

# 氢储能油田孤岛综合能源微网规划与运行方法

滕新亮<sup>1,2</sup>, 赵雪峰<sup>2</sup>, 董宏丽<sup>1</sup>, 赵书琪<sup>1</sup>, 徐建军<sup>1</sup>, 李 栋<sup>1</sup>

(1. 东北石油大学 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163000)

**摘要:**为提升偏远地区能源自给能力,保障油田稳定运行,推动清洁能源利用,降低油田电力系统运行成本,提出一种考虑氢储能的油田孤岛综合能源微网规划与运行方案。建立考虑氢储能的油田孤岛综合能源微网模型,以年化投资运行成本最低为目标,约束条件考虑容量配置和运行优化过程,建立线性优化模型。基于  $k$ -means 算法,根据东北地区某油田综合能源微网的负荷历史数据,生成 4 个季度的多组典型日数据,对综合能源微网模型进行经济调度仿真,验证 3 种场景的经济性。结果表明:与电化学储能相比,采用氢储能系统的油田微网具有更高的新能源消纳率和更低的切负荷率,运行成本降低 5.4%。该结果为氢储能系统在油田孤岛微网中的应用提供参考。

**关键词:**油田微网;氢储能;综合能源微网;孤岛运行;优化调度;容量配置

**中图分类号:**TM73;TK01 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2026)01-0109-11

## 0 引言

近年来,中国“双碳”战略和“十四五”能源规划推动传统能源绿色转型,地方政府在油田电力系统中引入新能源发电,加快油气行业低碳改造进程<sup>[1-2]</sup>。油田多位于边远地区,供电难度大、可靠性差成为油田电力系统面临的主要问题<sup>[3]</sup>。油田用电负荷大、波动性强,接入主网对系统稳定性影响较大<sup>[4-5]</sup>。构建具备孤岛运行能力的油田微网,提升能源自给能力,成为推动油田绿色转型的关键路径,尤其是在新疆、内蒙古、东北等油田电力系统中,建立孤岛综合能源微网(Integrated Energy Microgrid, IEM)具有重要意义<sup>[6]</sup>。在油田及其他工业场景中,负荷具有与城市配电网显著不同的典型特征。大功率抽油机和注水泵等关键生产设备需要长时间持续运行,导致整体基荷水平较高<sup>[7-8]</sup>。与城市居民和商业负荷昼夜和周内规律性波动不同,油田负荷的变化受工艺和生产制度驱动,日内波动特征不明显<sup>[9-10]</sup>。热负荷占比较大,包括冬季采暖需求和井口加热等工艺环节,形成电—热耦合特性。部分大功率设备的启停引起短时突变,对电网稳定性构成冲击,高功率因数和启动电流对系统电能质量也有重要影响。

当主电网发生故障或处于偏远地区时,IEM 是一种可以独立运行的微型综合能源系统<sup>[11]</sup>。有关研究主要集中在孤岛运行下的多能源协调优化、储能调度策略等方面,通过可再生能源和储能设备合理配置,满足在孤岛运行下的稳定性和经济性需求。人们提出分层协调控制、主动配电网恢复策略及分布鲁棒优化方法,有效提升微网在突发扰动和不确定出力下的安全性和适应能力<sup>[12-14]</sup>;从供需灵活匹配与多目标智能优化角度,细化调度策略执行,为孤岛微网自调度提供理论支撑<sup>[15-16]</sup>。依靠调度优化难以彻底解决功率波动和能源失衡问题,需要引入储能系统作为关键补充。采用储能出力调节和负荷分类融合的能量管理机制,可提高孤岛微网的运行灵活性、稳定性及多场景响应能力<sup>[17-19]</sup>。传统电化学储能在能量密度、寿命和环境适应性方面存在不足,难以完全满足边远复杂环境下油田孤岛微网的长期运行需求<sup>[20]</sup>,探索更适用于油田孤岛工况的储能系统成为研究热点。

氢储能成为替代电化学储能的潜在方案<sup>[21]</sup>。近年来,更多研究将氢储能应用于偏远油田和海上平台等孤岛微网场景。樊围国等提出一种可以优化零碳的综合能源系统容量配置,有效提升系统运行灵活性<sup>[22]</sup>;将氢储能系统与分布式预测控制结合,可实现电—氢混合储能的精细化调度,增强系统动态响应能

收稿日期:2025-09-03;编辑:蔡田田

基金项目:黑龙江省重点研发计划项目(2024ZXJ01A04)

