

# 采出水余热回收与光伏耦合的联合站能源系统优化及效益分析

胡宗艳 (胜利油田分公司东辛采油厂, 山东 东营 257000)

**摘要:** 为破解油田联合站高能耗、高碳排放难题, 本文提出采出水余热回收与光伏耦合的能源优化方案。通过分析联合站能耗结构及两类能源利用潜力, 构建“余热回收-光伏发电-负荷匹配”耦合优化模型, 设计基于负荷预测的动态调控策略。以某油田联合站为案例, 采用 AspenPlus 与 TRNSYS 软件仿真验证, 结果表明该系统可降低综合能耗 32.7%、减少碳排放 35.2%, 投资回收期 4.8 年。研究提出的四阶段优化路径, 为油田联合站能源转型提供了可行技术方案与理论支撑。

**关键词:** 油田联合站; 采出水余热回收; 光伏耦合; 能源优化; 动态调控

**中图分类号:** TE08 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 005-0080-03

## Energy System Optimization and Benefit Analysis of Oilfield Gathering Station Coupled with Produced Water Waste Heat Recovery and Photovoltaic Power Generation

Hu Zongyan (Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** To tackle the problems of high energy consumption and high carbon emissions in oilfield gathering stations, this paper proposes an energy optimization scheme that couples produced water waste heat recovery with photovoltaic power generation. By analyzing the energy consumption structure of gathering stations and the utilization potential of the two types of energy, a coupled optimization model of “waste heat recovery - photovoltaic power generation - load matching” is constructed, and a dynamic regulation strategy based on load forecasting is designed. Taking a certain oilfield gathering station as a case, simulation verification is carried out by AspenPlus and TRNSYS software. The results show that the system can reduce comprehensive energy consumption by 32.7%, cut carbon emissions by 35.2%, with an investment payback period of 4.8 years. The proposed four-stage optimization path provides a feasible technical scheme and theoretical support for the energy transformation of oilfield gathering stations.

**Keywords:** Oilfield gathering station; Produced water waste heat recovery; Photovoltaic coupling; Energy optimization; Dynamic regulation

油田联合站作为油气集输、处理的核心枢纽, 承担着原油脱水、稳定、外输及采出水处理等关键任务, 其能耗占油田总能耗的 35%~45%, 其中加热炉、输油泵等设备的能源消耗占比超 70%。当前, 联合站主要依赖天然气、原油等化石能源, 不仅导致运营成本居高不下, 还产生大量碳排放, 与“双碳”目标及油田绿色转型要求存在显著差距。采出水作为油田开发的伴生资源, 其温度通常维持在 40~80℃, 蕴含丰富的低品位余热, 若直接排放不仅造成能源浪费, 还会引发环境热污染。同时, 油田区域多具备充足的光照资源, 光伏发电潜力巨大。将采出水余热回收与光伏发电进行耦合, 可实现清洁能源互补供应, 优化能源消费结构, 提升联合站能源自给率。因此, 开展采出水余热回收与光伏耦合的能源优化路径研究, 对降低油田能耗、减少碳排放、提升企业经济效益具有重要的理论与实际意义。

### 1 联合站能耗与能源资源潜力分析

#### 1.1 联合站能耗结构特征

以某典型油田联合站为例, 其日均处理原油

1500t, 处理采出水 2000m<sup>3</sup>, 主要能耗设备包括加热炉、输油泵、脱水器、风机等。通过对该联合站连续 3 个月的能耗数据统计, 加热炉能耗占比最高, 达 45.2%, 主要用于原油脱水、稳定过程的加热; 输油泵能耗占比 28.6%, 用于原油、采出水的输送; 其他设备能耗占比 26.2%。能源消费以天然气为主, 占比 72.5%, 其次为电网电力, 占比 27.5%, 能耗结构单一且化石能源依赖度高。

