

# 一体化集成的智能柱上开关高可靠性研究与设计

为了提高供用电质量水平，同时提高对电力用户的服务质量，实现一、二次设备一体化是必由之路。针对柱上开关存在的问题，本文对一、二次一体化集成的智能柱上开关高可靠性进行了深入研究，一次部分改进了传统的柱上开关和操动机构设计，有效解决了凝露进水、密封和机构卡涩等问题；二次部分通过集成FTU功能设计，运用现代传感技术，实现了柱上开关的全方位状态监测；一、二次整体部分统一了标准接口，提升了柱上开关的集成化水平。该项目的实施将有效促进配电网一、二次设备一体化进程，提升电能质量和供电可靠性。

席禹 郭晓斌 陈波 呼小亮 陈浩敏/南方电网科学研究院有限责任公司

## 0 引言

随着我国城网、农网改造的不断深入，在供电可靠性和供用电指标已有很大提高的基础上，要求继续提高供用电质量水平，同时提高对电力用户的服务质量，从而实现一、二次设备一体化。

配电网自动化的主要开关设备之一就是10 kV户外柱上开关，该产品可实现配电网自动化系统高稳定性和高可靠性的要求。然而就目前而言，要实现柱上开关的一、二次一体化集成仍然任重道远，具体表现在以下三个方面。

1) 柱上开关本体：①可靠性低，当前柱上开关工作准确率不到22%，其原因在于密封材料老化进水，造成机械锈蚀故障及二次端子排受潮短路故障，从而引起误动作；②安装难度大，柱上

开关安装不当易造成设备密封性受损，存在设备带电或绝缘气体泄漏等隐患；③维护难度大，配电网柱上开关数量众多、布置分散，且部分柱上开关完全密封，难以测量设备内部状况。

2) 配套的馈线终端FTU：①功能模块分散，易出故障且不便维护；②功能缺失，设计单一，采集数据信息少，不能满足状态监测的需求，如不能监测分合闸线圈电流等；③防护等级不高。

3) 一、二次整体集成：①设备接口不匹配，兼容性、互换性和扩展性差；②成套设备部件较多，安装难度较大；③一、二次设备厂家经常发生责任纠纷。

综上所述，研究一款高可靠性的一、二次一体化集成的智能柱上开关成为提升配电网柱上开关智能化和集成化的有效途径，也成为提升配电网运维水平、电能质量和供电可靠性的一个重要发展方向。

## 1 一次柱上开关的高可靠性改进策略

### 1.1 开关本体结构设计

传统的柱上开关操动机构室位于正面，盖板采用密封圈密封，正面的密封圈受阳光直射、雨水淋湿容易老化，长时间会影响开关本体的可靠性。本文在设计时将柱上开关的机构室盖板设计到箱体的底部，壳体采用整体压铸而成，避免阳光直射、雨水淋湿造成密封圈老



席禹/硕士研究生

#### 关键词/Keywords

柱上开关·  
FTU·  
高可靠性·

南方电网公司科技项目一体化集成的智能柱上开关研究与应用（ZBKJXM20170043）。

化。绝缘套管采用抗紫外线能力强、具有憎水性等性能的复合绝缘材料。柱上开关本体采用全绝缘出线，操动机构密封在机构室内，位于开关箱体正下方，防护等级按IP67设计，可有效提高开关本体的可靠性。图1为改进后的柱上开关本体结构示意图。

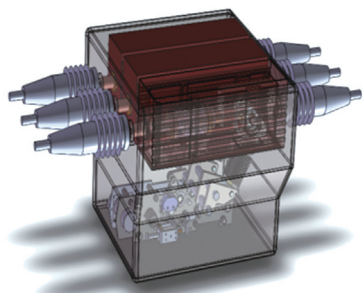


图1 改进后的柱上开关本体结构示意图

## 1.2 外壳设计

柱上开关壳体采用3 mm厚度的06Cr19Ni10不锈钢耐腐蚀材质，箱体及机构室防护等级符合GB 4208—2008规定。壳体加工完毕后表面作喷漆处理，具备双重防腐的有效措施，可有效提高柱上开关的防腐性。图2为改进后的柱上开关外壳设计。

