

基于传感器融合技术的高压开关柜智能运检方案

韩博文^{1,2}, 顾博川^{1,2}, 陈小军^{1,2}, 余膺昊², 宋旭东^{1,2}

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广东 广州 510170)

摘要: 目前开关柜封装为一个整体, 柜内的机械、热力以及局部放电等均难以排查, 给运维检修带来一定挑战。为此提出了基于传感器融合技术的高压开关柜智能运检方案。首先分析了开关柜的特点以及主要检测物理量的特性。然后分析了开关柜传感器监测需求, 提出利用远红外温度传感器、开关操作传感器以及局部放电监测传感器对开关柜的运行进行监测。最后说明了机器学习与人工智能的发展对开关柜运维的影响。

关键词: 高压开关柜; 智能运检; 传感器; 人工智能与机器学习

Smart operation maintenance of high voltage switchgear based on sensor fusion technology

HAN Bowen^{1,2}, GU Bochuan^{1,2}, CHEN Xiaojun^{1,2}, YU Yinghao², SONG Xudong^{1,2}

(1. Electric Power Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510170, China)

Abstract: At present, the switchgear is packaged as a whole, and the mechanical, thermal and partial discharges in the cabinet are difficult to check, which brings certain challenges to its maintenance. To this end, an intelligent operation maintenance for high-voltage switchgear based on sensor fusion technology is proposed. First, the characteristics of the switchgear and the characteristics of the main detection physical quantities are analyzed. Then the monitoring needs of the switch cabinet sensors are explained, and the use of far infrared temperature sensors, switch operation sensors and partial discharge monitoring sensors to monitor the operation of the switch cabinet is discussed. Finally, the impact of the development of machine learning and artificial intelligence on the operation and maintenance of switchgear is explained.

Key words: high voltage switchgear; smart operation maintenance; sensor; artificial intelligence and machine learning

0 引言

目前针对传感器在开关柜的应用研究尚未成熟, 大部分开关柜仍然是传统的配置。文献[1]研究了基于TEV传感器与TOA算法的高压开

关柜局部放电定位方法。文献[2]研究了高压开关柜触头温度场的数值仿真。文献[3]提出了一种基于红外传感器的高压开关柜温度实时监测系统。文献[4]研究了基于灰色理论的高压开关柜温度检测与预警。文献[5]针对基于内嵌式传感器的高压开关柜绝缘状态监测与故障诊断进

广东电网公司科技项目 (GDKJXM20190062)

行了方案设计。而目前针对多传感器融合的高压开关柜智能运检研究还较少。

为此，本文首先分析了高压开关柜的运行特点，说明了被动运维、预防性运维和预见性运维的特点。然后针对高压开关柜设备运行监测的需求进行了分析，提出了利用温度远红外传感器、开关类设备动作监测传感器和局部放电监测传感器等对开关柜的运维进行监测。最后说明了机器学习与人工智能的发展对开关柜运维的影响。

1 高压开关柜设备运行特点

1.1 开关柜设备概述

开关柜具有保护和控制作用，开关柜中的断路器可以开断短路电流，预防事故的进一步扩大；负荷开关、接地开关以及隔离开关均可以在一定程度上切断电容性的电流、负荷电流等。由于开关柜是由多种元器件共同组成的封闭整体，相关参数包括开关柜共用参数、断路器参数、接地开关参数、电流互感器参数、电压互感器参数、零序电流互感器参数、避雷器参数和母线参数等，如下图所示。开关柜的运维也主要重点关注这些参数，通过这些参数反映开关柜的运行状况。

1.2 开关柜运维方式

目前，电力系统的发展趋势越来越清洁化，体现在发电侧也就是发电越来越多地被清洁、可再生能源发电替代。因此，去中心化的发展趋势逐渐加强。在用户侧，电能的需求逐渐增强，这主要是由于移动特性的电能与电力的其他环节以及其他应用联系紧密。这些所有的发展趋势，对于配电系统来说是一个巨大的挑战。为提升电网运行的稳定性，电网运行商必须提升监控策略、布置通信设备来加强设备运行的灵活性和可靠性。由于配电过程中，对于开关的操作具有较强的随机性以及不规律性，电网的主要设备，包括开关柜以及断路器等都不能够在固定的时间进

