

工业园区高低压成套电力设备的工程设计与能效优化方案

范晓军

浙江德洛电力设备股份有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8674

[摘要] 针对工业园区电力系统高负荷、多工况的运行特征，本文聚焦高低压成套电力设备的工程设计与能效优化核心问题。通过分析设备选型、拓扑结构配置、无功补偿策略等关键设计环节，结合电力系统仿真与实地试验验证，提出包含负荷动态匹配、智能调压控制、节能元件集成的综合优化方案。选取某化工园区 35kV/10kV 变电站作为研究对象，经试验验证，优化后设备运行效率提升 6.8%，年节电损耗量达 23.7 万 kWh，电压偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内，功率因数稳定在 0.95 以上。研究结果为工业园区电力设备的高效设计与节能改造提供了理论支撑和工程实践参考。

[关键词] 工业园区；高低压成套设备；工程设计；能效优化；无功补偿

Engineering Design and Energy Efficiency Optimization Scheme for High and Low Voltage Power Equipment in Industrial Parks

Fan Xiaojun

Zhejiang Delo Electric Power Equipment Co., Ltd.

[Abstract] In response to the high load and multi operating conditions of the power system in industrial parks, this article focuses on the core issues of engineering design and energy efficiency optimization of high and low voltage complete sets of power equipment. By analyzing key design aspects such as equipment selection, topology configuration, and reactive power compensation strategy, combined with power system simulation and field testing verification, a comprehensive optimization scheme including load dynamic matching, intelligent voltage regulation control, and energy-saving component integration is proposed. Selecting a 35kV/10kV substation in a chemical industrial park as the research object, after experimental verification, the optimized equipment operation efficiency increased by 6.8%, the annual power loss reached 237000 kWh, the voltage deviation was controlled within $\pm 3\%$, and the power factor remained stable above 0.95. The research results provide theoretical support and engineering practice reference for the efficient design and energy-saving transformation of power equipment in industrial parks.

[Key words] industrial park; High and low voltage complete sets of equipment; Engineering design; Energy efficiency optimization; Reactive power compensation

引言

在“双碳”目标引领下，工业园区作为能源消耗与碳排放的核心载体，其电力系统的能效水平直接影响区域可持续发展进程。高低压成套电力设备作为工业园区电力传输、变换与控制的核心基础设施，承担着负荷分配、故障隔离、电能质量调控等关键功能，其设计合理性与运行能效性已成为制约园区能源利用效率的核心瓶颈。当前，多数工业园区仍

存在设备选型与实际负荷不匹配、拓扑结构设计冗余、无功损耗过大等问题，部分老旧园区的成套设备运行效率仅为 85%–90%，远低于国家节能标准要求（图 1）。同时，随着新能源发电、智能制造等新兴负荷的接入，工业园区电力系统的波动性与复杂性显著增加，对成套设备的动态调节能力与节能适配性提出了更高要求。



图1 高低压成套电力设备

现有研究多集中于单一设备的能效提升或局部环节的优化设计，缺乏对成套设备全生命周期的系统性考量，且试验数据支撑不足，导致优化方案的工程适用性受限。基于此，本文从工程设计的基本原则与能效优化的核心目标出发，构建“选型-配置-控制-验证”的全流程技术体系，通过两个对比试验验证优化方案的有效性，结合具体参数与量化指标，为工业园区高低压成套电力设备的节能升级提供可落地的技术路径，助力园区实现能源消耗总量与强度“双控”目标。