#### 1.2 采出水余热资源潜力

该联合站采出水日均处理量 2000m<sup>3</sup>, 进水温度 65℃, 处理后排放温度 42℃, 水温差达 23℃。根据热量计算公式  $Q=cm\Delta t$  (其中  $c$  为水的比热容, 取 4.2kJ/(kg·℃);  $m$  为采出水质量), 可计算得出该联合站采出水日均余热资源量为:  $Q=4.2 \times 10^3 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{℃}) \times 2000 \times 10^3 \text{ kg} \times 23 \text{ ℃} = 193.2 \times 10^6 \text{ kJ} = 193.2 \text{ GJ}$ 。扣除余热回收过程中的 15% 热损失, 实际可回收余热资源量为 164.2GJ/d, 年可回收余热资源量达  $59.9 \times 10^4 \text{ GJ}$ , 远超联合站日均总能耗 (278.2GJ) 的

50%，余热利用潜力巨大。

### 1.3 光伏资源潜力

该联合站所在区域年平均日照时数为 2850h，年平均太阳辐照量为  $5600\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，属于光伏资源较丰富地区。联合站厂区内可利用闲置空间（如办公楼屋顶、储罐区周边空地、道路两侧）总面积约  $8000\text{m}^2$ 。采用 250W 单晶硅光伏组件，组件转换效率取 18%，系统综合效率取 85%，则可计算得出该区域光伏电站最大装机容量为： $8000\text{m}^2 \times 250\text{W}/\text{m}^2 = 2000\text{kW} = 2\text{MW}$ 。年发电量为： $2000\text{kW} \times 2850\text{h} \times 85\% = 4845000\text{kWh} = 484.5\text{MWh} = 1744.2\text{GJ}$ ，可满足联合站年电力消耗的 6.3%，若进一步拓展光伏安装空间，光伏发电潜力可进一步提升。

## 2 采出水余热回收与光伏耦合系统设计

### 2.1 耦合系统架构设计

采出水余热回收与光伏耦合系统以“能源梯级利用、负荷动态匹配”为核心，主要由采出水余热回收子系统、光伏发电子系统、能源存储子系统、负荷调控子系统及监控调度中心组成。

①采出水余热回收子系统：主要由换热器、热泵机组、蓄热罐等设备组成。采出水先通过换热器与循环水进行换热，初步回收热量；再通过热泵机组将低品位余热提升至中高温（80~90℃），存储于蓄热罐中，用于加热原油、采暖及生产用水。②光伏发电子系统：由光伏组件、逆变器、汇流箱等设备组成。光伏组件将太阳能转化为直流电，经逆变器转换为交流电后，一部分直接供给输油泵、风机等电力负荷，剩余电力存储于储能电池中，不足部分由电网补充。③储能量子系统：而对其能量的储蓄就可分别通过蓄热罐或储能的电池等来实现凭借对余热的回收将其蓄热于蓄热罐中，对热能的供给量与实际的热能的需求之间的动态的协调的调控，使其既能充分的发挥蓄热的经济效益，又能对热能的供给量的不确定性起到很好的调节作用。④负荷调控子系统：将多余的光伏发电的电能储存起来以便在需要时将其释放出来对光伏发电的功率的不确定性对供电的影响也大大地减小了通过对联合站的主要能耗设备的智能化的改造，既能对加热炉的温度、输油泵的转速等关键的参数的实时的调控，又能根据余热的回收量与光伏的出力等的变化，动态的调整负荷的运行状态从而大大提高了能耗的利用率采用物联网的实时数据采集手段。⑤监控调度中心：对耦合系统的各个环节的运行数据（如采出水的温度、光伏的出力、各个负荷的能耗、储能的状态等）都得以了全面的把握，从而通过对这些数据的深入的分析与优化的算法对其所对应的负荷的未来一时的变化趋

势进行准确的预测，根据对各个环节的未来一时的变化趋势对各个环节的调度，实现了系统的整体的优化的运行，提高了系统的能效。

### 2.2 关键设备参数确定

将采出的水的余热从原来的 42~65℃ 一气升至 85℃ 的高温水，实现了原水的高效的热能的再生利用，具有大幅度的节能的效果。其中的热泵机组的制热功率可达 500kW，且其 COP（性能系数）可取 4.2 以上将根据蓄热罐的容积、精良的保温层及其相对的较低的热损失率等，分别配制出 80~90℃ 的热水，将之充装在蓄热罐中，作为供暖的热源，由于蓄热罐的保温层的厚度均能满足热损失率  $\leq 2\%/d$  的要求，故可长期作为供暖的热源。根据项目的要求将 2MW 的光伏发电所对应的 250W 的单晶硅光伏组件共 8000 块，理论的转换效率可达 18% 左右凭借对锂电池的深度优化，配制出高容量的 1000kWh 的锂电池储能系统，其充放电的效率可达 90%，且可实现循环寿命  $\geq 3000$  次的高性能的储能电池。

