

[开关柜]

# 一种全面智能感知的中压开关柜设计思路

文/厦门ABB开关有限公司 刘昱雯

提出了全面智能感知中压开关柜应具备的主要智能化功能及设计要求，并通过全新一代UniGear ZS1介绍柜体五防联锁、主回路连接可靠性、断路器手车和接地开关、断路器状态和环境监测等智能感知方案。

近10年来，电力设备智能化技术蓬勃发展，在中压开关设备领域以成熟的金属铠装移开式开关柜KYN28为基础发展的智能化控制功能有：对断路器底盘车、隔离手车及接地开关的远程控制；温湿度控制器的自动控制等；常见的在线监测功能有断路器触头测温、机械特性监测、环境温湿度监测和绝缘情况监测等。

KYN28柜已有逾30年的运行历史，产品链成熟且稳定，大部分厂家实现的智能化方案往往是以组装和集成为主，即在原有柜体结构不做更改的情况下，通过在高压侧加装各类电子传感器作为采集单元，并经由有线或无线的方式将信号从一次侧传输至低压室对应的智能终端。虽然此类方案可以快速地实现设备的智能化改造，但其设计初期未能充分考虑电子传感器在高电压电场下的运行工况，安装上更受柜体结构的限制，往往存在新增智能化监测功能的实现成本高、故障识别效果有限及电子元件本身故障率较高的问题。

本文旨在提出一种开关柜的智能化开发思路，通过对开关柜全生命周期质量情况进行分析，识别新增智能化功能的必要性及开发过程中的注意事项，提出一种在柜体一次结构设计初期即全面考虑智能化的一二次融合的解决方案，从而提高产品的可靠性和有效性。

## 从开关柜全生命周期质量角度分析用户需求

金属铠装移开式开关柜广泛应用于配电网领域。国家电网公司提出的“坚强智能电网”对配电网环节明确强调了建设配电网自动化和配电网调控一体化的能力、提高供电可靠性等与中压开关设备极为相关的要求。

通过配电网用户角度对供电可靠性指标的分析，停电事故中中压开关柜相关的缺陷统计，全面质量管理工具对各行业客户反馈的分析，及问卷调查等手段，从多个维度综合分析识别开关柜智能化功能的需求。

### 1. 从供电可靠性角度看电网用户需求

通过对《2019年度全国电力可靠性指标》中的停电原因进行分析，2019年，全国“计划停电”为我国中压用户停电的主因，占比59.84%，“故障停电”占总停电时间的40.16%。在“计划停电”中，排名第二的“检修停电”与开关设备较为相关，占比为46.31%。在“故障停电”中，自然因素与外力因素为主因，分别为30.6%和25.13%，而与开关设备较为相关的因素，“设备原因”仅占比16.80%。综合可得，与开关设备较为相关的因素造成的总停电时间占比约为34%，其中约28%由主动“检修停电”造成，约6%由被动“设备原因”造成。

因“设备原因”造成的停电仅占6%，考虑到大

量应用中压开关柜设备的城市地区的停电时间远小于全国平均值,可见中压开关柜在配电网系统中运行相对稳定。因此,提高电缆化率和推广户内开关柜的应用对提高电力运行可靠性有明显的帮助。同时,开关设备的智能化发展应在进一步提高设备质量的基础上,通过智能化全面状态感知,协助用户优化检修运维策略,从而通过减少占比高达28%的检修停电时间,可大幅提高供电可靠性指标。

## 2. 从开关柜总体缺陷统计分析“设备原因”

虽然由设备原因造成的停电仅占6%,其中由中压开关柜造成的比例很小,但一旦发生事故,往往还造成其他设备及用户的间接损失,应引起足够的重视。南方电网对2015—2017年发生的中压开关柜紧急重大缺陷统计数据可为“设备原因”的分析提供参考。2015—2017年缺陷部位综合排序如图1所示。