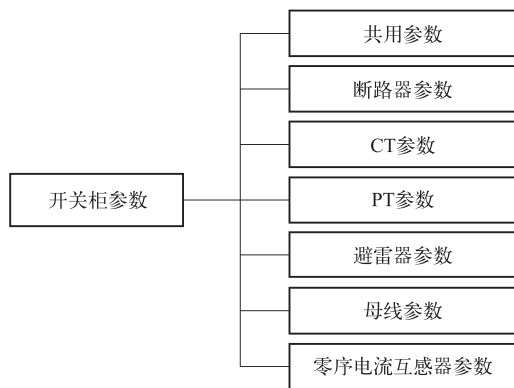


图 开关柜参数

Fig. Parameters of switchgear

行检修。通常，对于这类设备有三种主要的运维形式：被动、预防性和预见性维护。

1) 被动运维主要是指当故障或者缺陷发生后，采取行动进行维护，在这种情况下，如果发生严重的事故，将会给运维带来一定的经济负担，并且会导致严重的后果。

2) 预防性维护主要基于统计数据、运行时间或是上次维护时间进行周期性的维护，这种维护不考虑设备运行的现状和工况。

3) 预见性维护通常与监控设备结合起来，具有较强的效率和可靠性，通过对可能有故障风险的元件进行维护，以达到整体运行良好的状态。预见性维护的安排基于设备监控系统的状态，一旦系统中发生运行状况的改变，就可能触发预见性维护。这种维护类型能够最大限度地利用设备的生命周期。预见性维护主要包括成本、工程量和环境有效性等，对于电网运行来说，是一种较为理想的运维状态。与预防性维护不同的是，预见性维护需要智能算法来确定高效和无风险的运维计划。一般来说，主要是基于仿真、人工智能和机器学习等。事实上，预见性维护目前是AI在工业主要应用的场景之一。

在开关柜中，通过运用预见性维护可以解决主要的问题。第一个问题就是确定合适的传感器，实现对关键物理量的可靠、鲁棒的量测，传感器必须能够满足一定的环境运行条件，尤其是在极端运行条件过程中；另一个问题就是量测数据的缺失。对于温度传感器，不

可能连续地对开关柜进行全寿命周期的量测。对于断路器的动作监控来说，断路器的开关操作也仅仅在有限的次数内完成。因此，量测数据的有效性以及周期性是需要解决的问题。对于优化开关柜的运行来说，预见性的维护是电网运行商需要的，但同时必须依靠可靠的数据。对于数据的获取，远程终端单元以及传感器技术是十分必要的。例如通过远红外温度传感器可以为设备故障检测提供低成本的数据。对于数据分析，利用大数据和人工智能手段能够简化分析流程，提升决策水平，构建数据集。当利用人工智能技术与新型传感器技术进行融合时，就可以为开关柜的稳定运行提供有力支撑。

2 高压开关柜设备运行监测需求

2.1 断路器开关设备监测

断路器是开关柜中重要的设备之一，也是最容易发生故障的设备之一。断路器发生的故障类型主要是指开合过程中的接触问题。目前常见的量测方法就是评估断路器开合操作过程中的接触行程时间，以判断断路器的健康状况。另外一种方式就是判断断路器在开合操作过程中，某一个具体位置的振动信号值。通过与正常状态下断路器的数据相比较可以识别机械故障。在故障识别过程中，需要利用信号处理手段，包括傅里叶变换以及小波分析等。

