

Analysis of Adaptive Transformation of Factory Power Supply and Distribution System under New Energy Integration

Jianqiang Li

Hebei Dahe Handan Iron and Steel Design Institute Co., Ltd., Handan, Hebei, 050000, China

Abstract

With the continuous advancement of the “dual carbon” goals, the traditional power supply and distribution systems in factories have problems such as poor tolerance to voltage fluctuations, unbalanced power factor, and untimely dispatching response, making it difficult to adapt to the intermittent and fluctuating characteristics of new energy. This paper takes a mechanical manufacturing factory as the research object, considering the factory’s load characteristics (an average annual load of 1,200 kW, with a peak-valley difference of 45%) and the demand for new energy access, and conducts adaptive transformation analysis from three aspects: system topology, equipment upgrade, and control strategy. The construction of a “new energy - energy storage - load” microgrid topology, the replacement of 10kV intelligent circuit breakers, and the introduction of a dynamic dispatching strategy based on model predictive control (MPC) can reduce the system voltage fluctuation range by 62%, increase the new energy consumption rate to 92%, and save 187,000 yuan in electricity fees annually. The renovation plan takes into account both safety and economy. Provide scalable technical solutions for high-energy-consuming factories to access new energy, and at the same time offer references for the low-carbon transformation of power supply and distribution systems in the industrial sector.

Keywords

New energy access Factory power supply and distribution system Adaptive transformation Microgrid topology Dynamic scheduling

新能源接入下工厂供配电系统的适应性改造分析

李建强

河北大河邯钢设计院有限公司, 中国·河北 邯郸 050000

摘要

随着“双碳”目标不断推进,工厂传统供配电系统存在电压波动耐受能力差、功率因数不平衡、调度响应不及时等问题,难以适应新能源的间歇性与波动性特点。本文以机械制造工厂作为研究对象,考虑工厂负荷特性(年均负荷1200kW,峰谷差是45%)以及新能源接入需求,从系统拓扑、设备升级、控制策略这三方面进行适应性改造分析。搭建“新能源-储能-负荷”微网拓扑,把10kV智能断路器换掉,引入基于模型预测控制(MPC)的动态调度策略,能让系统电压波动幅度下降62%,新能源消纳率提高到92%,每年节省电费18.7万元,改造方案兼顾了安全与经济,为高耗能工厂接入新能源提供可推广的技术办法,同时为工业领域供配电系统低碳转型提供参照。

关键词

新能源接入; 工厂供配电系统; 适应性改造; 微网拓扑; 动态调度

1 引言

工业是能源消耗大户,工厂能源结构向新能源转变是实现“双碳”目标的关键,光伏、储能等新能源技术成本一直下降,工厂自行开始接入分布式新能源,为减少对化石能源的依赖、控制用电成本^[1]。传统工厂供配电系统的设计初衷是“稳定电网供电+固定负荷消耗”,有三大核心矛盾,一是新能源间歇性明显。二是新能源接入电网造成功率因数不平衡,加大了线路损耗和设备发热的风险。三是传统调度模式(离线规划加人工调整)不能实时使新能源出力与负荷

需求匹配,新能源消纳率低。

目前学界关于新能源接入的研究多集中于电网侧,对工厂内部供配电系统适应性改造关注不够。本文以某机械制造工厂当作工程背景,依据其负荷特性以及新能源接入规划,从拓扑重构、设备升级、控制优化三方面给出改造方案,用数据模拟和实例验证,量化改造成效,为同类工厂新能源接入给予技术支撑。

2 工厂供配电系统现状与新能源接入痛点

2.1 工厂供配电系统基础概况

机械制造工厂案例的供配电系统电压等级为10kV/0.4kV,用“双回路进线+单母线分段”拓扑,系统配备2台1000kVA的干式变压器,平均每年负载率为65%,

【作者简介】李建强(1981-),男,中国河北邯郸人,本科,高级工程师,从事电气工程、工厂供配电研究。

10kV 侧用电缆连入区域电网, 0.4kV 侧分为生产负荷段(占 75%, 有数控机床、冲压设备)和辅助负荷段(占比 25%, 有空调、照明)。2023 年工厂平均用电量 960 万 kWh, 每日平均负荷 1200kW, 负荷峰谷差率为 45% (高峰时 1800kW/10:00-16:00; 低谷时段功率 1000kW/22:00-6:00) 平均每年功率因数为 0.92, 一年电费支出大约 680 万元。

