

燃气锅炉与光伏储能系统耦合的多能互补供热技术研究

唐潇睿¹ 蔡廷国² 王鸥³ 张官鸿⁴ 何佳⁵

1.天津慧朋科技有限公司；2.天津市建筑设计研究院有限公司；3.中国市政工程华北设计研究总院有限公司；
4.天津市华春新能源技术发展有限公司；5.天津市西海环境工程设计有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8361

[摘要] 对应多能互补的供热需求情形，研究燃气锅炉跟光伏储能系统的耦合技术，审视二者协同运转的属性，阐述光伏接入所引发的电压稳定、电网潮流波动及谐波的问题，搭建负荷优化分配的仿真计算模型，采用如粒子群算法之类的优化算法求解，借助能量交互流程的设计、多模式的切换、协同控制以及运行优化调节达成多能互补供热，研究为该系统实现高效稳定运行提供技术保障力。

[关键词] 燃气锅炉；光伏储能系统；多能互补；负荷优化；电能质量

Research on Multi energy Complementary Heating Technology Coupled with Gas Boiler and Photovoltaic Energy Storage System

Tang Xiaorui¹ Cai Tingguo² Wang Ou³ Zhang Guan hong⁴ He Jia⁵

1. Tianjin Huipeng Technology Co., Ltd.; 2. Tianjin Architectural Design and Research Institute Co., Ltd.;
3. China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd.;
4. Tianjin Huachun New Energy Technology Development Co., Ltd.;
5. Tianjin Xihai Environmental Engineering Design Co., Ltd.

[Abstract] In response to the demand for multi energy complementary heating, this study investigates the coupling technology between gas boilers and photovoltaic energy storage systems, examines the attributes of their collaborative operation, elucidates the problems of voltage stability, power flow fluctuations, and harmonics caused by photovoltaic access, builds a simulation calculation model for load optimization allocation, and uses optimization algorithms such as particle swarm optimization to solve them. With the design of energy interaction processes, multi-mode switching, collaborative control, and operation optimization adjustment, multi energy complementary heating is achieved, providing technical support for the efficient and stable operation of the system.

[Key words] gas boiler; Photovoltaic energy storage system; Multi energy complementarity; Load optimization; quality

引言

随能源结构转型及供热需求的不断增长，多能互补供热技术跻身研究热点行列，供热稳定是燃气锅炉之长，能源利用效

率受负荷影响为短，尽管光伏储能系统清洁优势显著，却存在间歇性问题，二者实现耦合可让优势彼此互补，应对单一能源供热的局限难题，光伏接入引出的电能质量问题、多能系统负

荷分配的优化事宜，均需做进一步深入研究，为构建高效供热系统找出技术路径。

一、燃气锅炉与光伏储能系统协同运行特性

（一）光伏储能系统运行特性

光伏储能系统的发电出力受诸如光照强度、环境温度等气象条件的影响与制约，彰显出明显的间歇性及随机属性，在无光照的时间段，光伏发电功率降为零；光照强度达至峰值的瞬间，输出功率可实现额定容量，储能系统不仅通过充放电流程实现电能的时空调配，还将光伏富余电能转化为热能存储。在充电阶段，储能系统优先将电能转化为热能并存储于蓄热装置中；在放电阶段，优先释放存储的热能以满足供热需求，不足部分再通过电能释放补充。

（二）燃气锅炉运行特性

燃气锅炉以天然气为燃料，通过燃烧加热工质输出热能。其热效率与负荷率密切相关：高负荷时燃烧充分，热效率高；低负荷时燃烧稳定性下降，排烟热损失增加，热效率降低。锅炉负荷调节有上下限，负荷过低易熄火，过高则超设计能力^[1]。热负荷与燃气消耗呈非线性关系，部分负荷下单位热负荷燃气消耗增加。运行时需将工质参数控制在安全区间，保障设备稳定运行并提升供热品质。同时，可考虑将部分热量储存，以优化能源利用效率。

（三）协同运行交互特性

当燃气锅炉与光伏储能系统耦合运行时，二者在能量和控制层面相互影响。在能量层面，供热负荷的热能需求由燃气锅炉承担，而光伏系统产生的多余电能则用于驱动热泵或电加热设备，将电能转化为热能储存起来，以备不时之需。当光伏出力不足或负荷高峰时，燃气锅炉补充热能，二者根据负荷变化、光伏预测功率及储能状态动态调节出力，实现热能互补协同。在控制层面，通过通信网络和控制算法协调运行，采用模型预测控制（MPC）技术，融合负荷预测、气象数据及设备运行状态，提前优化燃气锅炉和储能系统的出力分配，确保系统在各种工况下稳定运行，实现多能源协同互用与高效处理。