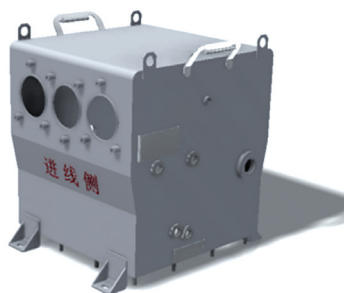


图2 柱上开关外壳设计

## 1.3 操作面板密封设计

柱上开关面板设计有清晰、可靠的开关位置指示，开关断开、闭合位置及弹簧机构储能指示清晰易见，并有标志颜色表示，同时附带中文指示标。操作开关手动分合闸手柄以及手动储能手柄装置等均有明确、永久的标志。操作手柄的旋转轴采用迷宫密封，即在旋转轴周围设若干个依次排列的环形密封齿，齿与齿之间形成一系列截流间隙与膨胀空腔，被密封介质在通过曲折迷宫的间隙时产生节流效应而达到阻漏的效果，可有

效提高开关本体密封的可靠性。图3为柱上开关正面示意图。

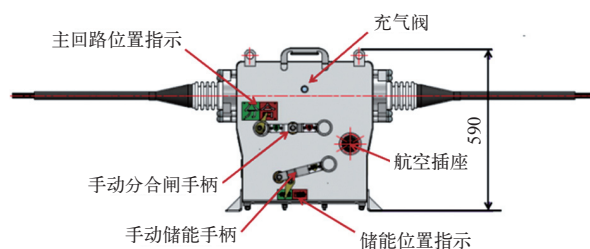


图3 柱上开关正面示意图

本文的旋转轴采用迷宫密封，因此有必要对其密封性能进行分析。迷宫密封泄漏量的计算需要用到热力学分析，过程比较复杂，实际应用中通常采用泄漏系数修正的方法。

受惯性的影响，当气体通过迷宫时流体截面会发生收缩，收缩后气体的最小面积 $S_c$ 为

$$S_c = C_c S \quad (1)$$

式中， $S$ 为迷宫孔口面积； $C_c$ 为气体收缩系数。

气体在经过孔口时流速也会发生变化，实际的流速 $v_c$ 为

$$v_c = C_d v \quad (2)$$

式中， $v$ 为理想状态下的气体流速； $C_d$ 为速度系数。

由式（1）、式（2）可得通过迷宫孔口的实际流量 $Q$ 为

$$Q = C_c C_d S v \quad (3)$$

式中， $C_c C_d = \alpha$ ， $\alpha$ 为迷宫孔口流量系数。

$\alpha$ 的大小不仅与间隙的形状、齿顶的形状和表面粗糙程度有关，对压缩性气体，还与压力比和马赫数有关。对于尖齿， $\alpha$ 一般取0.7；对于圆齿， $\alpha$ 一般取1。所以当采用迷宫密封设计时，通常采用流道长、齿顶尖的结构设计，以增大阻力，减少气体的泄漏量。

## 1.4 操动机构设计

弹簧操动机构是一种以弹簧作为储能元件的机械式操动机构，其结构如图4所示。弹簧的储能借助电动机通过减速装置来完成，并经过锁扣系统保持在储能状态。开断时，锁扣借助磁力脱扣、弹簧释放能量，经过机械传递单元使触头运动。弹簧操动机构优势显著，然而在长期的使用

