

[远程控制]

智能电网背景下柱上开关 远程控制技术

文/何伟 周虎 任维 居兴 常文亮
国网重庆市电力公司北碚供电分公司

通过远程控制技术对柱上开关进行操作不仅提升电网的运行效率，还增强对系统故障的快速响应能力。随着通信技术的进步，远程控制技术已经成为智能电网管理中不可或缺的一部分，涉及通信、控制策略、系统集成及故障处理等多个方面。探讨智能电网背景下柱上开关的基本原理和类型，并阐述远程控制技术的应用。

在现代电力系统的管理与运维中，智能电网技术的应用已成为提升电网智能化水平和效率的关键因素。在配电网中，柱上开关承担着控制电网负载、保护配电线路安全及故障隔离等多项功能。随着分布式发电和可再生能源的广泛接入，柱上开关的作用日益凸显，其在故障检测、隔离及恢复供电方面的效率直接影响到整个电网的稳定性和可靠性。因此开发和优化柱上开关的远程控制技术，不仅能够实时监控电网状态，更能迅速响应电网故障，显著提高电网的自动化和智能化水平。

柱上开关的基本原理和类型

1. 柱上开关的工作原理

柱上开关的工作原理基于机械和电气操作的结合，通常包括感应装置、执行机构、开关体和控制系统四大核心部分，如图1所示。感应装置负责检测电网中的电流和电压变化，当检测到异常情况如过载或短路时，将信号传送到控制系统。控制系统根据接收到的信息，判断是否需要断开或接通电路，并发送操作指令给执行机构。执行机构则通过驱动开关体，完成断开或接通电路的操作。这一系列动作不仅需要精确快速，还要确保在各种气候和外部环境条件下的可靠性。开关体是实现断开和接

通电路的物理介质，其设计和材料选择对柱上开关的性能至关重要，通常由耐高温、高电压的绝缘材料构成，能够承受电气操作过程中产生的高温和电弧。在智能电网中，柱上开关还需要具备远程控制的功能，这就要求其控制系统不仅能处理本地信号，还能接收和响应来自中心控制系统的远程指令^[1]。

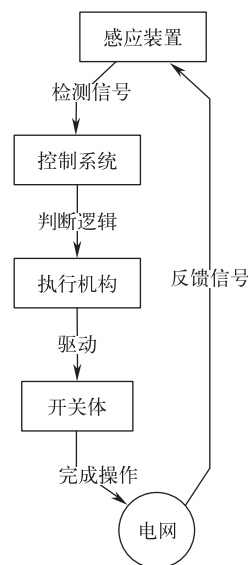


图1 柱上开关的工作原理示意图

2. 不同类型柱上开关的特点

柱上开关类型多样，每种类型都有其独特的特

点和应用场景。常见的柱上开关类型包括空气断路器、SF₆断路器和真空断路器，这三种类型的柱上开关在结构、工作原理及性能方面各有差异，适用于不同的运行条件和环境。其中空气断路器主要利用空气作为灭弧介质，其主要优点在于成本较低且维护简便。然而，由于空气的灭弧性能相对较差，适用于较低电压和电流的场景。SF₆断路器使用SF₆气体作为灭弧和绝缘介质，相比空气断路器，SF₆断路器在高电压和大电流条件下具有更好的性能，其灭弧能力强，绝缘性能高，但是成本和维护要求相对较高，且SF₆气体对环境有一定的影响。真空断路器则使用真空作为灭弧介质，其最大的特点是灭弧效果好，维护简单，且无环境污染问题，适合于中等电压级别的电网应用。常见柱上开关类型及特点见表1。

表1 常见柱上开关类型及特点

类型	适用电压级别	灭弧介质	优点	缺点
空气断路器	低至中电压	空气	成本低，维护简便	灭弧性能较弱
SF ₆ 断路器	高电压	SF ₆	灭弧能力强，绝缘性能高	成本高，环境影响
真空断路器	中等电压	真空	灭弧效果好，无环境污染	相对成本较高