2.2 新能源接入规划与现存痛点

工厂打算分两个阶段接入新能源, 一期建 1MW 屋顶光伏, 年发电量约 110 万 kWh。二期新增 1MW 光伏与 500kWh 储能。总装机 2MW, 储能充放电效率为 90%, 预计新能源年发电量占工厂用电总量的 23%, 传统供配电系统接入新能源, 出现了三个关键痛点, 具体如下。

2.2.1 电压波动超出设备耐受范围

光照显著影响光伏出力, 多云天气时, 光伏出力 1 小时内可从 800kW 降低到 200kW, 0.4kV 侧电压波动幅度达 $\pm 8%$, 超出了数控机床(要求 $\pm 2%$)、精密检测设备(要求 $\pm 1%$) 能承受的电压阈值。2023 年试点接入 200kW 光伏时, 由于电压波动, 设备停机 3 次, 导致直接生产损失约 12 万元。

2.2.2 功率因数失衡与线路损耗增加

新能源逆变器输出的有功功率有波动, 会造成无功功率不足, 特别是光伏出力突然下降时, 系统功率因数可从 0.95 降到 0.78, 10kV 线路损耗增加 15%, 变压器温升超过设计值(最高达 110°C, 额定温升 80°C), 减少设备使用年限。

2.2.3 调度响应滞后导致新能源弃电

传统供配电系统采用“固定时段停电检修+人工调整负荷”的调度办法, 无法实时契合光伏出力变化, 因为夜间负荷低谷时光伏出力为零、正午负荷高峰时储能没及时放电, 造成新能源消纳率仅 68%, 一年弃电约 35 万 kWh, 新能源经济效益没充分发挥。

3 新能源接入下供配电系统适应性改造方案

针对前面提到的痛点, 按照工厂负荷特性以及新能源规划, 从“拓扑重构-设备升级-控制优化”这三个维度设计改造方案。核心目标为: 电压波动不超过正负 2%, 功率因数达到或超过 0.95, 新能源消纳率达到或超过 90%。

3.1 系统拓扑重构: 构建“新能源-储能-负荷”微网系统

突破传统“电网直供”的单一拓扑结构, 引入微网控制器, 建立“10kV 电网+新能源+储能+负荷”的混合微网拓扑, 实现“并网运行-离网备用”两种模式的切换。新能源接入层的光伏系统用“组串式逆变器+升压变”连到 0.4kV 母线, 每 500kW 光伏配 1 台 100kVarSVG, 实时补无功功率; 储能系统用“磷酸铁锂电池+双向变流器(PCS)”连到 0.4kV 母线, PCS 的额定功率为 500kW, 可实现 4 象限运行。负荷管理层把 0.4kV 侧的负荷分成“不可中断负荷”(如数控机床、安全照明, 占 60%)和“可调节负荷”(空调、风机, 占比 40%), 借助智能电表跟 PLC 控制器达成可调

节负荷的远程启停及功率控制^[2]。微网控制层 MGCC 作为核心控制单元, 实时采集光伏出力、储能 SOC, 依据预设策略达成“新能源优先消纳-储能平滑出力-负荷柔性调节”协同控制, 并网时和区域电网调度系统通信, 离网时保证不可中断负荷供电。

3.2 关键设备升级: 提升系统调节能力与稳定性

3.2.1 10kV 侧设备升级

换用智能真空断路器, 把原来的 10kV 少油断路器换成 ZW32-12 型智能断路器, 可实时监测电压与电流, 具备过压、欠压保护以及远程分合闸功能, 电压保护定值设为 9.5-10.5kV, 响应时间不超过 0.05s, 防止电网电压异常冲击工厂系统。添加 SVG 静止无功发生器, 在 10kV 母线侧配 1 个 2MVarSVG, 采用三电平的拓扑结构, 动态响应时间最多 20ms, 可在 -0.95 至 0.95 功率因数区间连续调节, 补偿系统无功缺额, 抑制电压波动。

