

智能变电站高压断路器智能化改造技改实践

刘嵩

辽宁大唐国际新能源有限公司锦州热电分公司, 辽宁 锦州 121011

DOI: 10.61369/TACS.2026050037

摘 要 : 高压断路器是智能变电站的关键设备之一, 在信息感知、状态评价及运维管理方面存在不足, 基于目前智能化改造技术水平开展论述, 并提出了采用非接触式多源感知 + 边缘智能计算 + 标准 IEC 61850 通信等核心思路和技术路径实现智能组件升级、在线监测应用以及一次 / 二次融合, 形成涵盖“感知 - 分析 - 决策”的完整闭环, 从而完成高压断路器智能化升级改造工作。本研究成果可供类似变电站高压断路器智能化升级改造时参考借鉴。

关 键 词 : 智能变电站; 高压断路器; 智能化改造; 技改实践

Technical Renovation Practice of Intelligent Transformation for High-Voltage Circuit Breakers in Intelligent Substations

Liu Song

Jinzhou Thermal Power Branch, Liaoning Datang International New Energy Co., Ltd., Jinzhou, Liaoning 121011

Abstract : As one of the core key equipment of intelligent substations, high-voltage circuit breakers have deficiencies in information perception, state evaluation and operation and maintenance management. Based on the current technical level of intelligent transformation, this paper puts forward the core ideas and technical routes including non-contact multi-source perception, edge intelligent computing and IEC 61850 standard communication. It realizes the upgrading of intelligent components, the application of on-line monitoring and the integration of primary and secondary equipment, and forms a complete closed loop of "perception-analysis-decision", so as to complete the intelligent upgrading and transformation of high-voltage circuit breakers. The research results can provide reference for the intelligent renovation of high-voltage circuit breakers in similar substations.

Keywords : intelligent substation; high-voltage circuit breaker; intelligent transformation; technical renovation practice

引言

基于新型电力系统的建设背景, 智能变电站成为实现电网数字化的重要手段之一。作为担负着正常工作状态下接通或切断负荷电流以及发生故障时迅速将短路电流切断的任务的电器, 在整个电网中起着至关重要的作用^[1]。因此, 高压断路器的分合闸可靠程度直接影响了电网的安全稳定及持续供电能力。近年来, 伴随着传感器技术和边缘计算的发展与应用, 加之工业互联网通讯技术的进步, 对高压断路器开展智能化改造具备了一定的基础条件。本研究结合现阶段技术水平现状分析探讨了高压断路器智能化改造的相关思路, 希望能够给业内带来一定的借鉴意义。

一、高压断路器智能化改造的必要性分析

(一) 传统断路器运检模式的局限性

传统的高压开关设备大多采取的是定期检修 (TBM) 的方式, 由运检员根据一定的时间间隔安排对设备进行停机检查与预防性测试。这种方式存在着以下三个方面的弊端: 一是不能够随时了解设备的工作状况, 在一些不明显的机械损坏或电气老化等问题发生时很难得到及时处理; 二是对于故障情况的分析完全依靠个人的经验, 每个运检员对于相同的情况可能会有不同的看法, 因此得出的结果也是参差不齐的, 并没有一个统一的标准可以参照^[2]; 三是由于是按时间来是否需要检修工作, 所以会

出现过多或者过少的现象, 不仅浪费了大量的人力财力, 而且也不能很好地照顾到设备的真实情况。在这种“坐以待毙”的方式下, 随着电力网络的发展壮大, 已经无法适应如今对电能供应可靠性以及精细化管理的要求。

(二) 智能变电站对断路器的新要求

智能变电站的基本特点是全站信息数字化、通信平台网络化以及信息共享标准化, 在这一背景下, 对于高压断路器来说也有了新的更高的要求。在信息采集方面, 它不仅要能实时地检测到分 / 合闸线圈电流及储能机电流值, 还要能测量出其触头运动过程中的行程曲线、振动情况等众多参数, 然后将其通过 IEC-61850 的标准格式转换成统一的信息形式并发送给站控层或间隔层

的相关设备。而在控制上，则要采用性能高且具有多个核心处理单元的微机来完成各种复杂的智能性判别工作并在几秒钟内就给出正确的结果，从而达到正确获取分 / 合闸线圈的状态并且及时发出相应的保护指令的目的。最后是维护管理方面的变化，即智能变电站在日常工作中，除了可以对其进行周期性的检查外，还能随时对其所处状况做出准确地判定并将这种分析的结果反映出来，供维修人员参考以便制定合理的修理方案^[3]。