2.2 热工数据监测

电流通过导体在时间上的累积会产生热能，系焦耳效应。根据焦耳定律，功率与电流的二次方成正比。由于很多的故障类型都会增加接触电阻的接触值，因此可以通过判断热工数据来确定是否出现相应的缺陷。另外，电流的增加也会使设备发热更加严重，严重情况下能够影响设备的使用寿命周期。在开关柜中，一些电气元件的连接是通过螺栓、金属焊接等完成的。这些连接由于环境的振动可能会产生松动，从而影响导体的电阻，尤其是在检修之

后螺栓的扭矩发生改变。

2.3 局部放电监测

根据IEC 60270标准，局部放电现象是绝缘介质在高压作用下的部分击穿，通常发生于具有电位差的两导体之间的间隙，局部放电现象分为内部放电和外部放电两种^[6]。

这些放电的特点都是局部电压作用于绝缘之上，绝缘介质难以承受导致的击穿现象。虽然绝缘介质的击穿与局部放电现象的联系尚未完全清晰，但是击穿通常发生于局部放电现象之后。一般来说，局部放电现象的幅值较小，但通过时间的累积，能够对绝缘产生严重的损害。电气绝缘在高场强下会由于机械、热力和电压等条件发生恶化。因此，局部放电是绝缘击穿和绝缘损害的重要表征性指标^[7]。对于局部放电的强度和类型进行充分利用，可以评估绝缘的瞬时状态。另外，通过感知局部放电的活动强度可以预测绝缘在长时间范围内的退化程度。

已有的研究表明了局部放电与电能质量之间存在一定关联。交流系统中的电压低次谐波和闪变将会导致开关元件发生暂态过程，甚至谐波畸变。这种现象在开关柜中也时有发生。

3 基于传感器的开关柜运维

开关柜运维的主要目的是避免系统性故障、减少运行成本及提升设备使用寿命等。状态估计以及系统检测的关键是相关物理量传感器信息的捕捉。对于开关柜，主要包括热工状态传感器、机械开关设备传感器以及局部放电传感器等。

3.1 远红外温度传感器

热工数据对于高压开关柜来说是重要的考虑因素之一，因此对于热工状态的连续监控和状态评估是开关柜运行状态重要的环节之一。通过声波传感器、FRID传感器和无线传感器等均可以监测热工数据^[8]。对于无接触的方法，例如远红外温度成像传感技术，也逐渐应用于电气设备的温度监控中。

对于这类非直接接触测量系统，不与设备的绝缘介质进行接触和干扰，从一定程度上避免了电磁场的影响。对于监测和控制均有较强的可操作性。另外远红外热成像技术覆盖的区域较为广泛，能够减少传感器布置及安装数量。

通常，远红外热成像技术有三种主要的测量手段：热辐射、热电和热释电^[9]。

热释电传感器利用热释电效应，热释电效应能够改变热释电晶体中极化的位置。热释电对于有远红外引起的温度变化具有较高的灵敏度。

热释电传感器对于周围环境温度的依赖性较高。热辐射测量方式主要利用电阻与温度之间的关系。周围的辐射加热表面薄膜，因此改变电阻值。环境温度的改变对于这类测量方式具有较强的抵消作用，如果补偿量不恰当的，则远红外辐射引起的实际测量信号将会明显低于周围环境温度引起的改变值。

热电传感器通过检测到的远红外辐射产生与之相匹配的输出电压。当热辐射改变了表面薄膜温度时，热电偶器件的冷连接能够确保高温梯度。这类热电偶器件的温度漂移现象较少，对于长期监控和测量是十分有利的。所有这类传感器均可以以单个传感器或者是传感器阵列的形式远红外图像。

3.2 开关设备监测传感器

在断路器或者隔离开关出厂前都要进行行程曲线、速度、扭力、接触点压力、回弹及振动等触点的测试，通常称为耐力测试。因此，对于开关类设备监测，这些物理量是十分有必要的。