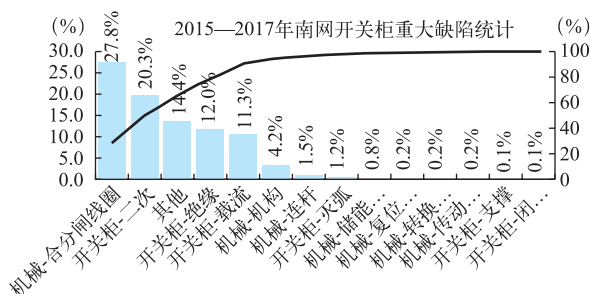


图1 2015—2017年缺陷部位综合排序

在南网事故缺陷统计中,“机械”占比最高,达45.25%，“二次”占比排第二,达20.33%，绝缘、载流紧随其后,各约占10%左右。而其中的“机械”中,分合闸线圈、储能电动机占其中的61%以上,而机构、连杆及传动等总和仅占15%左右。加权排序后,断路器的分合闸线圈及储能电动机在总缺陷占比为27.8%,排名第一;开关柜的二次主要指二次接线、低压元件等,占比为20.33%,排名第二;随后依次为开关柜的绝缘占比12.02%,开关柜的载流占比11.26%。前四名总占比达71.4%,是解决问题的关键。

其中排名第一和第二的缺陷分别为断路器和开关柜的二次部分,总和占比近半。尽管电网公司具备专业的运维检修团队,并且日常维护和检修已尽可能排查风险,但由于大部分二次相关的缺陷都需要通过操作来发现,在检修过程中受停电影响无法

落实维护和检修,导致该类缺陷较难通过常规手段提前发现及预防。

以上数据具有一定的代表性,尽管户内开关柜经过长足的发展已日趋成熟,具有经验的客户在付出大量的检修时间的情况下,仍有一部分现场质量问题无法通过现有的常规手段排查。如何通过开关设备的智能化全面感知,如何针对性地解决常见的现场质量问题是需要重点关注的方向。

## 3. 从各行业客户反馈中进一步挖掘智能化需求

电网行业数据充分体现了行业总体平均水平及暴露出来的痛点,可以理解为电网客户普遍认为需要解决的问题。为了提高供电可靠性,减少主动和被动的停电时间,须着重改善的方面有:减少检修时间;降低合分闸线圈和储能电动机故障,开关柜二次故障、开关柜的绝缘和载流问题。

当落实到具体的产品改进时,具体厂家还应同时结合自身产品在各个行业的实际运行情况进行分析。

通过厂家的质量管理工具,如客户满意度调查报告、客户投诉数据库等,可对售后和现场反馈的产品相关问题进行分析。由于客户投诉涵盖的范围很广,除包含极小部分的产品缺陷外,还包含大量的用户在产品全生命周期的使用过程中,尤其是工程、运维和检修阶段感受到的不良体验。绝大多数问题在正式投运前均已解决,未必会造成运行过程中的风险,但在解决的过程中仍然可能造成现场安装调试阶段、维护保养阶段等所耗费的时间增加。因此,这些反馈可更全面地反映产品的情况,解决这些潜在问题不但可以减少造成事故停电的可能性,还可进一步减少在其他环节,如工程安装、停电检修等阶段的耗时,对产品的全方面质量改进和功能升级均有重要的指导意义。

将这些短暂出现,多次操作或调整后仍可投入使用,但不足以造成运行故障的项目均列为“潜在运行风险”并进行统计,以全面体现客户反馈。

以A公司为例,潜在的运行风险主要来自于柜门、活门、断路器开关及接地开关等可运动部件。其中,48%的潜在运行风险主要来自于柜体,体现为柜门操作,门关不牢、机械电气闭锁冲突,从而可能造成现场开关门操作时五防联锁失效,门未关牢,燃弧防护等级因此无法保证等潜在运行风险;

其次为活门运动相关占比23%，主要表现为活门卡涩；第三是断路器和隔离开关底盘的运动相关，占比16%，往往体现为底盘机构卡涩，手车摇入不到位，从而可能造成主回路接触不良、载流能力下降的风险；排名较末的为接地开关相关7%和断路器相关占比为3%。

#### 4. 通过问卷调查进行补充

客户反馈数据，可较好地收集从客户角度可认知的产品潜在改进点，然而，由于客户反馈数据中存在部分客户不愿意反馈、反馈路径不通畅、反馈简略及问题定位不明确等情况，为进一步精准定位问题点，还可通过问题调查的形式，例如收集售后现场服务工程师的现场维护经验，通过分析进一步确认和分析具体的情况和可能的原因。

