

老旧变电站土建加固与电气智能化协同改造及效益评估

胡红帅

滁州东源电力工程有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4950

[摘要] 我国电网规模扩大、能源结构转型,上世纪中后期投运的老旧变电站面临设备老化、结构安全不足、自动化水平低等挑战,难以满足新型电力系统发展需求。本文针对此问题,提出土建结构加固与电气系统智能化升级深度融合的协同改造方案。先系统分析老旧变电站土建与电气双重缺陷及耦合风险;接着创新构建“诊断-规划-设计-实施-评估”五阶段协同改造方法论,并详述各阶段关键技术与集成策略;再建立涵盖安全、经济、社会和环境四维的综合效益评估体系,量化论证协同方案优越性。研究表明,协同改造模式可提升变电站整体性能与全寿命周期价值,规避传统分步改造的重复投资、工期延长和兼容性差等问题。

[关键词] 老旧变电站; 土建加固; 智能化升级; 协同改造; 综合效益评估

中图分类号: TM63 **文献标识码:** A

Renovation and Benefit Assessment of Old Substations through Synergistic Civil Reinforcement and Electrical Intelligent Retrofitting

Hongshuai Hu

Chuzhou Dongyuan Electric Power Engineering Co., Ltd.

[Abstract] With the expansion of China's power grid scale and the transformation of energy structure, old substations put into operation in the mid to late last century face challenges such as equipment aging, insufficient structural safety, and low automation levels, making it difficult to meet the development needs of new power systems. To address this issue, this paper proposes a collaborative transformation scheme that deeply integrates civil structure reinforcement and electrical system intelligent upgrading. It first systematically analyzes the dual defects of civil structure and electrical systems in old substations and their coupling risks. Then it innovatively constructs a five-stage collaborative transformation methodology of "diagnosis - planning - design - implementation - assessment," detailing key technologies and integration strategies at each stage. Subsequently, a comprehensive benefit assessment system covering four dimensions of safety, economy, society, and environment is established to quantitatively demonstrate the superiority of the collaborative scheme. Research shows that the collaborative transformation mode can improve the overall performance and life-cycle value of substations while avoiding problems such as repeated investment, extended construction periods, and poor compatibility associated with traditional step-by-step transformation.

[Key words] old substation; civil reinforcement; intelligent upgrading; collaborative transformation; comprehensive benefit assessment

引言

变电站是电力系统核心节点,20世纪50至90年代我国投运大量变电站,保障了经济发展与民生用电。但历经数十年运行,老旧变电站问题凸显:土建结构受当时条件限制,加上长期服役,承载能力严重退化,有安全隐患;电气系统设备陈旧、技术落后,难适应电网发展新要求。传统改造割裂土建与电气,先加固土建再升级电气,导致项目周期长、成本高,还可能因前期未考

虑后期需求而二次返工或功能受限,降低改造效率与效益。因此,探索统筹兼顾、深度融合的协同改造方案,实现综合效益最大化,是电网资产管理和新型电力系统建设的迫切需求。本研究旨在填补该领域理论与实践空白,为老旧变电站改造提供系统性方案。

1 老旧变电站的典型缺陷与耦合风险分析

1.1 土建结构的主要缺陷

老旧变电站的土建结构缺陷主要体现在以下几个方面:一是承载能力不足:早期设计规范的安全系数较低,且随着设备更新换代,新型智能化设备(如预制舱式二次设备、大型GIS组合电器)的重量和尺寸往往远超设计预期,导致梁、板、柱等承重构件出现超载风险^[1]。二是耐久性劣化:长期暴露于户外环境,混凝土结构易发生碳化、冻融破坏及氯离子侵蚀,引发内部钢筋锈蚀膨胀,进而导致混凝土开裂、剥落,严重削弱结构的整体性和刚度。三是抗震性能薄弱:许多老旧变电站建设时未充分考虑抗震设防,或设防烈度远低于现行规范要求。在地震作用下,结构易发生脆性破坏,威胁内部电气设备的安全。四是空间布局不合理:早期变电站设计紧凑,设备间距小,电缆沟道狭窄且杂乱,缺乏为未来智能化设备预留的安装空间和维护通道。

1.2 电气系统的主要缺陷

电气系统的缺陷则表现为:①设备老化与技术落后:主变压器、断路器、隔离开关等一次设备绝缘老化、机械特性下降;继电保护及自动化装置基于模拟量或早期数字技术,可靠性低、功能单一。②自动化与信息化水平低下:缺乏统一的数据采集与监控平台,各子系统(如SCADA、继电保护、消防、安防)相互独立,形成信息孤岛,难以实现全局状态感知与协同控制。③运维模式粗放:依赖定期检修和事后处理,缺乏基于设备状态的预测性维护能力,运维成本高且效率低下。

