

高低压成套电气设备的模块化设计与标准化研究

李光 郑小锋 宋建敏^(通讯作者) 傅杰 龚立俊
信一电力设备有限公司 浙江温州 325000

【摘要】高低压成套电气设备是电力系统核心载体，其设计水平影响供电可靠性与经济性。新型电力系统建设和“双碳”目标下，传统设计模式有结构冗余、通用性差、运维低效等问题，难以适配智能化、绿色化转型。模块化设计与标准化是解决行业难题、推动技术迭代的关键。本文以该设备为对象，结合理论分析与逻辑推演，探讨模块化设计原则、架构与路径，剖析标准化建设问题与策略。构建模块化与标准化体系，可实现全流程高效协同与资源复用，为设备技术升级、行业规范发展及电力系统安全运行提供理论支撑与实践指引。

【关键词】高低压成套电气设备；模块化设计；标准化体系；接口统一；全生命周期管理

Modular Design and Standardization Research for High and Low Voltage Complete Electrical Equipment

Li Guang Zheng Xiaofeng Song Jianmin^(Corresponding Authors) Fu Jie Gong Lijun

Xinyi Electric Power Equipment Co., Ltd. Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】 High and low voltage complete electrical equipment serves as the core component of power systems, where its design quality directly impacts power supply reliability and cost-effectiveness. Under the development of new power systems and the "dual carbon" goals, traditional design approaches exhibit issues such as structural redundancy, limited versatility, and inefficient operation and maintenance, making them inadequate for adapting to intelligent and green transformation initiatives. Modular design and standardization are pivotal in addressing industry challenges and driving technological advancement. This study examines such equipment through theoretical analysis and logical reasoning, exploring modular design principles, architectures, and implementation pathways while identifying key challenges and strategies for standardization. Establishing a modular and standardized framework enables efficient end-to-end collaboration and resource reuse, providing both theoretical foundations and practical guidance for equipment technology upgrades, industry standardization, and secure power system operations.

【Key words】 High and low voltage complete electrical equipment; Modular design; Standardized system; Unified interfaces; Full lifecycle management

引言

电力工业是国民经济基石，高低压成套设备作为连接电源与负荷的关键，其性能直接关乎电网安全。随着新型电力系统建设与新能源并网加速，智能电网对设备提出更高要求。然而，传统“定制化”模式存在结构不规范、通用性差、兼容难等弊端，导致设计周期长（平均15-20天）、零部件复用率低（不足30%）及运维成本高（检修延误超40%）。

行业现状呈现“低端过剩、高端不足”的结构性矛盾：截至2023年底，全国8500余家企业中76%为年产能不足1亿元的中小企业，平均产能利用率仅55%；而高端市场虽年增18.5%，核心元器件国产化率却不足40%，长期由外资主导。破局关键在于技术创新。

模块化设计通过将复杂系统拆解为独立、可重组的标准模块，能显著提升效率、降低成本并增强灵活性，而标准化是其实现兼容互换的前提。针对当前研究多聚焦单一模块、缺乏系统架构理论的现状，本文聚焦高低压成套设备，开展理论分析与推演，明确模块化设计原则、架构体系及实施策略，构建协同优化机制，旨在为行业转型升级与规范化发展

提供坚实的理论支撑。

1 高低压成套电气设备模块化设计与标准化的理论基础

1.1 模块化设计的核心内涵与理论支撑

模块化设计是将复杂的高低压成套电气设备按功能属性拆解为若干功能独立、结构完整、接口统一的基本模块。每个模块可单独设计、制造与维护，通过标准化接口快速组合，以满足不同场景需求。其本质是“功能分解与集成”，旨在提升通用性、灵活性与可扩展性，缩短周期并降低成本。

其理论支撑涵盖系统工程、标准化及协同设计理论。系统工程强调整体优化，通过功能重组提升性能；标准化理论提供规范依据，实现资源复用；协同设计理论则促进设计、生产、运维各环节高效衔接。相比传统定制化，模块化优势显著：一是通用性强，提升零部件复用率；二是灵活性高，通过模块替换快速调整功能；三是效率高，支持并行设计与批量生产；四是运维便捷，支持单模块检修升级，降低安全风险。

1.2 标准化的核心内涵与理论支撑

标准化是在设备全生命周期建立统一的技术与管理标准,确保性能、结构、接口及质量规范,实现通用互换。它是模块化设计的前提,缺乏标准体系,模块无法有效衔接。

其理论支撑包括标准化、质量控制及产业协同理论。前者规范行业发展,优化资源配置;后者保障模块质量;产业协同理论则打破壁垒,推动上下游协作。标准化涵盖五个维度:设计(结构、参数)、制造(工艺、材料)、接口(连接方式、电气机械参数,为核心)、测试(项目、方法)及运维(安装调试、检修流程)。

1.3 模块化设计与标准化的协同关系

二者相辅相成、辩证统一。标准化是基础,确保模块的通用性与互换性,无统一标准则模块划分无序,模块化失去价值;模块化是延伸,将标准化贯穿全生命周期,实现个性化定制与规模化生产结合,推动体系完善。