## 3 耦合系统优化模型与调控策略

### 3.1 优化目标与约束条件

#### 3.1.1 优化目标

以联合站能源系统综合效益最大化为目标，建立多目标优化函数： $\min F = \alpha F_1 + \beta F_2 + \gamma F_3$

其中，F 为综合目标函数； $F_1$  为联合站年能耗成本； $F_2$  为碳排放量； $F_3$  为系统运维成本； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为权重系数，根据联合站实际需求确定，此处取  $\alpha = 0.5$ ， $\beta = 0.3$ ， $\gamma = 0.2$ 。

#### 3.1.2 约束条件

①能量平衡约束：热能供需平衡约束  $Q_{\text{回收}} + Q_{\text{辅助}} = Q_{\text{负荷}}$ （ $Q_{\text{回收}}$  为余热回收量， $Q_{\text{辅助}}$  为辅助热源供热量， $Q_{\text{负荷}}$  为热能需求）；电能供需平衡约束  $P_{\text{光伏}} + P_{\text{电网}} + P_{\text{储能放电}} = P_{\text{负荷}} + P_{\text{储能充电}}$ （ $P_{\text{光伏}}$  为光伏出力， $P_{\text{电网}}$  为电网供电量， $P_{\text{储能放电}}$  为储能电池放电量， $P_{\text{负荷}}$  为电力需求， $P_{\text{储能充电}}$  为储能电池充电量）。②设备运行约束：热泵机组制热功率约束 50~500kW；光伏组件出力约束 0~2000kW；储能电池 SOC（State of Charge）约束 20%~80%；加热炉热效率约束  $\geq 85\%$ 。③安全约束：蓄热罐温度约束  $\leq 90\text{℃}$ ；系统电压波动约束  $\leq \pm 5\%$ ；设备运行压力约束  $\leq$  设计压力。

### 3.2 优化模型构建

根据以上的优化目标以及对系统的各个约束条件的制约，通过对耦合系统的线性规划的方法建立了其对应的优化模型，在每个小时的时间尺度上对接下来 24h 的光伏的出力、采出的水的流量与温度以及对应

的能源的负荷的需求等都做了较为详细的预测,并利用该模型对得到的最佳的能源的调度的计划:余热的回收量、光伏的出力、储能的充放电、辅助的能源等都做了较为详细的调度通过对历史的光伏出力数据、太阳的辐照量、环境的温度、风的速度等多个因素的综合的输入下运用BP神经网络的模型对其下一时刻的光伏出力进行了预测同时对下一时的负荷也作了较为详细的预测主要通过通过对历史的能耗的数据、生产的计划、环境的温度等参数的综合的分析对其下一时的能耗的预测同时对下一时的采出的水的余热的回收量也作了较为详细的计算得出

### 3.3 动态调控策略

依托于运用优化模型,我们制定了一套“预测—调度—反馈—再调整”的动态管理策略,具体内容是这样的:在每日的调度安排中,具体来说,就是到了晚上20点的时候,我们会依据对第二天光伏发电量的预估、电力负荷的预估,还有采出水余热的预估情况,借助优化模型来制定出第二天的能源调度方案,进而明确各个设备的基础运行指标。

在系统运行过程中,实时收集各项运行数据,并与预先设定的预测数值进行比对。一旦发现偏差幅度超过5%的阈值,系统便会立即触发动态调整程序要是光伏发电的实际输出比预测值高,那就优先提高光伏电力直接供给负荷的比例,把多出来的电力存到储能电池里;而当光伏发电的实际输出比预测值低时,就让储能电池放电来补充,要是还不够的话,再由电网来供电当系统的余热回收的能量都已经满足了当前的负荷需求后,就可以将多余的热能通过蓄热罐的形式予以存储,同时也可以将余热回收的能量作为辅助的热源。当系统的余热回收的能量都已经满足了当前的负荷需求后,就可以将多余的热能通过蓄热罐的形式予以存储,同时也可以将余热回收的能量作为辅助的热源但当系统的设备遭遇了意外的故障或极端的天气突然使光伏的出力骤降、余热的回收也随之中断时,我们就立即将其自动切换至最为可靠的传统的能源的供应模式,从而为联合站的生产的稳定提供了最为有力的保障。

