

基于调度运行需求的带电作业标准化 作业流程与安全控制研究

孙广达, 吴 猛

(国网辽宁省电力有限公司朝阳供电公司喀左分公司, 辽宁 朝阳 122300)

摘 要 基于调度运行需求, 系统构建了配电带电作业的标准化作业流程体系, 涵盖作业计划申报、运行方式切换、作业态势同步与闭环评估等四个关键环节, 并配套设计了电气隔离校验、在线预警联动与应急跳闸机制等三项安全控制策略。通过融合调度系统数据、现场终端反馈及自动化装置运行逻辑, 实现了作业流程与调度体系的深度协同, 为提升带电作业安全性与调度响应效率提供了可行技术路径参考。

关键词 带电作业; 调度运行需求; 标准化作业流程; 安全控制

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.035

0 引言

在当前电力系统日益复杂与用电负荷持续增长的背景下, 电网调度运行对供电连续性和网络稳定性的要求显著提高。尤其在城市核心区、重要用户集中区或单电源供区, 传统依赖停电作业的检修方式已难以满足“不停电检修”与“运行不中断”的刚性需求。带电作业作为保障供电连续性、提升运维效率的重要手段, 在配电网中被广泛应用。然而, 长期以来, 带电作业与调度运行之间缺乏标准化的协同接口机制, 作业流程往往由配电单位主导, 调度系统只在作业前后进行部分告知或操作支持, 缺乏全过程的数据闭环与安全联动, 存在信息割裂、指令响应滞后及风险评估不一致等问题。随着电网调度系统朝着智能化方向不断升级以及配网自动化设备日益普及, 构建以调度需求作为核心导向的带电作业标准化流程体系, 已成为达成“作业与运行高度融合”这一目标的关键举措。在计划阶段, 需创建统一的信息接入机制, 以此保证作业计划可在系统可视化平台里完整呈现。而在作业实施进程中, 则要融合调度控制逻辑、设备状态监测以及风险预警机制, 构建协同的闭环控制模型。

1 基于调度运行的带电作业核心需求

1.1 作业计划与运行方式的动态协同一致性

在电网安全运行的框架范围之内, 任何带电作业的行为都要和当下电网的运行方式维持高度的契合度, 这就需要调度运行系统拥有对作业计划的动态评估能力, 调度中心在作业审批的环节要接入对于作业对象所处电气节点、主变运行状态以及断面潮流走向的全

景化分析, 并且结合能量流向计算来判断作业对于网络稳定性以及供电可靠性的潜在影响^[1]。举例来说, 在 10 kV 配电带电作业的过程当中, 如果目标设备处于负荷转供通道之上, 调度运行就要依靠运行方式的切换来实现风险的释放。另外, 还应当对带电作业区域短期负荷进行预测, 以此来评估未来 2 小时至 4 小时之内负荷波动对于作业的安全容许程度。

1.2 调控联动下的作业安全区识别与设备状态建模

带电作业的关键之处在于“作业过程里的局部隔离”, 而调度系统要借助设备状态精细建模来明确这一局部作业安全区域。在常规的 GIS 或者 DMS 系统当中, 设备状态大多采用开断状态二值模型, 很难满足带电作业场景下对复杂隔离态的精确识别需求。调度系统要依据拓扑图以及一次接线模型, 叠加隔离开关、接地刀闸、联络开关的实际联动约束, 构建三态模型, 实现带电作业设备处于“电气隔离”状态的动态校验。例如: 对于 T 接分支、同杆多回、线路并列走线等复杂场景, 应当引入等效阻抗建模以及电压电流反演算法, 判断临近设备因为寄生电容或者互感效应可能产生的剩余感应电压, 将其作为判定是否有安全带电作业条件的关键依据。

1.3 突发工况下的作业应急响应机制与调度预案适配

带电作业的时候会遇到不少突发事件, 如突发性负荷增长、雷击导致电压暂降、作业设备不小心碰到、保护误动等情况, 若这些事件处理不好很容易引发连锁故障, 甚至会让停电范围扩大。调度运行系统需建

立带电作业场景下的快速响应机制,保证在毫秒到秒级的响应时间里完成状态切换和保护恢复^[2]。从技术实现角度来说,一方面,调度端要建立面向带电作业工况的应急预案模型库,依靠预设参数匹配机制,如根据 SCADA 实时采集数据和标准波动曲线对比来触发预案。比如说,若某馈线作业时段检测到电压下降超过 10%,就要马上匹配“分段停电+备用投入”的预案策略;另一方面,配电自动化终端要通过高速通信通道和调度主站定期握手,保证现场异常状态能在秒级上传并得到调度反馈。