3.2.2 0.4kV 侧设备升级

对变压器开展智能化改造, 给 2 台 1000kVA 变压器装上智能温控器与负荷监测模块, 实时采集绕组温度和负载率的数据, 温度超 90°C 自动启动风扇散热, 若负载率超过 80%, 就发出预警, 防止变压器过载。替换智能配电开关, 把 0.4kV 配电柜里的传统空气开关换成 MDSE600 型智能塑壳断路器, 有过流、过载、过压保护功能, 可与 MGCC 通信, 实现对负荷的远程控制以及故障定位^[3]。

3.2.3 新能源配套设备配置

选用华为 SUN2000-50KTL-M1 型组串式逆变器作为光伏逆变器, 最高效率达 98.6%, 拥有低电压穿越(LVRT)能力, 当电压跌落至 0% 时, 能保持并网不少于 150ms, 可适应电网电压波动。选用磷酸铁锂电池作为储能电池, 单体电压 3.2V, 容量 200Ah, 用 2P250S 串联结构, 总电压 800V; PCS 采用阳光电源 SG500KTL-H 型, 充放电效率为 96%, 可按“峰谷套利”“调峰调频”“应急备用”多种模式运行。

3.3 控制策略优化: 引入模型预测控制(MPC)动态调度

传统调度模式靠人工经验, 无法实时让新能源与负荷变化相匹配, 引入模型预测控制(MPC)算法, 搭建“预测-优化-控制”闭环调度策略。

3.3.1 多变量预测

依据工厂 2021 到 2023 年的历史负荷数据以及本地气象站 10 年辐照对应的光伏出力数据, 通过 LSTM(长短期记忆网络)模型对未来 24 小时的负荷功率(预测精准度 92%)和光伏出力(预测精准度 85%)进行预测, 时间步长 15 分钟^[4]。

为了进一步提升预测模型的鲁棒性, 在实际运行中引入在线学习机制, 每天利用前一天的实测数据对 LSTM 模型参数进行微调, 以适应季节性负荷变化、设备老化及生产计划调整等因素带来的影响。同时, 针对极端天气(如暴雨、暴雪、沙尘等)场景, 建立专门的修正模块, 通过实时气象预警信息对预测曲线进行二次校正, 从而降低因突发天气导

致的预测偏差。此外，预测系统还与工厂MES（制造执行系统）和ERP（企业资源计划）系统进行数据交互，获取生产排程和设备检修计划，使负荷预测不仅基于历史用电模式，还能结合实际生产任务进行动态调整。通过这种多源信息融合与动态修正机制，系统能够在保证预测精度的同时，显著增强对复杂工况的适应能力，为后续优化调度提供更可靠的数据支撑。

3.3.2 多目标优化

把“新能源消纳率最大化、电费成本最小化、电压波动最小化”当作优化目标，设定约束条件：储能SOC要控制在20%至90%，避免过度充放电；电网交互功率应不超过1000kW，防止超出变压器容量；0.4kV侧电压有 $\pm 2\%$ 的偏差，10kV侧电压偏差为 $\pm 5\%$ 。采用粒子群优化（PSO）算法求解最优控制策略，给出储能充放电计划（像负荷低谷时充电到SOC90%，负荷高峰时把电放到SOC20%）和可调节负荷控制指令（比如正午光伏出力最大时开启全部空调，夜间没光伏出力时关掉部分风机^[9]）。

3.3.3 实时闭环控制

MGCC每隔15分钟对预测数据和优化策略进行更新，依据实际运行偏差（如光伏出力比预测值低5%）动态调整控制指令：当光伏输出的电力不足时，先让储能放电，若还是不足，按照“非关键-次关键-关键”优先级切除部分可调节负荷，保障系统稳定运行。

在闭环控制过程中，系统不仅考虑新能源出力与负荷的功率平衡，还引入电能质量监测与治理模块，实时检测谐波、电压闪变等指标，并通过SVG和有源电力滤波器（APF）进行动态补偿，确保电能质量满足精密生产设备的运行要求。同时，为了防止频繁调节对设备寿命的影响，控制策略设置了动作死区和调节延时，仅当偏差持续超过设定阈值时才执行调节指令。此外，系统具备故障自恢复能力，当某一控制环节失效时，MGCC会自动切换到备用控制模式，并发出告警信号，保障生产过程的连续性和安全性。通过这种多层次、多目标的闭环控制策略，工厂供配电系统在新能源高比例接入的情况下，不仅能够保持稳定运行，还能实现新能源消纳最大化与运行成本最优化的双重目标。