作者简介:滕新亮(1986—),男,博士,主要从事电力系统优化调度方面的研究。

通信作者:徐建军, E-mail: xujj@nepu.edu.cn

力<sup>[23-24]</sup>。与电化学储能相比,氢储能具有更高能量密度和长期储存能力,适合大规模调节风光等可再生能源;具备较强环境适应性,在高寒、高温及海上作业等场景中稳定高效;响应速度快,可有效应对新能源出力波动,提高利用率。考虑多微网协同,在多目标优化中兼顾碳减排、成本控制及系统可靠,氢储能可作为容量备用协调微网间储能资源,具有较好的低碳性和经济性<sup>[25-27]</sup>,氢储能在偏远地区和海上油田场景中具有较高工程适应性和发展潜力。以工业或油田负荷为主的孤岛系统的系统性容量与运行联合优化的研究较少,较少考虑电—热—氢多能耦合的容量配置、面向工业负荷特点的特征提取与典型日生成机制,难以反映工业系统的综合能源特性。

以某油田综合能源微网为研究对象,笔者建立含氢储能系统的孤岛微网数学模型;以年化投资运行成本最低为目标,建立考虑设备容量配置和运行优化的线性优化模型;根据算例地区负荷数据,分 4 个季度生成典型日,模拟系统的年运行成本,探讨氢储能系统的引入对油田孤岛微网经济发展的影响。

## 1 碳氢耦合 IEM 模型

### 1.1 模型设计

在油田孤岛微网场景下,负荷特性和运行需求与常规城市配电网存在显著差异。在容量配置中,应考虑电力平衡,并将电—热耦合与氢能存储的调度过程深度耦合,实现全局优化。在典型日生成与负荷聚类环节中,引入面向工业运行的特征量,更好捕捉油田负荷的动态规律。

孤岛油田 IEM 结构见图 1,其中,红色箭头为热能流动,黑色箭头为电能流动。系统中的能源侧包括新能源设备和热电联供机组,储能设备包括氢储能和电化学储能设备,电转热设备为电锅炉,满足孤岛油田综合能源系统的电、热需求。相邻孤岛组成孤岛群,形成电力市场,系统可向电力市场售电,向氢市场售氢,实现冗余能量的消纳。

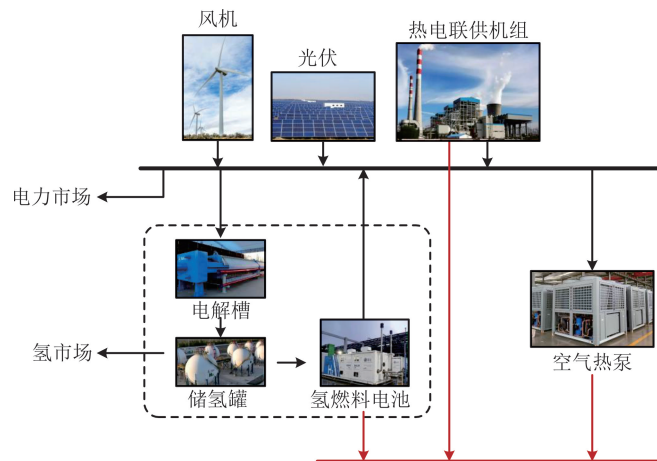


图 1 孤岛油田 IEM 结构  
Fig. 1 IEM structure of the isolated island oilfield

### 1.2 模型建立

氢储能系统包括电解槽、储氢罐和氢燃料电池。在电解槽中,利用质子交换膜进行电解水制氢,氢气存储在储氢罐中,再通过氢燃料电池转化为电能。该过程响应速度快,能够有效应对风机、光伏等可再生能源出力的波动性,在能源输出不稳定时可进行迅速调节。

在负荷低谷时段,系统可将剩余电力用于制氢,实现电能的高效转化与存储;在用电高峰或发电不足时,氢燃料电池将氢气转化为电能,为关键负荷供电,提高系统稳定性和供电可靠性。此外,氢气可长期储存,适用于极端天气或主能源中断的应急保障,在远离主网的油田孤岛微网中具有重要的储能价值。

电解槽的数学模型为

$$0 \leq X_{EL} \leq X_{EL}^{max}, \tag{1}$$

$$m_{EL,t} = k_{EL} P_{EL,t}, \tag{2}$$

$$0 \leq P_{EL,t} \leq X_{EL}, \quad (3)$$

式(1-3)中:  $X_{EL}$  为电解槽容量;  $X_{EL}^{\max}$  为电解槽容量上限;  $m_{EL,t}$  为  $t$  时刻电解槽制氢功率;  $k_{EL}$  为电氢转化因数;  $P_{EL,t}$  为  $t$  时刻电解槽耗电功率。