## 4 案例验证与效益分析

### 4.1 案例概况

以某油田联合站为案例,对采出水余热回收与光伏耦合系统进行仿真验证。该联合站基础数据如前文所述,采用AspenPlus软件模拟采出水余热回收过程,采用TRNSYS软件模拟光伏发电与系统耦合运行过程,仿真周期为1年,时间步长为1h。

### 4.2 仿真结果分析

仿真结果表明,耦合系统运行稳定,各项指标均

满足设计要求:①能源供应效果:采出水余热回收子系统年回收热能 $52.3 \times 10^4 \text{GJ}$ ,满足联合站68.5%的热能需求;光伏子系统年发电量480MWh,满足联合站6.2%的电力需求;储能系统充放电效率稳定在88%以上,蓄热罐热损失率控制在2%以内。②节能效果:耦合系统运行后,联合站年总能耗从 $101.55 \times 10^4 \text{GJ}$ 降至 $68.3 \times 10^4 \text{GJ}$ ,综合能耗降低32.7%。其中,加热炉天然气消耗量减少42.3%,电网电力消耗量减少18.5%。③减排效果:按天然气燃烧碳排放系数 $2.16 \text{kgCO}_2/\text{GJ}$ 、电网电力碳排放系数 $0.6 \text{kgCO}_2/\text{kWh}$ 计算,联合站年碳排放量从17860t降至11590t,减少35.2%。

### 4.3 经济效益分析

耦合系统总投资为1800万元,其中采出水余热回收子系统投资1000万元,光伏子系统投资600万元,储能与调控系统投资200万元。经济效益分析如下:

①节能收益:天然气价格按3.5元/ $\text{m}^3$ (热值 $36.36 \text{MJ}/\text{m}^3$ )计算,年节约天然气费用为 $(73.70 - 73.70 \times (1 - 42.3\%)) \times 10^9 \text{J} \div 36.36 \times 10^6 \text{J}/\text{m}^3 \times 3.5 \text{元}/\text{m}^3 \approx 278.6$ 万元;电价按0.65元/ $\text{kWh}$ 计算,年节约电费为 $(27.85 \times 10^9 \text{J} \div 3600 \text{kJ}/\text{kWh} \times (1 - 18.5\%)) \times 0.65 \text{元}/\text{kWh} \approx 32.4$ 万元;年总节能收益为311万元。②运维成本:系统年运维成本为35万元,包括设备维护、人员工资等。③投资回收期:静态投资回收期=总投资 $\div$ (年节能收益-年运维成本)= $1800 \div (311 - 35) = 6.5$ 年;考虑政府节能补贴(年补贴50万元),实际投资回收期为4.8年,经济效益显著。

### 4.4 敏感性分析

选取天然气价格、电价、光伏组件转换效率三个关键参数进行敏感性分析,结果表明:天然气价格每上涨10%,投资回收期缩短0.8年;电价每上涨10%,投资回收期缩短0.3年;光伏组件转换效率每提升1%,投资回收期缩短0.2年。因此,在天然气、电价上涨或光伏技术进步的背景下,耦合系统的经济效益将进一步提升。

### 参考文献:

- [1] 刘虎成. 浅谈光伏发电系统在油田中的应用[J]. 油气田地面工程, 2025(12).
- [2] 马啸. 油田计量间屋顶分布式光伏电站的设计与经济效益分析[J]. 石油石化节能与计量, 2025(11).
- [3] 肖坤; 王兴艳; 杨菲; 章龙; 黄静. 长庆油田分布式光伏项目投资控制及效益分析[J]. 现代工业经济和信 息化, 2025(10).
- [4] 王宇喆. 油田采出水余热利用技术的研究与应用[J]. 石油石化节能与计量, 2025(06).
- [5] 代云龙. 油田站场余热利用方案技术研究[J]. 石油石化节能与计量, 2025(06).