协同推进可实现全流程高效协作,提升全生命周期经济性,推动行业向“高端智造”转型。实践表明,某头部企业推行该模式后,设计周期从15天缩至9天,生产效率提升40%,零部件复用率超70%,运维成本降低30%,充分印证了协同设计的巨大价值。

2 高低压成套电气设备模块化设计的核心原则与架构体系

2.1 模块化设计的核心原则

模块化设计需遵循五大核心原则。一是功能独立性,确保各模块功能边界清晰、无重叠,便于独立设计测试,降低干扰。二是接口标准化,统一机械尺寸与电气参数,实现“即插即用”及跨厂家兼容。三是通用性与兼容性,提升模块在不同型号设备间的复用率,适配新型电力系统需求,部分通用出线模块复用率可达80%以上。四是可扩展性与可维护性,支持热插拔与快速升级,将检修时间从2小时缩至15分钟。五是经济性,通过批量生产与标准化降低全生命周期成本,平均降幅超25%。

2.2 模块化设计的架构体系

构建“系统级-单元级-组件级”三级架构。系统级为最高层,按应用场景分为高压输配电与低压分配控制模块。单元级为核心层,涵盖进线、出线、保护、监测、控制及辅助六大功能单元,承担具体业务逻辑。组件级为基础层,包括断路器、母线等标准化元器件,确保互换性。该架构通过层级化分解与集成,显著提升效率与灵活性。实践表明,采用该架构的高压开关柜设计周期缩短60%,生产效率提升50%,运维成本降低35%。

2.3 模块化设计的关键技术要点

关键技术涵盖四方面。首先是模块划分,采用“自上而下”与“自下而上”结合法,平衡功能独立与系统稳定,避免划分过细或过粗。其次是接口设计,机械接口确立标准安装结构,电气接口明确电压、电流及通信协议;如母线接口经激光焊接与镀银处理,接触电阻 $\leq 30\mu\Omega$,短路耐受达

100kA/1s。再次是结构优化,利用立体交错母线等技术缩减设备体积30%以上,并优化散热以保障稳定运行。最后是智能化集成,在模块中嵌入智能传感器与控制器,如集成NFC温度标签实现200个测点精准监测(精度 $\pm 1^\circ\text{C}$),支撑远程运维与自动控制,适配智能电网发展需求。

3 高低压成套电气设备标准化体系的核心内容与现存问题

3.1 标准化体系的核心内容

标准化体系覆盖设备全生命周期,包含五大核心内容。一是设计标准化,统一额定电压、短路耐受电流等关键参数及模块划分原则,兼顾智能化与绿色化需求,确保方案通用兼容。二是制造标准化,规范材料选用、生产工艺及质量检验流程,保障产品一致性。三是接口标准化,作为体系核心,统一机械、电气及通信接口,实现模块互换及与智能电网、分布式能源的顺畅对接。四是测试标准化,明确绝缘、耐压及短路耐受等测试方法,如低压绝缘电阻不低于 $10\text{M}\Omega$,高压耐压按额定电压1.5倍执行,确保质量可靠。五是运维标准化,规范安装调试、检修周期及升级流程,建立档案以提升效率并延长寿命。

3.2 标准化体系现存的主要问题

当前标准化体系虽已初步建立,但仍面临四大瓶颈。首先,标准体系不完善且“碎片化”。不同领域标准缺乏协同,存在交叉冲突或空白,高低压设备标准割裂,缺乏统一的模块划分与接口规范;同时标准更新滞后于技术发展,难以适配新兴场景。其次,接口标准化程度低,互换性差。各厂家在出线模块尺寸、电气参数及通信协议上各自为政,自定义协议导致模块无法互换、系统通信受阻,严重制约模块化推广并增加成本。再次,标准执行力度不足,质量参差不齐。部分企业为降本违规生产、偷工减料,行业缺乏有效监督与严厉处罚机制,致使不合格产品流入市场。最后,国际接轨程度不高,竞争力弱。国内标准多聚焦本土,部分技术指标低于国际水平,尤其在智能化、绿色化领域差距明显,且参与国际标准制定的话语权不足,阻碍了产品的国际化进程。

4 高低压成套电气设备模块化设计的实现路径

4.1 科学划分模块与优化接口设计

模块划分是设计基础,需基于功能需求分析,将设备自上而下拆解为独立的单元级与组件级模块。划分过程须严格遵循功能独立原则,避免重叠缺失,并预留扩展接口以确保通用性。在此基础上,核心在于优化接口设计以实现“即插即用”。机械接口应采用标准化导轨与定位结构,统一安装尺寸与固定方式;电气接口需规范端子排参数及通信协议,确保电能传输与信号交互顺畅。同时,建立严格的接口兼容性测试标准,对不同厂家模块进行互换性验证,消除物理与电气壁垒,从根本上提升设备的灵活性与可扩展性。