储氢罐的数学模型为

$$0 \leq X_{HST} \leq X_{HST}^{\max}, \quad (4)$$

$$\Phi_{HST,t} = \Phi_{HST,t-1} + m_{HST,t}, \quad (5)$$

$$-m_{HST}^{\max} \leq m_{HST,t} \leq m_{HST}^{\max}, \quad (6)$$

$$\eta_{HST}^{\min} X_{HST} \leq \Phi_{HST,t} \leq \eta_{HST}^{\max} X_{HST}, \quad (7)$$

式(4-7)中:  $X_{HST}$  为储氢罐容量;  $X_{HST}^{\max}$  为储氢罐容量上限;  $\Phi_{HST,t}$  为  $t$  时刻储氢罐氢气存储量;  $m_{HST,t}$  为  $t$  时刻储氢罐充放电功率;  $m_{HST}^{\max}$  为储氢罐充放电功率上限;  $\eta_{HST}^{\max}$  和  $\eta_{HST}^{\min}$  分别为储氢罐氢气存储量上、下限因数。

氢燃料电池的数学模型为

$$0 \leq X_{HFC} \leq X_{HFC}^{\max}, \quad (8)$$

$$P_{HFC,t} = \eta_{HFC}^e m_{HFC,t}^e, \quad (9)$$

$$k_{HFC}^{\text{down}} X_{HFC} \leq P_{HFC,t} - P_{HFC,t-1} \leq k_{HFC}^{\text{up}} X_{HFC}, \quad (10)$$

$$0 \leq P_{HFC,t} \leq X_{HFC}, \quad (11)$$

式(8-11)中:  $X_{HFC}$  为氢燃料电池容量;  $X_{HFC}^{\max}$  为氢燃料电池容量上限;  $P_{HFC,t}$  为  $t$  时刻氢燃料电池发电功率;  $\eta_{HFC}^e$  为电转化因数;  $m_{HFC,t}^e$  为  $t$  时刻发电耗氢量;  $k_{HFC}^{\text{down}}$  和  $k_{HFC}^{\text{up}}$  分别为功率向上和向下爬坡因数。

## 2 年化投资与运行优化模型

以年为单位,在 4 个季度中分别选取 4 个典型日,将运行成本、惩罚成本等日运行成本和投资成本、运维成本等长期使用成本折算为年化值,计算年化投资与运行成本。

### 2.1 约束条件

(1) 光伏机组出力约束。光伏板发电功率随太阳辐射强度和板面参数变化:

$$P_{PV,t} = 10^{-3} X_{PV} \cos \theta \eta_{PV} R_t S_{PV}, \quad (12)$$

$$X_{PV}^{\min} \leq X_{PV} \leq X_{PV}^{\max}, \quad (13)$$

式(12-13)中:  $P_{PV,t}$  为  $t$  时刻光伏板发电功率;  $X_{PV}$  为光伏板容量;  $\theta$  为光伏板倾斜角度;  $\eta_{PV}$  为光伏板产能因数;  $R_t$  为太阳辐射强度;  $S_{PV}$  为光伏板面积;  $X_{PV}^{\min}$  和  $X_{PV}^{\max}$  分别为光伏装机容量的上、下限。

(2) 风电机组出力约束。风机出力受风速和额定容量的影响:

$$P_{WT,t} = P_{WT,n} \frac{v - v_{in}}{v_{rate} - v_{in}}, \quad (14)$$

式中:  $P_{WT,t}$  为  $t$  时刻风机出力;  $P_{WT,n}$  为风机额定功率;  $v$  为实际风速;  $v_{in}$  为风机切入风速;  $v_{rate}$  为风机额定风速。式(14)成立的区间为  $v \in [v_{in}, v_{rate}]$ , 当低于切入风速时,出力为 0 MW; 当大于额定风速时,功率为额定功率。

(3) 热电联产机组出力约束。热电联产机组中发电与供热耦合,主要受纯凝工况和最小采暖功率约束:

$$\underline{P}_{CHP,t} \leq P_{CHP,t} \leq \overline{P}_{CHP,t}, \quad (15)$$

$$\overline{P}_{CHP,t} = P_{CHP,cn}^{\max} - \frac{H_{CHP,t}}{H_{CHP}^{\max}} (P_{CHP,cn}^{\max} - P_{CHP,qm}^{\max}), \quad (16)$$

$$\underline{P}_{CHP,t} = \max \left( \frac{H_{CHP,t} - H_{CHP}^{\max}}{H_{CHP}^{\max} - H_{CHP,pm}^{\max}} (P_{CHP,qm}^{\min} - P_{CHP,cn}^{\min}), P_{CHP,cn}^{\min} \right), \quad (17)$$