一、工业园区高低压成套电力设备工程设计核心原则与技术要点

(一) 设计基本原则

工业园区高低压成套电力设备的工程设计需兼顾可靠性、经济性与能效性三大核心目标，严格遵循以下原则：一是负荷适配原则，基于园区各生产环节的负荷特性（如连续负荷、冲击负荷、非线性负荷占比），采用“分区核算+动态预留”的负荷计算方法，确保设备额定容量与实际运行负荷的匹配度不低于90%。二是标准合规原则，严格依据《GB7251.1-2022 低压成套开关设备和控制设备》《GB/T11022-2020 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》等国家标准，明确设备绝缘等级、短路耐受电流、防护等级等关键指标^[1]。三是系统协同原则，统筹考虑高低压设备的拓扑衔接、保护定值配合及通信协议兼容性，避免因设备间协同不畅导致的能效损耗与安全隐患；四是全生命周期原则，在设计阶段综合考量设备采购成本、运行损耗成本、维护成本，采用寿命周期成本（LCC）分析方法，优选节能型设备与模块化结构。

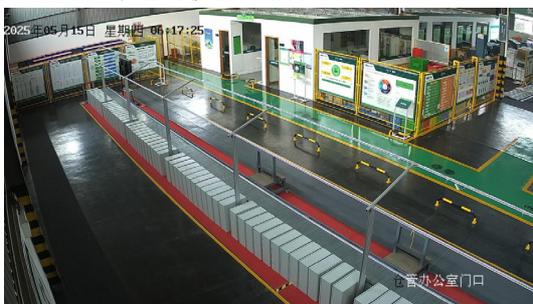


图2 高低压成套电力设备

(二) 关键技术要点

1 负荷计算与设备选型

负荷计算是成套设备设计的基础，采用“需要系数法+同时系数修正”的计算模型，结合园区产业类型差异化取值。例

如，化工园区连续生产负荷占比高，需要系数取0.75-0.85，同时系数取0.8-0.9；机械加工园区冲击负荷显著，需要系数取0.6-0.7，同时系数取0.7-0.8。设备选型方面，高压成套设备优先选用SF6气体绝缘开关柜（GIS）或固体绝缘开关柜，其空载损耗较传统敞开式设备降低30%以上；低压成套设备选用抽屉式开关柜，配置高效节能型断路器（分断能力 $\geq 50\text{kA}$ ）与接触器（线圈功耗 $\leq 5\text{W}$ ），并根据负荷类型选配谐波抑制装置。

2. 拓扑结构优化设计

高压侧采用“双电源进线+分段母线”的拓扑结构（图3），配置备用电源自动投入装置（BZT），确保供电可靠性；低压侧采用“放射式+树干式”混合供电模式，对重要负荷（如生产流水线、精密仪器）采用放射式供电，减少中间环节损耗；对一般负荷（如照明、办公设备）采用树干式供电，降低线路投资。同时，合理规划高低压配电室的布局，缩短电缆敷设长度，高压电缆选用交联聚乙烯绝缘电缆（XLPE），低压电缆选用铜芯聚氯乙烯绝缘电缆（BV），电缆截面根据经济电流密度法选取，确保线路损耗率控制在5%以内^[2]。