二、光伏接入引发的电能质量与谐波控制问题

（一）电压稳定性问题

诸如光照强度、温度等因素影响光伏电站输出功率，展示出迅速起伏与大幅度变动的特性，要是光照条件急剧改变，光伏电站功率变换跨度大且变化率高，造成电网里注入的有功功率出现大幅的波动，按照电力系统运行的原理，有功功率的强烈变化会冲破系统的功率平衡，由此对电网电压稳定形成不利的影响。在某些极端的情境下，也许会引起电压崩溃等严重后果产生，光伏电站的无功调节能力欠佳，难以迅速且有效地弥

补有功功率波动所引发的电压偏差，让电压稳定性的问题进一步升级。

（二）电网潮流波动问题

鉴于光伏发电具有间歇性和随机性，其出力存在不确定性，致使电网潮流呈现显著波动特征，光伏电站输出功率频繁变化，直接影响电网各节点电压水平及功率分布，而电网电压偏差大小与电网短路容量、光伏发电装置有功及无功功率控制密切相关，若光伏电站输出功率突然增大或减小，配电线路负荷潮流会急剧变动，这种快速变化不仅导致系统电压波动，还会引发电压闪变现象。电压波动与闪变会影响电网中各类用电设备正常运行，尤其对电压敏感的精密仪器，可能引发设备故障或运行异常，不稳定的电网潮流增加了电网调度及运行控制难度，使得实现电网安全稳定运行和优化调度颇具挑战。

（三）谐波产生问题

光伏发电站通过逆变器将直流电转换为交流电并入电网，在此转换过程中，作为非线性电力电子器件的逆变器，运行时会产生一定直流分量和谐波分量。若这些谐波分量注入燃机厂用电系统或公共电网，会影响系统谐波水平。谐波电流在电网中流动会引发额外损耗，加剧变压器、电缆等设备发热，导致设备寿命和运行效率下降；谐波电压会使电网电压波形扭曲畸变，削弱电力设备正常工作性能，如引发电动机振动、噪音增大，降低继电保护装置准确性和可靠性等。

三、多能系统负荷优化分配的仿真计算算法

（一）优化分配模型构建

以燃气锅炉与光伏储能系统耦合的多能互补供热系统为对象，构建以系统运行成本最小或能源消耗最小为目标函数的数学模型。目标函数 F 可表示为： $F = \sum_{i=1}^n C_i P_i$ ，其中 C_i 为第 i 种能源设备的单位能耗成本， P_i 为第 i 种能源设备的输出功率， n 为设备种类数。建立约束条件，包括燃气锅炉的负荷调节范围约束 $P_{\min}^{gb} \leq P_{gb} \leq P_{\max}^{gb}$ ，光伏电站的功率输出约束 $0 \leq P_{pv} \leq P_{pv}^{\max}$ ，储能系统的充放电功率约束 $P_{\min}^{es} \leq P_{es} \leq P_{\max}^{es}$ 以及荷电状态约束 $SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max}$ ，其中 P_{gb} 、 P_{pv} 、 P_{es} 分别为燃气锅炉、光伏电站、储能系统的输出功率， $P_{pv}^{\max}$ 为光伏电站最大输出功率， $P_{\min}^{es}$ 、 $P_{\max}^{es}$ 为储能系统充放电功率上下限，SOC 为储能系统荷电状态。

（二）仿真计算过程实施

采用典型日负荷曲线作为输入，将一天划分为多个时间间隔 Δt 。在每个时间间隔内，根据目标函数和约束条件，运用优化算法求解各能源设备的输出功率^[2]。以粒子群优化算法

(PSO) 为例, 初始化粒子群位置和速度, 每个粒子代表一组能源设备的功率分配方案。计算每个粒子的适应度值, 即目标函数值。通过迭代更新粒子的位置和速度, 公式为:

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (p_{gd}(t) - x_{id}(t))$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1)$$

其中, v_{id} 为粒子 i 第 d 维的速度, x_{id} 为粒子 i 第 d 维的位置, ω 为惯性权重, c_1 、 c_2 为学习因子, r_1 、 r_2 为[0,1]之间的随机数, p_{id} 为粒子 i 的个体最优位置, p_{gd} 为全局最优位置。不断迭代直至满足终止条件, 得到该时间间隔内的最优负荷分配方案。