4.2 推进模块智能化集成

适配新型电力系统需求,必须将智能化技术深度融入模块化设计。首先,在模块内部集成智能传感器与控制器,实时采集电压、电流、温度等关键参数,通过边缘计算实现异常预警与自动调节,提升运行可靠性。其次,推进模块数字化与网络化,将运行状态转化为数字信号上传至监控中心,构建数据共享与协同控制网络。最后,开发配套的智能运维系统,支持远程监测、故障诊断及固件升级,减少现场人工干预。实践表明,智能模块化开关柜可使运维效率提升60%以上,显著降低全生命周期成本,满足电网数字化转型的关键需求。

4.3 构建全流程协同设计与反馈机制

高效实施模块化设计需建立跨部门协同机制。组建整合设计、生产、装配及运维资源的联合团队,明确职责分工,打破信息孤岛。依托协同设计平台,实现数据实时共享、版本管理及三维装配模拟,提前发现并解决干涉问题,提升设计质量。同时,建立闭环反馈机制,系统收集生产制造、现场安装及后期运维中的实际问题,将其转化为设计优化输入。通过持续迭代改进,解决加工难点与维护痛点,不断提升模块的性能指标与可靠性,确保模块化设计体系在实际应用中持续完善与高效运转。

5 高低压成套电气设备标准化体系的优化策略

5.1 完善顶层设计,构建系统统一的标准体系

加强标准体系的统筹规划,整合分散于不同领域和部门的标准,消除交叉冲突与空白,建立覆盖高低压成套设备全生命周期的统一规范。重点制定统一的模块划分原则与接口通用标准,加快填补智能化、绿色化等新兴领域的标准缺口。建立标准动态更新机制,紧密跟踪技术演进与“双碳”目标需求,及时修订滞后条款,确保标准与技术发展同步。同时,强化设计、制造、测试及运维各环节标准的协同衔接,确保设计方案可制造、接口性能可验证、设备结构易维护,提升标准体系的整体性与实用性。

5.2 聚焦接口标准化,强化执行监督与质量管控

接口标准化是提升模块互换性的关键。需制定统一的机械尺寸、电气参数及通信协议标准(如统一母线接口与Modbus/EtherCAT协议),推广标准化安装结构。建立严格的接口兼容性认证制度与市场准入机制,加大对违规生产、偷工减料企业的处罚力度,杜绝不合格产品流入市场。健全标

准执行考核体系,将合规情况纳入企业绩效评价,发挥行业协会引导作用,开展培训与信用评价,倒逼企业严格执行标准。通过“标准引领+严管重罚”,切实保障产品质量一致性与模块互换性。

5.3 推动国际接轨,提升标准话语权与竞争力

对标IEC、ISO等国际先进标准(如IEC 61439系列),结合我国产业实际修订国内标准,缩小在智能化、绿色化领域的技术差距,提升标准的国际兼容性。积极组织龙头企业与科研机构参与国际标准制定与修订,输出中国技术方案,增强在国际标准化组织中的话语权。加强中国标准的国际推广与应用,鼓励企业按国际标准组织生产,推动产品走向全球市场。通过“引进来”与“走出去”相结合,提升我国高低压成套电器行业的国际影响力与核心竞争力。

6 结论

本文以高低压成套电气设备为研究对象,采用理论分析与逻辑推演相结合的方法,系统研究模块化设计与标准化,结合理论性案例验证结论,得出以下核心结论。

第一,模块化设计与标准化相辅相成,模块化设计是提升设备通用性、灵活性的核心路径,标准化是其前提保障,二者协同推进可破解传统设计弊端,推动行业技术升级,模块化设计以系统工程等理论为支撑,遵循五大核心原则,构建三级模块化架构。

第二,模块化设计需通过科学划分模块、优化接口设计、推进智能化集成与建立协同机制实现,四者分别为基础、核心、趋势与保障,确保设计高效、模块兼容、适配新型电力系统。

第三,标准化体系涵盖五大维度,当前存在体系不完善、接口标准化低、执行力度不足、国际接轨不够等问题,需通过完善体系、强化接口标准、加强监督、推动国际化等策略优化提升。

第四,案例分析表明,模块化设计与标准化建设能有效缩短设计周期、提升效率、降低成本、提升质量,适配新型电力系统需求,具有重要理论与实践意义。

未来研究将聚焦智能化、绿色化背景下的模块化与标准化技术,深入研究智能模块集成、绿色模块设计与标准制定,加强工程应用研究,完善体系,推动行业高质量发展,为新型电力系统建设提供支撑。

参考文献

- [1]王娇. 高低压成套电气设备的发展趋势[J]. 中国机械,2020(20):103-104.
- [2]郭敬旺. 高低压成套开关设备智能化控制系统的设计与实现[J]. 电力系统装备,2025(8):21-23.
- [3]历博. 高低压成套开关设备的智能化控制系统的设计和发展趋势分析[J]. 光源与照明,2022(4):135-137.
- [4]范伟才,滑茹冰,张瑜. 高压成套开关设备标准化设计的意义探析[J]. 建筑工程技术与设计,2018(24):4455.