### 可行的智能化方向识别和设计思路

#### 1. 柜体智能感知

柜体相关的潜在运行风险主要体现为形变和错位，如柜体变形、柜门关不上或关不牢及活门运动卡涩，从而造成机械电气闭锁冲突、五防联锁失效等。

柜体的强度设计及五防联锁是运维人员生命安

全非常重要的一道防线。基于对安全的重视，五防联锁为强制的设计并在出厂检验中充分验证；越来越多的用户愿意付出更高的成本，选用具备燃弧防护等级的产品。虽然通过生产过程和出厂试验的严格把关，尽可能排除和减少工厂方面加工精度不良和装配误差等问题，但仍出现大量的现场反馈。因此，增加对开关柜各隔室状态和相应的联锁的全面智能感知，从而对运维人员安全提供进一步的防护有一定必要性。

通过在柜体设计过程中，在如断路器室门手柄（门闩）、断路器室门、上下活门、电缆室门及电缆室门手柄（门闩）等关键位置增加有限的几组位置信号，并结合手车闭锁、手车位置、开关位置和开关闭锁等信号，通过规定逻辑真值表进行实时状态校验，可在运维人员野蛮解除闭锁、门未关到位等情况时提供报警及正常操作提示。

图2展示了一种解决方案，通过在开关柜壳体增加几组简单的传感器，开关柜壳体设计时充分考虑其安装方式，共享开关柜内二次走线槽，可在仅增加少量辅助开关的情况下，全面感知开关柜各隔室及闭锁的状态，并通过声、光报警等手段对运维人员的错误和野蛮操作进行提醒。

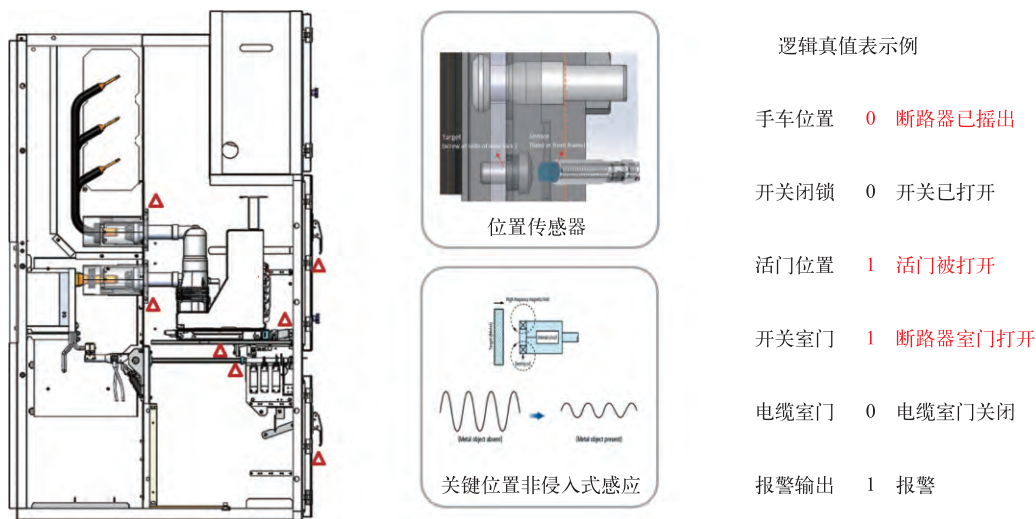


图2 柜体状态全面智能感知设计示例

#### 2. 温升、载流智能感知

载流故障，在行业事故统计中位列第三，占11%左右，主要反映为断路器或者隔离开关的触指与静触头搭接不良、电缆头部搭接不良等造成的局部温升过高。在A公司的客户反馈中，发生载流