智能电网下的柱上开关远程控制技术

1. 通信技术

无线通信技术中，蜂窝网络提供了一种灵活的连接方式，常用的4G LTE网络的下行传输速率可以达到100 Mbit/s，上行速率达到50 Mbit/s，延迟约为50 ms，这对于不需要极端低延迟的柱上开关控制操作是足够的。随着5G技术的推广，预期的下行速率可达1 Gbit/s，上行速率可达100 Mbit/s，而延迟可以降低至1 ms，显著提高远程控制操作的实时性和可靠性；专用无线电频率，如使用在900 MHz ISM（工业、科学和医疗）频段的无线电，其传输距离较长，可覆盖数公里范围内的设备，但传输速率较低，通常在数百 Kbit/s。这种通信方式适用于传输命令和状态信息等较小数据量的应用场景；卫星通信提供了最广泛的覆盖范围，尤其适合在偏远或地理位置复杂的地区进行柱上开关的远程控制^[2]。然而卫星通信的主要缺点是其较高的延迟（通常在600 ms以上）和较高的运营成本。

对于有线通信技术，光纤通信提供高带宽和极

低的延迟，传输速率可以高达数十Gbit/s，延迟低至几微秒，非常适合用于数据量大和要求高响应速度的控制系统，但光纤的部署成本相对较高，且安装过程复杂，维护成本也相对较高；电力线载波通信PLC利用现有的电力线进行数据传输，其优点在于无需额外的通信线路建设，可以减少初期投资。PLC的传输速率一般在数百Kbit/s到几Mbit/s之间，足以应对柱上开关控制的需求，不过PLC的性能受到电网噪声和干扰的影响，且传输距离和传输速率受到电力线路质量和环境因素的限制。

2. 控制策略与算法

控制算法负责分析传感器数据、执行控制指令并确保系统的稳定性和效率。为实现这一目标，控制策略通常结合多种数学模型和优化算法，以实现

对柱上开关的高效管理。

核心的控制策略是基于状态反馈的控制循环，其基本形式可以表示为

$$u(t) = Kx(t) \quad (1)$$

式中， $u(t)$ 是在时间 t 的控制输入，表示控制行为（如开关操作）； $x(t)$ 为从系统传感器收集的数据（如电压、电流等级）； K 为根据系统动态性能调整的参数。

为了进一步优化控制性能，引入优化目标函数，通常是一个二次型成本函数，用以评估控制策略的性能

$$J = \int_0^T [x(t)^T Qx(t) + u(t)^T Ru(t)] dt \quad (2)$$

式中， Q 和 R 是权重矩阵，用于调整状态变量和控制输入的相对重要性； T 是评估时间窗口的长度； $x(t)^T$ 和 $u(t)^T$ 分别是状态向量和控制向量的转置，表示在优化过程中对系统状态和控制行为的评价。

还需要考虑时间延迟和数据丢失问题，引入一个补偿机制，调整控制输入以减少这些因素的影响

$$u'(t) = u(t) + K_d [e(t) - e(t-1)] \quad (3)$$

式中， $u'(t)$ 是调整后的控制输入； K_d 是补偿增益； $e(t)$ 是在时间 t 的误差信号； $e(t-1)$ 是前一时间步的误差信号。这里的误差信号 $e(t)$ 反映了实际输出与期望输出之间的偏差，是控制系统中反馈环节的关键组成部分^[3]。

3. 系统集成

1) 设备兼容性是系统集成的基础，要求柱上开关能够与不同厂商的设备如变压器、继电器和其他

智能传感器无缝连接。例如，柱上开关通常需要与 IEC 61850 标准兼容，该标准定义了智能电网设备之间的通信协议和数据模型。柱上开关的接口必须支持至少 100 Mbit/s 的以太网连接，以确保数据传输的及时性和准确性。