$$0 \leq H_{CHP,t} \leq H_{CHP}^{\max}, \quad (18)$$

式(15-18)中:  $P_{CHP,t}$  和  $H_{CHP,t}$  分别为  $t$  时刻热电联产机组的发电和发热功率;  $\underline{P}_{CHP,t}$  和  $\overline{P}_{CHP,t}$  分别为供电下限和上限;  $P_{CHP,cn}^{\min}$  和  $P_{CHP,cn}^{\max}$  分别为纯凝工况下的最小采暖抽汽功率和最大发电功率;  $H_{CHP}^{\max}$  为热电联产机组

最大供热功率;  $P_{\text{CHP,qm}}^{\max}$  和  $P_{\text{CHP,qm}}^{\min}$  分别为发电机最大供热出力下的最大和最小供电功率;  $H_{\text{CHP,pm}}^{\max}$  为纯凝工况最小采暖抽汽功率下的最大发热功率。

(4)空气热泵产能约束。空气热泵在优化调度中合理分配电力与热能,转化效率决定供热量与耗电量的关系:

$$0 \leq X_{\text{ASHP}} \leq X_{\text{ASHP}}^{\max}, \quad (19)$$

$$H_{\text{ASHP},t} = \eta_{\text{ASHP}} P_{\text{ASHP},t}, \quad (20)$$

$$0 \leq P_{\text{ASHP},t} \leq X_{\text{ASHP}}, \quad (21)$$

式(19-21)中:  $X_{\text{ASHP}}$  为空气热泵容量;  $X_{\text{ASHP}}^{\max}$  为空气热泵容量上限;  $H_{\text{ASHP},t}$  为  $t$  时刻产热功率;  $\eta_{\text{ASHP}}$  为电热转化效率;  $P_{\text{ASHP},t}$  为  $t$  时刻耗电功率。

(5)弃风弃光约束。弃风弃光量小于风光发电总量:

$$0 \leq P_{\text{PV},t}^{\text{cut}} \leq P_{\text{PV},t}, \quad (22)$$

$$0 \leq P_{\text{WT},t}^{\text{cut}} \leq P_{\text{WT},t}, \quad (23)$$

式(22-23)中:  $P_{\text{PV},t}^{\text{cut}}$  和  $P_{\text{WT},t}^{\text{cut}}$  分别为  $t$  时刻弃光量和弃风量。

(6)切负荷约束。切负荷功率小于负荷总功率:

$$0 \leq P_{\text{load},t}^{\text{cut}} \leq P_{\text{load},t}, \quad (24)$$

$$0 \leq H_{\text{load},t}^{\text{cut}} \leq H_{\text{load},t}, \quad (25)$$

式(24-25)中:  $P_{\text{load},t}$  和  $H_{\text{load},t}$  分别为  $t$  时刻电、热负荷需求;  $P_{\text{load},t}^{\text{cut}}$  和  $H_{\text{load},t}^{\text{cut}}$  分别为  $t$  时刻电、热切负荷。

(7)功率平衡约束。功率平衡约束确保每个时刻电力与热力的供需平衡,保证调度方案可行,防止由功率不平衡导致的系统失稳。

$$(P_{\text{PV},t} - P_{\text{PV},t}^{\text{cut}}) + (P_{\text{WT},t} - P_{\text{WT},t}^{\text{cut}}) + P_{\text{CHP},t} + P_{\text{HFC},t} = P_{\text{ASHP},t} + P_{\text{EL},t} + (P_{\text{load},t} - P_{\text{load},t}^{\text{cut}}) + P_{\text{em},t}, \quad (26)$$

$$H_{\text{CHP},t} + H_{\text{HFC},t} + H_{\text{ASHP},t} = H_{\text{load},t} - H_{\text{load},t}^{\text{cut}}, \quad (27)$$

$$m_{\text{EL},t} = m_{\text{HST},t} + m_{\text{HFC},t}^e + m_{\text{HFC},t}^h + m_{\text{hm},t}, \quad (28)$$

式(26-28)中:  $P_{\text{em},t}$  为  $t$  时刻电力市场交互功率;  $m_{\text{HFC},t}^e$  和  $m_{\text{HFC},t}^h$  分别为  $t$  时刻氢燃料电池用于发电和发热的耗氢量;  $m_{\text{hm},t}$  为  $t$  时刻的售氢量。