故障的比例很小，仅与少部分现场的断路器开关操作有关。

在开关柜一次设计时须充分考虑以下几点：首先，为实现在线测温而增加的零部件应避免对原开关柜的绝缘设计造成任何负面影响，如宜采用嵌入

式设计将传感器预埋至主回路中；其次，智能监测部件在高电压环境下运行，须充分考虑其对一次回路的隔离与屏蔽，如通过自取电技术和无线通信避免二次走线，通过嵌入式和均压设计避免传感器承受高压感应电动势；第三，二次元器件的选型须考虑在开关柜内的运行条件，如高温、振动、抗干扰及长寿命等。由于温升监测的方案是在一二次的深度融合的基础上实现的，因此智能化零部件作为开关柜整体解决方案的一部分，须按照标准要求，与开关柜整体通过完整的型式试验验证，尤其是绝缘、温升、短时和峰值耐受电流等与主回路结构相关的试验及EMC试验。

图3为在一次回路设计初期即考虑完整嵌入在线测温模块的智能管型母线的解决方案示例。通过一体化的设计思路，将测温相关的元件嵌入一次主回路内，并通过自取电CT和RFID无线通信的方式实现了断路器触指与静触头搭接处6点、电缆头搭接处3点及主母线与分支母线处3点共计12点的无线测温功能，完整覆盖了现场安装和检修过程中常出现搭接不良的关键点。其内嵌式的设计，通过管形分支母线的布局，不仅优化了开关柜整体的场强分布，提高了载流效率，而且保证了测温点极其接近关键的搭接部位，结合一定的算法和经验数据可实现不同载流负荷下合理温升的判断，并输出诊断提示。此方案在不需热缩套管作为复合绝缘的情况下，在2019年推出的中置式UniGear ZS1 500 mm宽柜型中，除通过上述标准规定的各项型式试验项目外，还额外通过了DL/T 593规定的1.1倍温升试验以及凝露试验验证，近两年已有逾千台的良好运行业绩。

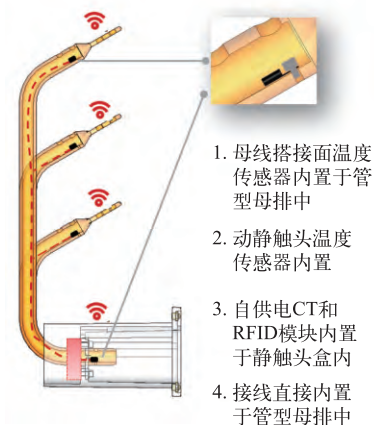


图3 温升智能感知举例——智能管形母线

### 3. 断路器开关、接地开关智能感知

与断路器开关底盘操作相关的运行潜在风险占比16%，这是由于导轨变形或底盘机构卡涩造成断路器开关摇入不到位，从而造成主回路可能接触不良、或者无法远程操作合闸的风险。接地开关相关操作的运行潜在风险占比为7%，主要体现为操作力较大、位置指示牌传动显示不准确等。由于断路器开关与接地开关的正确到位对设备运行安全及检修人员安全极其重要，用户除了要求有便于观察的观察窗外，更是提出“位置双确认”的要求，即要求在操作后，应有至少两组非相同原理或非同源的信号作为设备操作到位的判据。例如断路器开关位置的“双确认”，可由断路器开关底盘的辅助开关提供的试验、工作位置信号作为主要判据和位于低压室底部由断路器顶板驱动的辅助开关信号作为辅助判据组成。

通过断路器开关和接地开关的电动操作及其智能化控制和监测可以排除隐患。合理的电动机控制保护装置，需在操作过程中出现异常阻力、造成电动机电流异常增大时提供电动机保护，并且通过反转、解锁功能使得电动机与驱动装置脱离，避免后续排查故障时的手动操作对电动机及二次回路反向送电。根据开关柜与断路器摇入摇出操作时对应的电动机电流曲线，通过一定的算法识别出上述几个关键过程，并对其每次操作对应的阻力合理性进行分析，以对操作过程中主回路是否已可靠连接提供参考依据。还可通过对电动机电流的监测，结合辅助开关提供的位置信号，可取得电动接地开关的合分闸时间参考值，对比出厂参数或预设阈值可提供接地开关操作异常时的超时报警。