1.3 土建与电气缺陷的耦合风险

上述两类缺陷并非孤立存在,而是相互影响、彼此加剧,形成复杂的耦合风险:①结构安全制约智能化升级:若土建承载力不足,将无法安装更重、更大的新型GIS设备或预制舱;若空间布局不合理,则难以敷设智能化所需的大量光纤和通信线缆。②电气改造需求驱动土建变更:智能化升级需要新增大量的传感器、交换机、服务器等设备,对楼板荷载、设备基础、电缆夹层高度等提出了新的要求,迫使土建结构必须进行相应改造。③施工交叉干扰:若土建与电气施工不同步,土建施工产生的粉尘、振动会严重影响精密电气设备的安装调试;反之,电气设备的吊装也可能对已完成的土建加固部位造成损伤。因此,必须打破专业壁垒,从系统工程的角度出发,进行一体化的协同规划与设计。

2 协同改造方案设计

为有效应对上述挑战,本文提出“诊断-规划-设计-实施-评估”五阶段协同改造方法。

2.1 第一阶段:精准诊断与综合评估

在土建方面,需要综合运用回弹法、超声波法、雷达扫描、钢筋扫描仪等多种无损或微损检测技术,对主体结构的混凝土强度、碳化深度、钢筋锈蚀状况以及裂缝的分布与走向等关键参数进行精确量化,并严格依据《工业建筑可靠性鉴定标准》等现行规范,对结构的安全性进行科学评级。在电气方面,则需利用红外热成像、局部放电检测、油色谱分析等先进手段,全面评估一次设备的健康状态;同时,必须细致梳理现有二次系统的整体架构、所采用的通信协议以及各项功能实现情况,准确识别其

与当前主流智能化标准(如IEC61850)之间存在的差距^[2]。最终,将所有来自土建和电气两个维度的诊断数据进行深度融合,构建一个包含土建剩余寿命、电气设备状态、智能化潜力等多维度的综合评估模型,从而清晰地界定出改造的优先级、技术边界和核心约束条件,为后续工作提供坚实的数据支撑。

2.2 第二阶段:协同目标与整体规划

多专业团队需在精准诊断后共同协商,制定清晰、一致且具前瞻性的改造目标,着眼未来十五到二十年发展,预留智能化迭代空间,达成共识后再展开整体规划。首先,要重新审视并明确改造后变电站在整个区域电网中的功能定位,是作为区域枢纽还是负荷中心,这直接决定了其所需达到的智能化水平。其次,在技术路线的选择上,土建加固应优先考虑那些对生产运行影响小、施工便捷高效的新技术,例如高强灌浆料或预应力碳板;而电气升级则应大力推行模块化、标准化的智能组件,以提高系统的可靠性和可维护性。最为关键的是,必须进行空间与荷载的统筹规划,联合绘制BIM(建筑信息模型)三维协同设计底图,在虚拟空间中精确模拟所有计划新增设备的位置、重量及所需的操作维护空间,提前发现并解决潜在的物理冲突,确保规划的科学性和可实施性。

2.3 第三阶段:一体化协同设计

土建设计必须主动为电气智能化升级创造有利条件。这意味着在进行结构加固设计的同时,就要同步预埋好智能化系统所需的各类线槽、管道、专用接地网以及定制化的设备基础。例如,在对楼板进行加固处理时,可以巧妙地在其加固层内部预埋光纤导管;在墙体加固或新建隔墙时,应预先留出用于安装各类环境和设备状态传感器的孔位;更重要的是,要将原有的接地网改造升级为一个低阻抗、高可靠性的复合接地系统,以满足智能化设备对电磁兼容性的严苛要求。与此同时,电气设计也应积极为土建减负。通过优先选用轻量化、小型化的智能一次设备,如用电子式互感器替代笨重的传统油浸式互感器,可以从源头上减轻对土建结构的荷载压力。采用工厂预制、现场拼装的预制舱式二次设备,不仅能大幅缩短现场施工周期,还能显著减少现场的土建工作量^[3]。此外,还应进行系统层面的集成设计,规划一个统一的站域数据中心,用于高效集成所有智能电子设备(IED)产生的海量数据,并清晰定义好与上级调度中心、集控中心的标准化通信接口,为未来的高级应用奠定坚实的硬件和软件基础。

2.4 第四阶段:精细化协同实施

首先体现在施工组织上,需要制定一份极其详尽的交叉作业计划,科学安排土建与电气专业的并行作业面,优化施工工序。例如,在土建专业进行室内精装修的同时,电气专业可以在工厂内同步完成预制舱的出厂调试;一旦土建专业完成了电缆沟道的修复和清理,电气专业便可立即进场进行光缆的敷设,最大限度地压缩关键路径。全过程BIM技术的应用是实现精细化协同实施的有力保障。通过将BIM模型与时间、成本维度相结合,进行4D/5D施工模拟,项目管理者可以动态地预见资源冲突、调

整人力物力分配,有效避免窝工和返工现象的发生。此外,为了最大限度地减少对社会用户的供电影响,应积极采用移动式变电站、旁路带电作业等先进技术,实施“不停电”或“少停电”的改造策略,这不仅是技术上的突破,更是协同方案所带来的重要社会效益的直接体现。