(三) 算法参数设定与优化

算法中的关键参数包括粒子群规模 N 、惯性权重 ω 、学习因子 c_1 和 c_2 以及迭代次数 T 等。粒子群规模 N 影响算法的搜索范围和计算效率, 通常根据问题的复杂程度设定在 20-100 之间。惯性权重 ω 控制粒子的全局搜索和局部搜索能力, 一般采用线性递减策略, 初始值设为 0.9, 终值设为 0.4, 其计算公式为: $\omega = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})t}{T}$, 其中 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 分别为惯性权重的最大值和最小值, t 为当前迭代次数。学习因子 $c_{\{1\}}$ 和 $c_{\{2\}}$ 控制粒子向个体最优和全局最优位置的学习程度, 通常取值在 1.5-2.5 之间。

四、耦合光伏与燃气锅炉的多能互补供热技术

(一) 系统能量交互技术流程

光伏系统所发电能经变配电装置, 优先供给供热循环泵、控制系统等设备用电, 剩余电能用于驱动热泵或电加热装置, 将电能转化为热能储存于热储能设备中, 储能充电遵循最大功率点跟踪 (MPPT) 原则, 以保障热量高效存储^[3]。当光伏供电不足时, 热储能设备释放热量补充, 若仍无法满足需求则由燃气锅炉补充热能。燃气锅炉依据供热负荷缺口, 通过燃烧控制系统调节燃气进气量, 产生热能经热交换器与供热循环水换热, 和热储能释放的热能共同满足供热需求。各设备间能量交互由能量管理系统 (EMS) 统一调度, 根据预设逻辑与实时数据实现能量动态分配与平衡。

(二) 多模式供热运行切换技术

采用光照传感器、气象预报数据及光伏出力历史数据预测光伏系统发电能力, 借助负荷预测模型预估供热需求。日间光照充足且供热负荷低时, 启动“光伏+热储能”模式, 光伏系统优先供电, 驱动热泵或电加热装置将多余电能转化为热能储存; 光照减弱或供热负荷上升时, 切换至“光伏+燃气锅炉+热储能”协同模式, EMS 根据实时监测数据, 计算燃气锅炉需补充的热量及热储能充放热功率, 实现多能协同供热。夜间或光

伏无出力时, 进入“燃气锅炉+热储能”模式, 燃气锅炉承担主要供热任务, 热储能设备依据供热负荷波动调峰, 通过调节燃气锅炉燃烧强度与热储能放热量, 保障供热稳定。

(三) 协同控制策略实施技术

基于光伏、燃气锅炉、热储能设备运行特性及参数, 构建高精度动态模型, 借助实时采集的温度、压力、流量等数据修正模型, 通过负荷预测算法与光伏功率预测算法, 获取未来时段供热供电需求数据。在各控制周期内, 模型预测控制 (MPC) 算法以系统能耗最小为优化目标, 综合设备运行约束条件, 计算燃气锅炉最佳燃烧功率、热储能设备充放热策略及光伏系统运行状态, 优化结果经 DCS 系统转化为控制指令, 下发至各设备执行机构。燃气锅炉通过调节燃气调节阀开度、风机转速控制燃烧过程; 热储能系统通过调节热泵或电加热装置的功率; 光伏系统实时调整逆变器工作参数, 实现各设备精准协同运行。

(四) 系统运行优化调整技术

采用机器学习算法深度挖掘历史运行数据, 构建设备性能衰退模型与系统能效评估模型, 依据评估结果优化调整能量管理策略及控制参数。例如, 根据燃气锅炉热效率变化优化燃烧控制参数、调整空燃比; 针对热储能设备性能变化动态修正充放热策略以延长使用寿命。结合气象条件与供热负荷变化规律, 提前优化运行模式切换策略, 借助预测性维护技术对设备潜在故障预警, 安排计划性检修, 保障多能互补供热系统长期稳定高效运行。

结语:

燃气锅炉与光伏储能系统耦合的多能互补供热技术研究揭示了二者协同运行特性, 分析了光伏接入引发的电能质量问题, 并构建了负荷优化分配模型, 提出了能量交互、多模式切换、协同控制及运行优化等技术。该研究为多能互补供热系统的高效稳定运行提供了技术保障, 为未来能源结构转型与供热技术发展奠定了基础, 具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

[参考文献]

- [1]张祥瑞,王洪莹,冯波,等.考虑固定/移动储能的综合能源系统光伏消纳能力研究[J].热能动力工程,2025,40(05): 113-120.
- [2]苗智昶.基于光伏-光热耦合的多能互补发电系统研究[D].华北电力大学(北京),2022.
- [3]王明坤,高林,邹庆秋,等.基于太阳能和燃气的多能互补系统热电负荷分配技术研究[J].热力发电,2019,48(07): 39-46.