迹追踪的新能源暂态频率支撑控制技术,显著降低了严重扰动下的系统最大频率偏差。相关研究成果获省部级科技进步一等奖 6 项、二等奖 2 项。



团队负责人:郝治国教授



团队合影