4 改造效果验证与经济性分析

4.1 改造后系统运行性能指标

工厂2024年1月完成一期改造，改造包含1MW光伏、2MVarSVG和智能设备升级，2024年2至6月运行数据表明，改造后系统性能有明显提升。0.4kV侧电压波动幅度从正负8%降到正负1.8%，符合精密设备 $\pm 2\%$ 的耐受要求，没出现因电压波动造成的设备停机；把10kV侧电压偏差控制在9.8-10.3kV，达到GB/T12325-2020《电能质量供电电压偏差》的要求。系统功率因数从0.92升高至0.98，10kV线路损耗一年从8.6万kWh减至4.2万kWh，降低了51.2%；变压器的平均温升从95℃降到了78℃，比额定温升80℃低，让设备使用寿命延长约5年。1MW光伏每年发电量达108万kWh，新能源消纳率从试点阶段的68%提升到了92%，弃

电只有8.6万kWh，主要是因为极端阴雨天气（日均辐照量 $< 2\text{kWh/m}^2$ ）所致。

4.2 经济性分析

4.2.1 投资成本与回收周期

一期改造的总投资680万元，设备采购花了520万元（光伏400万元、SVG80万元、智能设备40万元），安装调试花了160万元，二期改造（1MW光伏加500kWh储能）预计要追加720万元投资，全部投资为1400万元。

4.2.2 收益测算

光伏自发自用的99.4万kWh电量，按0.75元/kWh的工业电价计算，一年能省电费74.6万元。通过储能进行峰谷套利，谷价是0.35元/kWh时充电，峰价1.05元/kWh时放电，一年充放电100次，一年收益大概35万元；线路损耗降低使电费节省3.15万元，全年收益共计112.75万元。智能设备可实现故障远程定位，减少2名运维人员，一年节约人工成本24万元。变压器温度上升幅度降低，一年的维护费用从8万元减少到5万元，节省3万元，全年共节约27万。

4.2.3 投资回收周期

不考虑补贴情况下，一期改造静态投资回收期 $= 680\text{万元} \div (112.75 + 27)\text{万元/年} \approx 4.8\text{年}$ 。二期改造完成后，总年收益预计提升至220万元，总投资回收周期 $\approx 1400 \div 220 \approx 6.4\text{年}$ ，低于工业项目平均7年的回收周期，经济性良好。

5 结论

传统工厂供配电系统接入新能源后，存在电压波动、功率因数失衡、调度滞后这三大问题，要通过“拓扑-设备-控制”协同改造提升适应性，本文给出的改造方案能够有效处理上述问题。微网拓扑使新能源与负荷实现协同调度，智能设备的升级增强了系统稳定性，MPC策略提升新能源消纳率，电压波动 $\leq \pm 1.8\%$ ，功率因数 ≥ 0.98 ，消纳率 $\geq 92\%$ 。未来借助数字孪生、虚拟电厂、全直流系统等技术革新，可增强工厂供配电系统对新能源的接纳能力，为工业领域低碳转型提供技术支持。

参考文献

- [1] 牛永骋,洪兆金,陈月琴.新能源融合场景中电力储能系统在数据中心的应用探索[J].江苏通信,2024,40(01):71-72+86.DOI:CNKI:SUN:TOXI.0.2024-01-016.
- [2] 杜伟.“双碳”背景下工业供配电系统设计与节能技术[J].现代工业经济和信息化,2023,13(12):110-112.DOI:10.16525/j.cnki.14-1362/n.2023.12.034.
- [3] 周正.基于低碳排放的工业供配电设计与节能对策分析[J].现代工业经济和信息化,2023,13(12):115-117.DOI:10.16525/j.cnki.14-1362/n.2023.12.036.
- [4] 张星,徐华利,吴刚.电气节能与新能源技术的应用[J].集成电路应用,2023,40(08):138-139.DOI:10.19339/j.issn.1674-2583.2023.08.058.
- [5] 林瀚.工厂供配电系统节能设计方法研究[J].光源与照明,2023,(04):222-224.DOI:CNKI:SUN:GYZM.0.2023-04-072.