2.5第五阶段:全维度效益评估

改造工程竣工并非终点,而是启动效益评估程序、形成管理闭环的起点。这一阶段旨在对整个协同改造项目的成果进行全面、客观的衡量,以验证方案的有效性,并为未来的类似项目积累宝贵经验。

3 综合效益评估体系构建

3.1安全效益

安全效益是衡量改造成功与否的首要标准。它可以通过多个维度进行量化评估。首先是结构安全的提升,通过对比改造前后结构的安全等级评定结果或关键承重构件的承载力富余度,可以直观地反映出土建加固的成效。其次是系统可靠性的增强,这可以通过计算改造后变电站的强迫停运率(FOR)或平均故障修复时间(MTTR)的降低幅度来体现,智能化的保护与控制系统能够更快地隔离故障、恢复供电。最后,还应考虑风险规避所带来的隐性价值,即通过本次改造消除了因结构倒塌、设备短路等重大事故所可能导致的潜在经济损失,这部分价值虽然难以精确计算,但在综合评估中不容忽视。

3.2经济效益

经济效益的评估需要从全寿命周期的视角出发。最直接的体现是工程总投资的节约。通过协同改造,可以有效避免传统分步模式下因重复开挖路面、二次搬运设备、设置临时过渡措施等环节所产生的额外费用,通常能够节约百分之十到二十的工程成本。其次,改造后的运维成本将显著降低。智能化系统支持的状态检修模式,可以根据设备的实际健康状况安排维护,取代了过去一刀切的定期检修,预计可减少三成以上的检修费用;同时,远程监控和智能巡视等功能可以大幅降低人工巡检的频次和强度。综合来看,尽管协同方案的初期一次性投资可能略高于仅做必要修补的传统方案,但由于其显著延长了资产的使用寿命并大幅降低了长期的运维支出,其全寿命周期成本(LCC)优势是十分突出的。

3.3社会效益

一是协提升供电可靠性,改善用户用电体验。改造显著降低设备故障率,增强故障快速识别与隔离能力,有效减少停电频次与时长,切实提升居民和工商业用户的用电连续性与满意度,助力优化“获得电力”营商环境。二是节约城市土地资源,践行集约发展理念。通过原址改造替代异地新建,避免新增建设用地需

求,减少征地拆迁、交通干扰及环境扰动,在缓解城市用地紧张的同时,降低社会综合成本,符合绿色低碳与可持续发展的要求。三是增强城市基础设施韧性。智能化升级提升了变电站的负荷适应能力、自愈能力和抗风险水平,为关键用户和重要场景提供更可靠的电力保障,支撑智慧城市与韧性城市建设。四是形成可复制推广的行业范式。协同改造整合了结构安全、智能感知、数字运维等多领域技术,构建起覆盖设计、施工到运维的标准化路径,为全国同类项目提供成熟经验,推动电力行业从“增量建设”向“存量焕新”转型。

3.4环境效益

在“双碳”目标的大背景下,环境效益日益成为项目评估的重要组成部分。协同改造模式通过避免大规模的拆除重建,直接减少了由此产生的巨量建筑垃圾,减轻了对城市环境的压力。同时,由于无需生产大量新的建筑材料(如水泥、钢材),也间接避免了建材生产过程中所消耗的能源和产生的碳排放。此外,在改造过程中,还可以对部分经评估尚可继续利用的旧设备、旧建材进行回收再利用,进一步践行了循环经济和绿色发展的理念。

为了对上述四个维度的效益进行综合量化,可以采用层次分析法(AHP)或模糊综合评价法等成熟的决策工具,通过专家打分等方式对各项指标进行赋权,最终计算得出一个能够全面反映协同方案价值的综合效益指数。

4 结语

本文系统研究老旧变电站土建加固与电气智能化升级协同改造问题,构建“五阶段”协同方法论及多维度综合效益评估体系,论证出协同模式较传统分步改造优势显著。核心结论有三:一是面对老旧变电站双重缺陷,割裂改造难以为继,深度融合协同方案是保障电网安全高效运行、实现资产价值最大化的必由之路;二是BIM技术为多专业协同设计等提供数字化平台,是实现精准协同的核心工具;三是协同改造在安全、经济、社会和环境层面效益显著,契合可持续发展理念。未来可进一步探索人工智能在改造方案优化、数字孪生技术在运维中的应用,以及协同改造模式标准化、产品化,以协同思维推动老旧变电站焕新,对构建现代能源体系意义深远。

[参考文献]

- [1]高歌,王德敏,高汉雄,等.浅析变电站小型化改造土建施工困难与路径[J].农村电气化,2025,(05):14-17+72.
- [2]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.
- [3]吴海涛.智能变电站二次设备自动化升级:技术挑战与解决方案[J].新发现,2025,(14):118-120.