二、智能化改造总体技术方案

（一）智能化改造的标准体系与技术架构

为确保系统的互通互联性，在标准化建设方面，最新的《断路器操动机构状态智能感知系统技术规范》（T/CCSCIOT 0011—2025）中明确提出了该系统的相关技术要求、试验方法以及安装维护和技术管理的要求，并且还从断路器机械特性的实时监测、线圈电流在线检测到多种信息来源下的综合健康状况评价等多个角度进行了详细的规定。同时，《电力系统设备状态监测数据交互规范》也针对状态监测数据的结构化定义、通信接口以及命名规则等问题做了相应的规定，旨在消除各厂家之间存在的“数据孤岛”^[4]。此外，在技术架构方面，对于智能化改造采用了分层分布式设计方式，由底层至顶层分别为感知层、网络层、平台层和应用层。其中，感知层主要是在断路器本身及其操动机构处布置各种类型的智能传感装置来收集其机械、电学、环境等方面的运行情况；在网络层中则是利用光纤以太网技术和 IEC 61850 协议将这些数据高效地传出去；而在平台层，则是借助变电站的一体化监控或者数字换流站平台建立一个统一的数据存储并加以处理的地方；在应用层可以开展诸如状态评估、故障预测、维修决策等一系列智能化的功能应用。

（二）一二次深度融合方案

一二次深度融合是高压断路器智能化改造的技术核心。传统的方案将一次设备与二次设备分开布局，并且互感器以及控制回路和断路器之间的连接较多的电缆线路，这不仅占据着大量的空间而且增加了电力消耗，同时也会使得其信号传递过程中的节点过多，分布较为零散，容易受到外界因素的影响而产生损坏的情况。为了克服以上缺点，在目前的实际应用过程中提倡一种更加先进的超融合的一体化解决方案，即把真空断路器本身及其相关的隔离开关、电压或电流感应装置、取电部分、智能终端以及备用电源等相关部件进行了高度地整合在一起并采取了一体式的高集成度注塑工艺将其全部包裹起来形成一个整体。这样就能够很大程度上提高了整个系统的测量准确性和绝缘强度，在实际的应用当中也大大减少了一些不必要的电线连接数量从而达到降低由于接触不好而导致的故障问题发生的概率的目的^[5]。而在二次回路中所使用的最新的专利技术则是采用了由智能主控制器、断路器控制模块以及刀闸控制模块相结合的工作模式，来构建出新的二次回路体系，并且利用可以设置成不同形式的控制程序代替以往固定不动的电路联系方式，从而使该系统可以根据实际情况的变化来进行相应的改变。

（三）智能感知与监测装置部署

智能感知设备布置为断路器“触觉”。对于机械特性的监测，在其上部重点配置分 / 合闸线圈电流传感器、储能电机电流传感器及角位移或者直位移传感器，并且还配有振动加速度传感器。根据所接收到的线圈电流波形来反映电磁铁芯的状态变化，从中获取到线圈电流开始时、被触及时以及停止时这些重要的节点信息，则能够推算出是否出现了铁芯卡住的现象或是线圈出现匝间短路等问题发生的可能性。利用非接触式的光传感器代替传统的接触式传感器，可以在复杂的电磁环境中正常工作，从而获得准确无误的分合闸速度、行程曲线、动作时间的信息，消除了因直接接触而带来的磨损和不精确的问题。针对电气特性方面的监控，将霍尔电流传感器或者是罗氏线圈连接至主回路上面，以实现实时性地读取当前流经该线路中的电流大小的情况^[6]。同时，为了达到上述目的，还需要将其上的各个部分都用一个电压检测装置来进行相应的测量，即在进线上设置好相关的电压互感器或是电阻电路之后再行并入进去即可。另外，在这两个部位之间还有一些其他的元件存在，比如是用于感应温度高低的变化程度的温度传感器等，它们均需要装设于相应位置之上，然后用来观察那些重要元器件的升温状况如何^[7]。

三、关键技术与工程实践

（一）非接触式多源感知与振动分析技术

非接触式多源感知及振动分析为目前最典型的高压断路器状态检测技术之一。传统的接触式机械特性监测易受现场电磁场的影响且传感器不易于安装和维护，无法适应智能电网的高要求。为此，提出了一套全新的“非接触光感 + 多源信息”的解决方案，并研发了具有高精度、强抗扰性和长寿命运行特点的在线监测设备，在此基础上构建了以控制电压、机构油压、气室压力、环境温度等多种物理量与机械特性之间的动态关系模型并开展了基于多尺度时序的机械性能预测方法的研究工作，提高了其机械状态的预判能力^[8]。