移动触点的位置以及行程曲线一般由线性电压传感器直接测量。通过行程曲线可以计算得到开关关合的速度。通过安装在主轴上的旋转传感器可以得到行程曲线，也能够一定程度上估计开关关合的速度。从行程曲线中可以得到断路器驱动的主要特性。另外，加速度传感器可以量测得到断路器的振动。利用有关的信号处理算法，振动信号可以用来检测断路器

驱动的机械形变等。从行程曲线中可以得到断路器驱动的主要特性。在以上过程中，传感器都应满足断路器驱动的主要特性要求。

3.3 局部放电监测传感器

如前所述，局部放电的测量是了解高压设备的绝缘健康状况的重要技术手段之一。对于局部放电监测的方法，有多种文献已经进行了描述。电容法、电感法、UHF法、声音和光学手段都可以用来监测局部放电现象，或者用来监测关键电压和时间节点发生的放电引起的短期冲击。不同的测量方式能够对放电的类型、幅度以及源头进行识别。局部放电会引起设备缺陷，设备缺陷的原始位置对于高压设备来说十分重要，这影响了设备的后期运维和检修。

电磁和电容耦合测量系统也被广泛应用于局部放电的监测过程中^[11]。通过标准电容和电感耦合的方式，能够获取高电位端的局部放电信息，再通过传感器的信号处理技术，用于计算局部放电的活跃程度。

4 机器学习和人工智能对开关柜运维的影响

4.1 机器学习与开关柜运维

人工智能是继“工业4.0”之后的重要发展之一。人工智能能够从自动化生产到优化供应链条管理等方面全方位提升工业系统水平，另外人工智能还能够通过相应的软件技术，提升工业系统的自动化管理水平。传感器能够有效地监测开关柜的运行状况，同时能够有效地预测系统的健康状况。对于预见性维护，开关柜主要涉及到时序数据，由一个或者多个传感器收集到与时间相关的数据内容。在机器学习方面，训练的数据可以使用被动数据或者预防性数据。被动数据是真实发生过故障的数据内容，有助于机器学习判断故障的具体类型。因此如果数据来源于预防性检修，机器学习的效果将会有所下降。

机器学习的主要目的是通过学习算法来模拟实际的过程。在这一过程中，由于传感器所提供的数据在数据程度上有所差异，而机器学习算法中需要长度固定的向量，因此就会给机器学习带来一定的困难。另外，随着深度学习和神经网络的发展，不同类型的机器学习方法会对数据的处理进行更新，能够在不同的条件下开展机器学习。

通过对开关柜的运行状态进行预测，可以确定故障检修的时间，优化系统运行方案。通过对历史数据的状态进行分析，可以得到平均剩余使用寿命，并对剩余使用寿命进行判断。另外，还可以通过开关柜的健康指数进行判断，开关柜的健康指数表征了系统退化程度。通过人工神经网络能够得到时序的数据，还可以通过其他直接的方式对剩余使用寿命进行判断。其中的一个方法，就是将每个事件划分为固定尺度的不重叠的时窗。并对支持向量机进行训练，因此，可以利用支持向量机进行判断。该结果的返回值是给定故障情况下的所有预测窗口的平均剩余使用寿命。

4.2 人工智能与开关柜运维

目前电力系统已经逐渐开始应用人工智能方案。已经有多种人工智能的远红外热成像技术应用于电气设备监控中。但主要的一些设备需要较高的成本，难以推广到分布广泛的开关柜中。利用人工智能进行局部放电的监测也已经进行了相关的研究。K均值聚类、ZigBee^[12]和支持向量机等均有所发展。还有最近新发展的提升算法可以根据时间参数来优化断路器的运维。根据开关柜内部断路器的操作运行数量、接触电阻和气体温度等可以构建模糊专家系统，利用无监督学习算法来构建数据集，以此来判断断路器发生故障的可能性。