2 基于调度运行需求的带电作业标准化作业流程

2.1 作业计划申报与调度协同审批机制

标准化流程的首要环节在于作业计划的统一申报与调度审批流程协同,配电运维单位制定带电作业计划时,要借助统一的作业管理平台来进行计划申报。此平台应拥有与电力调度自动化系统实时对接的能力,实现对作业线路、电压等级、供电区域、负荷密度等关键参数的自动匹配并同步入库。作业单位要在平台里明确填写“作业地点 GIS 编码”“涉及设备拓扑号”“预计作业窗口”“负荷转供方案”“电流—电压实时曲线参考”等技术信息,调度系统依据 SCADA 历史数据、潮流仿真系统以及 AVC/FLISR 策略对作业区域的电气稳定性展开模拟演算,针对是否会引发低电压、重载、转供过渡波动等情况进行技术论证。

2.2 作业前运行方式切换与电气隔离确认

带电作业开展之前,标准化流程要启动运行方式调整以及电气隔离确认机制,以此保证调度主站和现场作业单位对电气模型有一致的认知。调度员要按照作业计划的拓扑结构,借助潮流计算软件如 PowerFactory、PSS/E 来模拟调整后的电网运行方式,并且依靠操作票系统比如 D5000 操作票模块编制切换方案,如投切联络开关、分段重构潮流路径、调整分布式电源控制逻辑等,保证作业点处于最低负荷影响区域内。现场单位要依据调度下发的电气模型图,使用智能终端也就是带电作业智能终端 PAD 完成对作业点的电气隔离判别,包含母线对地电压测试、剩余感应电压测量、邻线感应磁场识别等。

2.3 作业实施阶段的同步监测与指令响应机制

在作业正式开始执行的阶段,需要建立起作业态势感知与调度指令交互可同步运行的机制,在作业点要布置一套轻量化的电气参数在线采集装置,如便携式电压互感器 (PT)、剩余电流探测装置以及无线

振动传感器等。这些装置的信号借助配电自动化终端 (FTU/DTU) 回传到调度主站,调度员可实时观察作业点以及与其相邻节点的电压、电流、有功、无功功率的变化情况,以此来判断是不是存在系统稳定性异常。

2.4 作业完成后的恢复闭环与评估反馈流程

当作业完成之后,需要执行标准化的运行方式恢复以及作业质量评估闭环流程,作业单位要在系统里登记“作业完工”状态,并且凭借现场操作终端上传作业完成的照片、作业报告、实际使用工具的编号、人员签字记录以及复测数据。调度系统要启动一次运行方式复核,其中囊括潮流恢复路径验证、保护定值复位确认、AVC/功率因数调节策略重新闭环^[3]。在运行方式恢复之前,调度主站需要对比作业前后 GIS 模型的一致性,还要启动同步核相流程,以保证复电前母线间电压差、相序、频率等处于许可范围之内。

3 基于调度运行需求的带电作业标准化作业安全控制策略

3.1 融合调度系统的作业全过程电气隔离安全校验机制

在配电网带电作业当中,保证作业区域电气隔离的真实有效性是调度运行控制体系的首要安全要求。以往依靠作业人员现场测量来判断能否开展带电作业,缺少系统层面的二次确认机制,存在误判以及误操作的风险,要构建由调度系统主导的电气隔离智能校验机制,借助 GIS 系统、电气拓扑实时演算模块以及遥信/遥测信息流融合分析作业点的“电气隔离等级”。展开来说,调度系统在作业许可阶段,自动提取作业点所属的馈线编号比如 F3051、节点号比如 N113、相位信息比如 A/B/C 相以及物理距离矩阵,结合实时 SCADA 数据分析其上下游断点开关状态、母线电压状态、电流流向与幅值,若在断开开关比如 K123 之后仍然检测到 0.25 A 至 0.4 A 的残余电流,系统就会判断存在感应电压或电容耦合,并且自动判定为“隔离不合格”,推迟作业流程启动。

3.2 作业实时态势监测与安全预警联动系统设计

为了可实时掌握带电作业过程中电气安全状态的变化情况,需要构建以调度端为主导的作业态势在线监测以及智能预警系统,以保证在作业过程中一旦出现波动或者突发变化,就能自动触发联动响应机制。该系统主要由三部分构成,分别是作业点参数采集终端、DMS 系统接入层以及调度主站实时运算核心。在具体实施的过程中,每个带电作业点都要布设多点采集