通过振动信号分析方法解决了 GIS 全封闭结构下断路器故障问题。鉴于 GIS 是一个完全密闭系统，在其中运行的隔离开关及断路器的状态以及机械状况难以观测到，因此传动部分出现故障时会导致机械、电学指示失灵现象发生。研究发现造成 GIS 设备突然性故障的主要原因在于机械上的振动缺陷^[9]。此外还借助于带有注意机制和支持着双向门控循环单元的预测模式，使得对于振动状态预测结果中的平均绝对误差降低到了 0.063 并且均方根误差也低于 5% 左右，相比于传统的预测模式来说，这种新的预测模式使相对误差减少了至少有 37%，这样就实现了对 GIS 机械故障的一种有效的预防方式。

（二）工程实施全流程实践

工程实施过程是把智能化改造设计方案由图纸变为现实的重要步骤，在此过程中要严格把握好规划、设计、安装及调试等工作。在规划设计阶段，要求攻关组人员对现有的断路器做好全面检测，并且了解其是否处于良好的状态，能否对其进行有效的改

造。根据实际情况选择合理的技术方法并明确改造顺序。而在具体实施时，由于检修工作的特殊性质，因此一般会选择在设备停机期间完成相应的安装任务，如安装传感器或换装智能控制器，同时还要完成相关的综合布线等其他相关工作。对于具体的调试工作来说，则主要是为了检验各个部分的功能情况及其相互之间的连接情况，以此保证各种信号数据准确无误，特别是各项保护措施能够有效发挥作用。而在此之后就是系统的联合调试了，在这个过程中就需要通过一些重要的试验来进行必要的检查工作，其中就包含对保护装置的向量检查，从而可以判断出被测电压和电流之间是否存在正确的大小比例关系。传统的向量测试必须有一定的负荷才能开展，这就导致整个测试工作非常麻烦，不仅负荷难以安排，而且还会出现很多问题^[10]。但是采用负荷模拟式的继电保护向量检查的新技术就可以利用高精度的无线同步技术实现对实际工作中所需负荷特性的模拟，使得原本应该放在开始阶段的工作提前到后期展开，这样就能大大提高工作效率并且保障工作人员的安全。

四、结语

高压断路器智能化改造是智能变电站建设深入推进的关键举措之一，更是电力设备运检由“事后修理”转向“事前预防”的重要标志。“文章分别围绕改造背景与意义、整体思路及关键技术，以及具体实施案例等方面展开阐述，并重点介绍了非接触式多源感知、振动分析诊断、IEC 61850标准通信等技术对于提升断路器智能化水平的作用。”目前，1 ~ 2次融合发展技术日益完善，非接触式的光感测和振动分析等先进检测方法也具有较好的应用前景，“基于多种信息来源的数据融合作出健康评价并开展预测性维护决策的系统正逐渐由点至面地推广应用”。借助于人工智能和数字双胞胎的发展，未来高压断路器有望实现从“能看懂自己身体状况”，进而达到“自主管理自身身体健康”的质跃升，助力构建更可靠的新一代电网。

参考文献

[1] 丁健, 卢兴福, 曹俊, 郝越峰, 付渊. 基于改进 Petri 网的变电站高压断路器故障诊断方法 [J]. 国外电子测量技术, 2025, 44(12):57-62.

[2] 阮燕通. 110 kV 变电站智能化改造与远程监控技术应用 [J]. 云南水力发电, 2025, 41(11): 186-189.

[3] 刘斌. 变电站设备的智能化改造与升级策略研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (20):31-33.

[4] 刘庆超. 变电站高压断路器断口闪络保护设计与应用研究 [J]. 产业科技创新, 2025, 7(05):49-52.

[5] 张志荣, 张利娟, 陆文虎, 张小龙. 变电站高压 SF6 断路器故障诊断技术研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (05):282-284.

[6] 钟声, 何慧忠. 基于电流、振动特征的高压断路器智能诊断技术应用 [J]. 企业管理, 2024, (S2): 168-169.

[7] 彭沛博. 高压断路器在线监测技术研究 [J]. 电气开关, 2024, 62(05):115-117.

[8] 佟洪明, 曹锐. 工矿企业高压开关柜故障分析及智能化改造 [J]. 冶金动力, 2024, (04):7-10.

[9] 陶可鹏, 倪惠浩, 何雄辉. 变电站高压室断路器智能化改造研究与应用 [J]. 机电信息, 2020, (06):51-52.

[10] 郭思婕. 500kV 变电站高压开关设备智能化改造研究 [J]. 红水河, 2014, 33(06):63-64+69.