开关柜是电力系统中重要的设备之一，在电力系统运行过程中需要长期使用，因此需要对开关柜进行长期的智能化运维评估，这一理念贯穿在设备全寿命周期管理过程当中。设备

全寿命周期管理，就是对于设备初始设计到运行、服务以及最终报废的闭环全流程管控的手段。设备全寿命周期管理是集合了人、数据、系统和设备的全景信息融合，能够为企业以及社会生产带来效益。随着人工智能技术的发展，越来越多的以大数据、云计算等技术为代表的信息通信手段应用到传统电力系统当中，有助于开关柜不断提升运行维护方案，从全生命周期角度去提升设备的使用寿命。

5 结束语

本文研究了基于传感器融合技术的高压开关柜智能运检方案。首先分析了高压开关柜的运行特点，说明了被动运维、预防性运维和预见性运维的特点。然后针对高压开关柜设备运行监测的需求进行了分析，提出了利用温度远红外传感器、开关类设备动作监测传感器和局部放电监测传感器等对开关柜的运维进行监测。最后说明了机器学习与人工智能的发展对开关柜运维的影响。通过本文的研究，能够给高压开关柜智能运检提供相应的思路。

参考文献

- [1] 麦茜坚, 钟悦, 唐明, 等. 基于TEV传感器与TOA算法的高压开关柜局部放电定位方法的研究[J]. 电气技术, 2015(6): 16-21.
- [2] 周岩, 高杨, 刘婷婷, 等. 高压开关柜触头温度场的数值仿真分析[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(12): 102-105.
- [3] 张艳, 田竞, 叶逢春, 等. 基于红外传感器的高压开关柜温度实时监测网络的研制[J]. 高压电器, 2005(2): 13-16.
- [4] 张海彬. 基于灰色理论的高压开关柜温度检测与预警[J]. 黑龙江电力, 2017, 39(3): 249-251.
- [5] 赖斌. 基于内嵌式传感器的高压开关柜绝缘状态监测与故障诊断方案设计[C]. 福建省电机工程学会, 福建省电机工程学会第十五届学术年会论文集, 2015: 1-4.
- [6] 卓晓冬. 电气设备绝缘系统局部放电检测技术研

- 究[J]. 电子科技, 2019, 32(11): 83-86.
- [7] 张莎, 宋建成, 温敏敏, 等. 电力变压器绝缘系统典型局部放电研究现状与展望[J]. 变压器, 2018, 55(4): 32-40.
- [8] 赵勤学, 杨俊杰, 楼志斌. 基于OPC技术的高压开关柜无源无线温度监测系统[J]. 计算机工程, 2017, 43(11): 303-309.
- [9] 陶诗洋, 冯义, 张天辰, 等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 145-149.
- [10] 王勇. 面向智能电网的新型电力高压开关柜局放智能检测与预警系统平台的研制[J]. 北京电力高等专科学校学报(自然科学版), 2012, 29(2): 190-190.
- [11] 姜芸, 闵虹, 夏荣, 等. 高压交联电缆接头局部放电的电容耦合检测及分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 2005-2011.
- [12] 宋亮. 基于ZigBee技术的电力系统高压开关柜

温度测控系统研究[J]. 河南科技, 2019(26): 26-28.

作者简介



韩博文

韩博文(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为智能配电网、自愈技术和智能分布式等。

顾博川(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能配电网、配电自动化和智能用电等。

陈小军(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能配电网、配电自动化和云平台/云计算等。

(收稿日期: 2019-09-26) **EA**

广告 | AD

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2020《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容, 力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举, 以丰富内涵充实经典栏目, 持续深化专家访谈、EA 经理人等栏目, 密切关注电气技术的发展和应

专家点评 精辟深刻

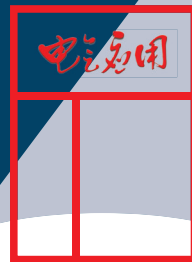
每期都将围绕一个热点话题, 隆重推出一场专题讨论的盛宴, 共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂, 针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用, 以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间, 促进应用经验交流。

国内邮发代号: 82-341 国外发行代号: M1409

每期定价: 25.00 元 全年定价: 300.00 元



· 电气应用 盛情呈现 ·

2020