中, 弹簧操动机构故障率很高, 占到了柱上开关总故障的50%以上。故障的主要原因包括分合闸线圈烧毁和脱扣机构设计不合理。

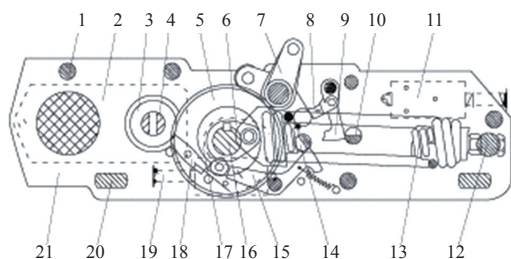


图4 操动机构结构

- 1—支撑杆 2—电动机 3—小齿轮 4—储能轴 5—大齿轮  
6—挂簧拐臂 7—输出拐臂 8—止子 9—分闸掣子 10—分闸半轴  
11—分闸脱扣器 12—挂簧轴 13—合闸簧 14—合闸半轴  
15—合闸掣子 16—主轴 17—轮 18—离合板 19—合闸脱扣器  
20—支撑柱 21—夹板

针对前者, 本文在下文的FTU设计中增加了分合闸线圈电流的监测功能。对于后者, 传统的脱扣机构转轴利用两个轴套固定在机构上, 转轴和轴套之间为滑动摩擦, 摩擦力比较大。本文将转轴与机构支架的连接改进为轴与轴承连接, 轴与轴承之间是滚动摩擦, 摩擦力大幅度降低, 保证了长时间操作不卡涩, 可有效提高操动机构运行的可靠性。

## 2 二次FTU的高可靠性研究

### 2.1 FTU一体化功能集成设计

针对目前的柱上开关FTU功能模块分散、易出故障且不便维护的特点, 本文设计的柱上开关FTU功能集成化方案, 集配电自动化的测量、保护、单相接地、谐波测量和设备状态监测等功能于一体, 具体包括以下几方面。

1) 集成测量、保护等常规FTU功能。在测量功能方面, 主要是实现“三遥”功能, 以及电子式电流电压互感器采集、测量和计算; 在保护功能方面, 采用三段电流保护、电压时间型等保护逻辑灵活配置的方式。

2) 集成单相接地故障判定功能。对于小电流接地系统, 本文采用的方法是提高FTU采集频率,

并集成录波功能, 采用稳态和暂态结合进行接地故障判断。通过现场采集的海量线路运行数据, 建立和验证线路故障模型、运行工况模型和判别算法, 并建立起专家系统, 实现线路运行工况的识别和故障定位。

3) 集成谐波测量分析功能。FTU在线监测边界内负载谐波, 当谐波达到用户设定参数时, 断路器按设定报警或分闸闭锁。此功能可有效防止界内谐波影响整个电网供电质量, 防止设备因谐波而损毁。

### 2.2 FTU全方位状态监测设计

柱上开关中的操动机构是最容易发生故障的主要部件, 经常发生分合闸线圈烧毁、电动机堵转及机构卡涩等事故, 本文设计的FTU通过对分合闸线圈的工作电流、储能电动机转动电流和温湿度数据等进行监测, 分析其数据的波纹变化, 同时进行故障演变的模拟推导, 对预期故障安排有针对性的检修或检查, 排除故障发生的可能, 将故障扼杀在萌芽状态, 可有效提高柱上开关运行的可靠性。

#### (1) 分合闸线圈电流监测

其监测原理框图如图5所示。图中用于分合闸输出操动机构的操动电源穿心经过TR0229-LB5系列的霍尔传感器, 同时结合CPU操作判断所采集的是分闸还是合闸信号, 霍尔传感器采用5 V电压供电, 其输出的模拟信号经过抗混叠滤波、幅值调整等信号调理电路后, 直接接入到MCU内部的AD通道中。