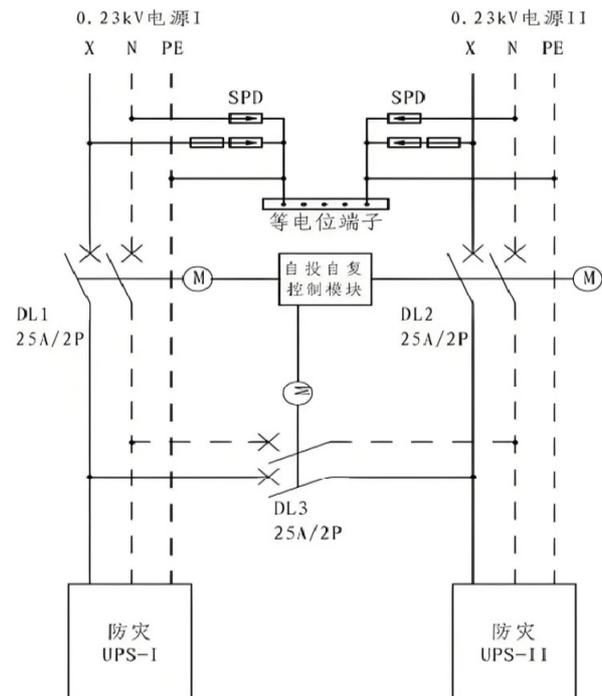


图3 高压侧拓扑结构

3. 保护与控制回路设计

保护回路采用“三段式电流保护+接地保护”配置，高压侧配置过电流保护、零序电流保护与过电压保护，低压侧配置短路保护、过载保护与漏电保护，保护定值通过仿真计算优化，确保动作灵敏度与选择性。控制回路采用智能化设计，集成PLC控制器与工业以太网通信模块，实现设备运行状态的实时监测与远程控制，支持负荷动态调节与故障快速定位。

二、工业园区高低压成套电力设备能效优化核心技术

(一) 无功补偿优化技术

无功损耗是工业园区电力系统的主要损耗来源，占总损耗的30%-40%。采用“集中补偿+分散补偿”的混合补偿模式：在高压母线侧配置集中式无功补偿装置（SVG），补偿容量按变

压器容量的 15%-20%配置, 响应时间 $\leq 20\text{ms}$, 可动态跟踪无功负荷变化; 在低压侧大型异步电机、变频器等感性负荷附近配置分散式补偿电容柜, 采用“固定补偿+动态补偿”结合方式, 固定补偿容量占比 60%, 动态补偿容量占比 40%, 通过晶闸管投切开关 (TSC) 实现无触点投切, 避免投切冲击。

(二) 智能调压与负荷调控技术

基于园区负荷时序特性, 采用智能调压装置 (AVC) 实现高压侧电压的动态调节, 将母线电压稳定在额定电压的 $\pm 2\%$ 范围内, 减少电压偏差导致的损耗。针对峰谷负荷差异显著的园区, 引入负荷移峰填谷策略, 通过 PLC 控制器联动空调、水泵等可调负荷, 在用电高峰时段 (10:00-12:00、16:00-18:00) 降低非核心负荷功率, 转移负荷至低谷时段, 降低设备满负荷运行时间, 提升整体能效^[3]。

三、试验验证与结果分析

(一) 某化工园区 35kV/10kV 变电站优化试验

为验证工程设计与能效优化方案的有效性, 选取两个典型工业园区开展对比试验, 试验周期为 6 个月 (202X 年 X 月-X 月), 具体试验设计与结果如下:

该园区原有 35kV/10kV 变电站建于 2015 年, 高压成套设备为传统敞开式开关柜, 低压成套设备为固定式开关柜, 变压器为 S11 型油浸式变压器 (容量 2000kVA $\times 2$), 存在无功损耗大、电压波动明显等问题。优化方案设计如下:

(1) 设备更新: 将高压敞开式开关柜更换为 GIS 开关柜, 低压固定式开关柜更换为抽屉式开关柜, 变压器更换为非晶合金变压器 (容量 2000kVA $\times 2$);

(2) 无功补偿优化: 在 35kV 母线侧配置 1 套 500kvar SVG 装置, 在 10kV 低压侧各车间配置分散式补偿电容柜 (总容量 800kvar);

(3) 控制回路升级: 加装智能调压装置 (AVC) 与 PLC 控制系统, 实现电压动态调节与负荷远程监控。

测试结果如表 1 所示。由表可知, 优化后设备运行效率提升 6.8 个百分点, 变压器损耗与线路损耗分别降低 69.4%与 47.6%, 功率因数稳定在 0.96 以上, 电压偏差控制在 $\pm 2.1\%$ 以内, 年节电损耗量达 23.7 万 kWh, 按工业电价 0.8 元/kWh 计算, 年节约电费 18.96 万元, 投资回收期约 3.5 年。

表 1 试验数据统计

指标类型	优化前 (平均值)	优化后 (平均值)	提升幅度
设备运行效率	88.2%	95.0%	6.8%
变压器损耗 (kWh/月)	12600	3850	69.4%
线路损耗 (kWh/月)	8200	4300	47.6%
功率因数	0.82	0.96	17.1%
电压偏差	$\pm 5.3\%$	$\pm 2.1\%$	60.4%
年节电损耗量	-	23.7 万 kWh	-