2) 数据同步。在智能电网中，数据同步通常通过时间同步协议如 IEEE 1588 来实现，该协议可以将系统中所有设备的时钟误差控制在 $1\ \mu\text{s}$ 以内。这种精确的时间同步确保来自不同设备的数据可以在正确的时间序列中进行分析处理，避免了数据时序错误带来的控制决策失误。

3) 接口标准化。包括但不限于物理层、网络层和应用层的标准化^[4]。在物理层，使用标准的电气接口如 RJ45 或光纤连接，以支持不同设备之间的物理连接。在网络层，采用统一的传输协议如 TCP/IP，确保数据的传输可靠性。在应用层，实施如 SOAP 或 RESTful 等基于 Web 的服务架构，支持更广泛的应用程序接入和互操作性。

4) 中间件的应用。使用 OPC UA（开放平台通信统一架构）中间件，可以实现不同设备和控制系统之间的无缝数据交换。OPC UA 支持包括数据访问、报警和事件处理、历史数据访问等多种服务，其安全性由内建的加密和认证机制保障。柱上开关系统集成的有关参数见表 2。

表2 柱上开关系统集成的有关参数

应用类型	参数	标准/协议
设备兼容性	以太网接口速率	100 Mbit/s
数据同步	时间同步精度	$1\ \mu\text{s}$
接口标准化	网络层传输协议	TCP/IP
中间件	支持的服务类型	数据访问，报警处理

4. 故障检测与响应机制

故障检测系统会监控如电流的持续超载情况，其中，电流监测通常设定阈值为额定电流的 125%。如果某段时间（如 15 min）内电流超过此阈值，系统将判断为过载状态。瞬态过电流（如在 0.1 s 内电流突增至额定电流的 400%）也会被系统即时检测出来，通常这种情况表明发生了短路故障；电压参数的监测方面，系统将持续监控电压水平，若电压低于额定电压的 85% 或高于 110%，并持续超过 10 s，系统将触发故障警报。对于温度监测，设备内部的温度传感器会确保温度不超过设定的安全阈值，如

85 ℃，超过该温度可能导致设备损害或性能降低；在故障检测数据分析中，采用机器学习模型来识别和预测故障模式。这些算法可以从历史数据中学习并预测潜在的故障发生，提高故障检测的准确性和预见性^[5]。如支持向量机（SVM）和神经网络被广泛用于分类和回归问题，能够基于实时收集的多维数据输出故障判定结果；在检测到故障后，响应机制立即启动。响应动作包括隔离故障区域、重新配置网络来绕过故障点，并在必要时激活备用线路。这一过程通常在故障检测后的几秒钟内完成，以减少对电网及用户的影响。故障隔离通常由自动开关设备执行，这些设备能在 50~200 ms 内完成开关动作，确保快速切断故障源。

案例分析

某市电网系统近年来面临高负荷需求和频繁的天气相关故障，如雷击和风暴，这对电网的稳定性和可靠性提出了挑战。为解决这些问题和挑战，采用远程控制技术来减少故障响应时间，优化负荷管理，从而提高整个电网的操作效率和服务质量。

电网系统包括 100 个柱上开关，每个开关都配备了先进的传感器和通信设备，能够实时监控电流、电压和温度等关键参数，并通过无线网络将数据回传至中央控制中心。通过集成的数据分析平台，系统能够实时处理这些数据，使用预定的算法自动识别潜在的故障和负荷异常。当某一区域的电流持续超过额定电流的 120%，超过 10 min，系统会自动判定为过载状态，并远程调整相关柱上开关，以重新分配或减少负荷，防止过载。在故障检测方面，系统采用了基于机器学习的预测模型，该模型能够根据历史数据和实时监测数据预测特定区域的故障概率。一旦检测到故障，如短路或设备损坏，远程控制系统会立即隔离故障区域，并重新配置电网，以最小化对用户的影响。这一过程的响应时间平均为 200 ms，远快于传统手动操作。该项目实施一年后，数据显示故障响应时间和电网运行效率均有显著改善，实施前后的运行对比见表 3。