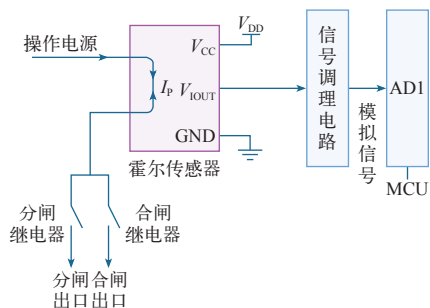


图5 分合闸线圈接口原理框图

#### (2) 储能电动机电流监测

其监测原理和分合闸线圈电流类似, 这里不

再赘述。储能电动机的接口原理框图如图6所示。

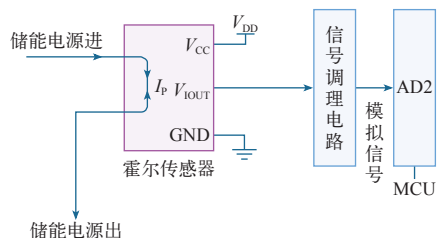


图6 储能电机接口原理框图

### (3) 温湿度监测

为了掌握设备运行时的工作环境，在柱上开关的气箱内增加了对气体的温湿度监测，在FTU内部集成了温湿度监测，实时获取柱上开关和FTU内部的温湿度数据。

## 3 一、二次整体的高可靠性研究

一次和二次通过航空插头连接，其电缆连接状态和信号线的在线状态是柱上开关安全运行的保障，本文设计采用防护等级高、可靠性好的通用型军用航空插头操作连接接口，对其接口进行标准化定义，针对无论是一次或二次出现故障，直接采用以换代修的免维护方式，进而减少故障检修维护的时间。

### 3.1 一、二次连接方式设计

为满足柱上开关各种传感信息及考虑后期采集信息的扩展，开关本体配置1只37芯航空插座，馈线终端配置1只26芯航空插座、1只6芯防开路航空插座及1只6芯航空插座，如图7所示。其中，26芯航空插座用于传输储能和分合闸控制负荷开关状态信号和零序电压信号，6芯防开路航空插座用于传输相电流、零序电流信号，6芯航空插座用于传输电压互感器的供电电源及线电压信号。

航空插头采用气密封玻璃烧结，其原材料具有耐温差、抗辐照、防腐蚀和防老化等特点，并

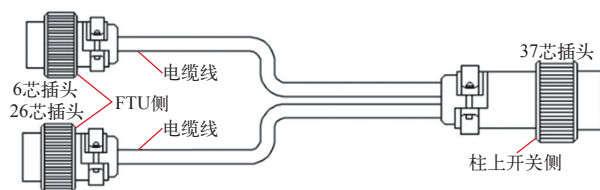


图7 柱上开关与FTU的连接电缆示意图

具有IP67防护等级，可有效提高一、二次电气连接的可靠性。

### 3.2 一、二次信号线在线状态监测设计

通过监测每条一、二次信号线回路的在线状态，对信号回路的虚接、松动和断线等及时发出告警信息，可有效提高柱上开关运行的可靠性，防止关键时刻由于一、二次连接状态故障而无法控制。一、二次信号线在线状态监测设计主要包括以下三类。

1) 传感类信号状态监测：TV、TA通过断线报警监测连接状态，传感器通过采集信号实时监测电气连接状态。

2) 有源类信号状态监测：接线回路有电流电压有源信号的接线状态监测，如控制回路的连接状态、有源的传感器电气接线状态监测等。

3) 其他信号状态监测：通过对柱上开关上的常开常闭触点进行监测设计，实时监测连接线的连接状态。

控制回路状态监测原理框图如图8所示。

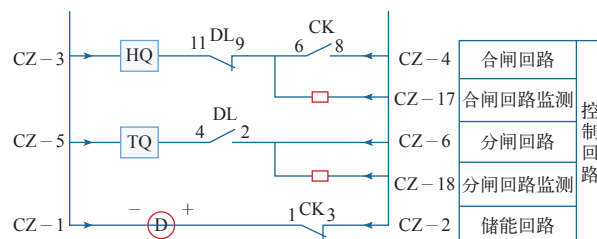


图8 控制回路状态监测原理框图

## 4 结束语

本文对一、二次一体化集成的智能柱上开关高可靠性进行了深入研究，一次部分重点改进了传统的柱上开关和操动机构设计，有效解决了凝露进水、密封和机构卡涩等方面的问题；二次部分通过集成FTU功能设计，运用现代传感技术，实现了柱上开关的全方位状态监测。一、二次整体部分统一了连接接口，提升了柱上开关的集成化水平。本文项目的实施将有效促进配电网一、二次设备一体化进程，提升电能质量和供电可靠性。

(收稿日期：2017-09-16) EA