终端, 这些终端包含电压 / 电流互感器、剩余电流传感器、环境温湿度传感器以及三轴震动传感器等, 并且借助 LoRa 或者 5G 通信协议接入就近的 DTU, 然后再汇总到配电自动化系统, 调度主站在接收到数据之后, 会依据设定的模型来开展态势分析。例如: 如果正常情况下 A 相电流是 35 A, 在作业过程中突然下降到 10 A 或者上升到 50 A, 那么调度系统就会依据 $\pm 30\%$ 偏差策略自动标注为“黄色警报”, 暂停部分功率调度逻辑, 若电压波动超过 $\pm 5\%$, 系统就会执行“红色警报”策略, 自动发出作业暂停指令。

3.3 调控—现场联动的应急处置机制与智能跳闸策略

在类似误碰带电体、设备放电、相间短路等突发事件场景当中, 调度系统要拥有可实现高效联动的应

急跳闸机制以及智能断电策略, 目的在于在不使事故影响范围扩大的情况下, 最大程度地保障人员与系统的安全^[4]。这种机制的设计应当覆盖三类动作策略: 一是差动保护级紧急跳闸, 时间控制在小于 100 ms; 二是中级保护级速断动作, 时间范围是 300 ~ 500 ms; 三是人工介入级断电操作, 时间上限为 ≤ 3 s。调控与现场联动的应急处置机制分级标准在表 1 中有所呈现。

一方面, 对于作业点对应设备如 T 接分支点开关 Q52 所属的线路段而言, 需要部署有区段识别以及智能分断功能的 FTU, 这种 FTU 可支持事件驱动式跳闸, 在作业阶段, 调度系统会把该段纳入临时的“跳闸授权模式”, 如此一来, 现场的 FTU 就可以依据预设逻辑自动进行断电操作^[5]。例如: 若作业线电流突然上升到正常值的 4 倍, FTU 会直接下发脱扣信号, 并且推送

表 1 调控—现场联动的应急处置机制

跳闸类型	触发条件示例	响应时限	典型动作系统	电气参数阈值设定
一级: 差动保护级跳闸	作业点发生相间短路 ($I_a=I_b \neq 0$)	< 100 ms	差动保护继电器 (87)	$\Delta I > 3 \times I_n$, 持续时间 > 30 ms
二级: 速断保护级跳闸	设备误碰引发过流	300 ~ 500 ms	微机保护装置 (50/51)	$I > 4 \times I_n$, 零序电流 > 20 A
三级: 调度人工干预跳闸	电压骤降、电流扰动、感应电弧等异常	≤ 3 s ($\leq 1\ 800$ ms)	调度系统 + DMS 联动	U 跌落 $> 15\%$, 振动幅度 > 5 g, 场强 > 80 V/m
自动化跳闸触发接口	LoRa/5G 通信链路心跳中断 > 3 次	≤ 1 s	FTU/DTU 边缘装置	通信失联 + 设备热斑超限 ($T > 85$ °C)
应急负荷切除联动策略	作业突发电弧 $\rightarrow$ 低压 $\rightarrow$ 负荷波动	2 ~ 3 s	FLISR 系统 + 调度指令	PQ 波动 $> 30\%$, 用户侧电压 < 9.5 kV

给调度系统去执行联动隔离指令; 另一方面, 调度系统应当配套建立故障区域快速定位的机制, 结合分布式 PMU 装置的数据, 借助相位突变时间差以及波形分析等技术实现故障点的精准定位, 可快速识别是不是存在作业区域误操作所导致的情况。

4 结束语

在构建智能化配电网与高可靠性运行体系的背景下, 带电作业不仅是应对不停电需求的核心手段, 更是调度运行模式升级的关键触点。以调度需求为核心出发点重构带电作业标准流程, 不仅体现了运行控制体系对作业行为的系统统筹能力, 也展现了作业风险治理逐步走向数据驱动、智能决策的现代技术路径。通过计划申报、方式切换、实时感知与恢复评估的全过程标准化流程体系, 调度系统不再是作业的旁观者, 而成为全过程协同主体。而多维安全控制机制的嵌入

则进一步实现了从“授权式放行”到“感知式防控”的转变, 构建起以系统数据为核心支撑的安全闭环链条。

参考文献:

- [1] 陈德俊. 10kV 配网架空线路带电作业标准化作业流程探析 [J]. 中国科技纵横, 2016(24):152.
- [2] 朱皓榛, 张瑜琦. 配网带电作业作业流程的优化与标准化管理 [J]. 文渊 (小学版), 2023(10):217-219.
- [3] 周兴, 施震华, 胡伟, 等. 虚拟仿真技术在配电网带电作业中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(06):188-189.
- [4] 彭喜钊. 配电带电作业和停电检修配合的研究与应用分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2021(12):338-339.
- [5] 陈盟, 冯刚, 周桂萍, 等. 特高压输电线路带电作业标准化培训体系探究 [J]. 山东电力高等专科学校学报, 2017(03):20.