表3 实施前后的运行对比

指标	实施前	实施后
故障响应时间/s	120	0.2
年均停电时间/h	2.5	0.5
负荷管理效率 (%)	85	95

从对比结果来看，远程控制技术的应用大幅提升了故障处理速度和整个电网的负荷管理效率。故障响应时间的显著缩短减少了因故障而导致的停电损失，而更高的负荷管理效率则意味着电网能够更有效地应对高峰负荷，避免过载发生。总的来说，柱上开关的远程控制技术不仅提高电网的运行效率，也增强其对各种突发事件的应对能力。

结束语

智能电网背景下，柱上开关远程控制在提高电网运行效率和可靠性方面扮演着不可或缺的角色。通过先进的通信技术实现高速且稳定的数据传输，为远程监控和实时控制提供技术支持。同时精确的控制策略与算法进一步优化负荷管理和故障响应流程，减少电网运行中的风险和不确定性。系统集成的高效实施则确保各项技术的协同工作，提升整个电网系统的智能化水平。[EA](#)

(收稿日期：2024-12-16)

(上接第 82 页)

高准确率和稳定的性能，准确率始终保持在95%以上，表明模型能够可靠地识别和预测变电站的故障状态。召回率和精确度的高值同样证实了模型在实时识别故障方面的有效性，确保了关键故障不被遗漏且误报率低。F1得分为一个综合指标，也显示了模型在精确度和召回率之间保持了良好的平衡。响应时间在0.45~0.52 s之间，显示了系统对故障的快速响应能力，这对于变电站的安全运营至关重要^[5]。

结束语

综上所述，新一代智慧变电站集中监控辅助决策系统的设计与实现不仅仅是技术上的革新，更是电力系统管理模式的重大进步。该系统的成功实施，将大幅提升电力系统的运行效率和可靠性，减少人为操作错误，降低运维成本，同时也为电力系统的可持续发展和环境保护提供支持。通过这种技术的推广应用，可以显著增强电网的智能化管理能

- ### 参考文献
- [1] 牛博, 刘健, 申巍, 等. 配网柱上开关容性关合过程中电磁辐射干扰测试与仿真[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 11-16.
 - [2] 吴鹏, 李前敏, 何洪流, 等. 一二次融合柱上开关状态监测与运维技术研究[J]. 电子器件, 2023, 46(1): 179-184.
 - [3] 王东芳, 陶飞达, 黄智鹏, 等. 一二次融合柱上开关控制可靠性模型与优化设计[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 86-92.
 - [4] 肖阳, 曾景原, 许月惟. 柱上开关控制器的技术发展及功能应用[J]. 大众用电, 2023, 38(9): 35-36.
 - [5] 韩笑, 王凡, 蒋剑涛, 等. 基于暂态分量特性的柱上开关保护[J]. 信息技术, 2022(8): 21-26.

力, 促进整个社会能源消耗的优化, 为经济的持续健康发展提供强有力的技术支撑。[EA](#)

(收稿日期：2024-12-16)

- ### 参考文献
- [1] 彭政, 尹自力, 陈紫琦. 基于BIM+AR技术的智慧变电运行辅助巡检系统优化方法研究[J]. 电工材料, 2023(2): 4-6.
 - [2] 优特科技助力桥洞变电站实现二次系统顺控操作[J]. 石油化工自动化, 2021, 57(3): 97.
 - [3] 严亚兵, 黎刚, 李辉, 等. 智慧变电站监控系统智能联动技术浅析[J]. 湖南电力, 2020, 40(3): 77-81.
 - [4] 韩小虎. 输油气管道电气智能化站场集中监控诊断系统关键技术标准研究[J]. 电力系统装备, 2022(11): 25-28.
 - [5] 赖莹. 某高速公路变电站智慧运维云平台设计方案[J]. 现代建筑电气, 2023, 14(4): 43-48.