图4为接触器开关位置到位但触指实际未充分接触的情况举例。图5为触指咬合过程中一个典型的隔离开关电动机电流波形。



图4 隔离开关触指搭接不良举例

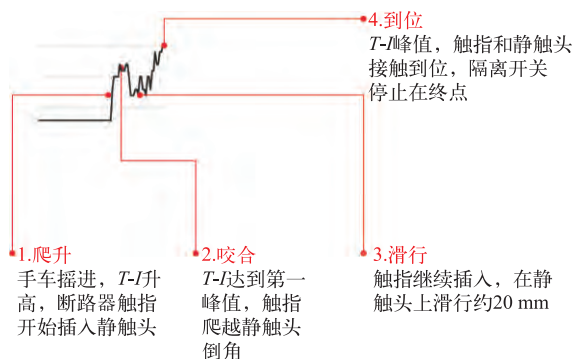


图5 触指与静触头咬合过程中电动机电流波形特征举例

随着一键顺控等配电网自动化解决方案的推广，选用电动隔离开关和电动接地开关的应用也日益增多。通过在电动机控制单元中加入对应的判断条件和保护逻辑，可实现上述电动机控制及堵转保护功能，简化现场运维检修的工作量。在增加电动机电流波形录波、事件记录与后台上传等功能后，还可结合开关柜的其他状态参量，分析电动机健康状态、断路器开关和接地开关与柜体配合情况等。

#### 4. 断路器智能感知

在行业事故统计中，断路器的分合闸线圈及储能电动机以及开关柜的二次（主要指二次接线、低压元件等）在总事故缺陷中占比约为48%，是断路器拒动作故障的主要原因。其他断路器相关的故障（如机构和灭弧）占比分别为4.2%和1.2%，远低于二次相关的缺陷。

断路器类故障在A公司产品上发生极少，所有潜在风险在所有反馈中占比不足3%，最常见缺陷同样是合分闸线圈和储能电动机。往往受现场环境影响，如长期的潮气或者盐分腐蚀线圈绝缘层，操作时电流瞬间增大发热，易发生绕组间短路并导致烧毁。此类故障仅通过停电检修手段不易排查。断路器的可靠动作是开关柜最关键的基础功能，而一旦拒动，其后果严重性大，因此，可尝试通过一定的智能化手段对其状态，尤其是二次控制回路相关部件的状态进行监测和综合评估。

通过和断路器出厂时对应的时间特性参数对比，可判断每次断路器操作时，整体操作过程是否在合理范围内，间接推断线圈、电动机和机械传动过程是否正常，从而对断路器的整体性能进行评估。对合分闸线圈和储能电动机电流的波形进行分

析，可用于判断操作及储能过程中各阶段对应的机构阻力是否出现显著变化，间接判断机构的运行状态。事实上，断路器出厂时均已通过上百次的操作磨合，机构的机械结构稳定性基本可得到保证，因此，主要的关注点还是通过与出厂参数对比，判断二次控制回路及线圈的状态。

需要注意的是，断路器的合分闸控制回路是保护控制的核心。因此，若需要对其状态进行监测，应采用非介入式的采集方式，可避免在控制回路上新增的触点造成其他不利影响，例如可通过霍尔线圈间接感应测量，如图6所示。



图6 通过霍尔传感器感应线圈电流，控制回路无须增加触点

#### 5. 其他

增加对开关柜运行环境的监测，如置于变电站或开关柜低压室的温度传感器可取得外部环境温度的参考值，置于断路器室和电缆室的湿度传感器可感应顶部滴水情况及电缆室的积水情况，可对开关柜的整体运行条件进行监测，并可为极端环境变化（骤冷、骤热及暴雨后漏水积水等）造成的负面影响提供预警。通过一定的模型，进一步结合开关柜运行参数（如断路器操作次数等），可综合评估开关柜的老化情况，为基于状态的主动运维和设备延寿等提供参考依据。结合前述几种监测手段，至此可较为完整地组成开关柜的全面智能感知。

#### 结束语

本文通过对用户运行数据及客户反馈等信息进行全面质量分析，识别可行的智能化开关柜设计思路及注意事项，并通过新一代的UniGear ZS1全面智能感知实例说明，在开关柜设计初期即通盘考虑智能化需求，可通过简洁高效的设计大幅提高设备的供电可靠性和安全性。EA

（收稿日期：2021-12-26）