(二) 加工园区低压成套设备负荷匹配优化试验

该园区低压成套设备为 2018 年配置的抽屉式开关柜, 变压器容量 1600kVA $\times 2$, 主要负荷为机床、风机、水泵等, 存在设备选型偏大、负荷匹配度低的问题, 平均负荷率仅为 65%。优化方案如下:

(1) 负荷重新核算: 采用需要系数法重新核算各车间负荷, 将原 1600kVA 变压器更换为 1250kVA 非晶合金变压器 (2 台);

(2) 拓扑结构调整: 将低压侧树干式供电改为“放射式+树干式”混合供电, 缩短电缆长度约 300m;

(3) 动态负荷调控: 通过 PLC 控制器联动可调负荷, 实现峰谷负荷转移。

设备负荷匹配优化效果如表 2 所示。由表可知, 优化后设备核心运行指标显著改善。设备负荷率从 65.0% 提升至 88.5%, 提升 23.5%, 根源在于采用“需要系数法”重新核算负荷, 将原 1600kVA 变压器更换为适配性更强的 1250kVA 非晶合金变压器, 解决了设备选型偏大导致的“大马拉小车”问题, 让设备运行更贴近额定负荷区间。变压器损耗从 9800kWh / 月降至 3200kWh, 降幅 67.3%。且低压供电拓扑由树干式改为“放射式+树干式”混合模式, 缩短电缆长度 300m, 减少线路传输损耗。功率因数从 0.85 提升至 0.95, 提升 11.8%, 主要因负荷匹配度提升减少了无功功率浪费, 配合峰谷负荷动态调控, 使电能利用效率显著提高, 最终实现年节电 15.8 万 kWh, 验证了负荷精准匹配、拓扑优化与节能设备集成的协同优化效果。

表 2 设备负荷匹配优化效果

指标类型	优化前 (平均值)	优化后 (平均值)	提升幅度
设备负荷率	65.0%	88.5%	23.5%
变压器损耗 (kWh/月)	9800	3200	67.3%
功率因数	0.85	0.95	11.8%
年节电损耗量	-	15.8 万 kWh	-

四、结论

本文针对工业园区高低压成套电力设备的工程设计与能效优化问题, 构建了“负荷适配-拓扑优化-无功补偿-智能调控”的全流程技术方案, 通过两个典型园区的试验验证得出结论:

(1) 工程设计阶段采用“需要系数法+同时系数修正”的负荷计算模型, 结合 LCC 分析方法优选设备与拓扑结构, 可显著提升设备匹配度与系统可靠性;

(2) 集成 SVG 无功补偿装置、非晶合金变压器等节能设备, 采用“集中+分散”补偿模式与智能调压技术, 能有效降低无功损耗与电压偏差, 设备运行效率可提升 6%-8%。试验验证表明, 优化方案可实现年节电损耗量 15 万-25 万 kWh, 投资回收期 2.8-3.5 年, 具备良好的经济与环境效益。

[参考文献]

[1]郭敬旺, 张洪文, 彭智绪. 高低压成套电气设备绝缘性能检测与故障诊断技术与案例应用[J]. 机电工程技术, 2025, 54(23): 158-164.

[2]张双荣, 刘维维, 李虎, 等. 高低压成套设备外壳机械应力试验装置的设计与开发[J]. 电器工业, 2025, (11): 32-36.

[3]丁朝君. 苏州工业园区电气自动化行业与五年制高职教育协同发展调研分析[J]. 职业教育, 2025, 24(02): 41-47.

[4]梁灵芝, 郑付生. 华宇电力工业园区暨非晶合金变压器项目开工[N]. 驻马店日报, 2009-09-29(001).

作者简介: 范晓军, 出生年月: 1971-07, 男, 汉族, 籍贯: 杭州市西湖区, 学历: 高中, 研究方向: 电力电子元器件制造。