## 2.2 目标函数

以最小化系统成本  $F$  为目标,将优化周期归算至年,运行成本目标函数:

$$F = \min(R_{\text{em}} + R_{\text{gm}} + R_{\text{hm}} + C_{\text{pen}} + C_{\text{inv}} + C_{\text{om}}), \quad (29)$$

式中:  $R_{\text{em}}$  为年购天然气成本;  $R_{\text{gm}}$  为年售绿证成本;  $R_{\text{hm}}$  为年售氢成本;  $C_{\text{pen}}$  为年惩罚成本;  $C_{\text{inv}}$  为年化投资成本;  $C_{\text{om}}$  为年运维成本。

$$R_{\text{em}} = \frac{365}{N} \sum_{t=1}^N c_{\text{em},t} E_{\text{em},t}, \quad (30)$$

$$R_{\text{gm}} = \frac{365}{N} \sum_{t=1}^N c_{\text{gm},t} E_{\text{gm},t}, \quad (31)$$

$$R_{\text{hm}} = \frac{365}{N} \sum_{t=1}^N c_{\text{hm},t} M_{\text{hm},t}, \quad (32)$$

$$C_{\text{pen}} = \frac{365}{N} \sum_{t=1}^N (c_{\text{pen}}^{\text{PV}} P_{\text{PV},t}^{\text{cut}} + c_{\text{pen}}^{\text{WT}} P_{\text{WT},t}^{\text{cut}} + c_{\text{pen}}^{\text{e,load}} P_{\text{load},t}^{\text{cut}} + c_{\text{pen}}^{\text{h,load}} H_{\text{load},t}^{\text{cut}}), \quad (33)$$

式(30-33)中:  $c_{\text{em},t}$  为  $t$  时刻购天然气单价;  $E_{\text{em},t}$  为  $t$  时刻购天然气量;  $c_{\text{gm},t}$  为  $t$  时刻绿证单价;  $E_{\text{gm},t}$  为  $t$  时刻能源消纳量;  $c_{\text{hm},t}$  为  $t$  时刻售氢单价;  $c_{\text{pen}}^{\text{WT}}$  和  $c_{\text{pen}}^{\text{PV}}$  分别为单位弃风和弃光惩罚;  $c_{\text{pen}}^{\text{e,load}}$  和  $c_{\text{pen}}^{\text{h,load}}$  分别为单位切电和热负荷惩罚;  $P_{\text{WT},t}^{\text{cut}}$  和  $P_{\text{PV},t}^{\text{cut}}$  分别为  $t$  时刻弃风和弃光量;  $P_{\text{load},t}^{\text{cut}}$  和  $H_{\text{load},t}^{\text{cut}}$  分别为单位切电和切热负荷量。

年化折旧成本  $C_{\text{inv}}$  和年运维成本  $C_{\text{om}}$  分别为

$$C_{\text{inv}} = \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} (c_{\text{PV}}^{\text{inv}} X_{\text{PV}} + c_{\text{WT}}^{\text{inv}} X_{\text{WT}} + c_{\text{CHP}}^{\text{inv}} X_{\text{CHP}} + c_{\text{ES}}^{\text{inv}} X_{\text{ES}} + c_{\text{EL}}^{\text{inv}} X_{\text{EL}} + c_{\text{HFC}}^{\text{inv}} X_{\text{HFC}} + c_{\text{HST}}^{\text{inv}} X_{\text{HST}} + c_{\text{ASHP}}^{\text{inv}} X_{\text{ASHP}}), \quad (34)$$

$$C_{\text{om}} = \lambda C_{\text{inv}}, \quad (35)$$

式(34-35)中:  $c_{\text{PV}}^{\text{inv}}$ 、 $c_{\text{WT}}^{\text{inv}}$ 、 $c_{\text{CHP}}^{\text{inv}}$ 、 $c_{\text{ES}}^{\text{inv}}$ 、 $c_{\text{EL}}^{\text{inv}}$ 、 $c_{\text{HFC}}^{\text{inv}}$ 、 $c_{\text{HST}}^{\text{inv}}$ 、 $c_{\text{ASHP}}^{\text{inv}}$  分别为光伏、风机、热电联供系统、化学电池、电解槽、氢燃料电池、储氢罐、空气热泵的单位投资成本;  $X_{\text{PV}}$ 、 $X_{\text{WT}}$ 、 $X_{\text{CHP}}$ 、 $X_{\text{ES}}$ 、 $X_{\text{EL}}$ 、 $X_{\text{HFC}}$ 、 $X_{\text{HST}}$ 、 $X_{\text{ASHP}}$  为设备配置容量;  $\lambda$  为设备运维因数;  $r$  为年利率;  $m$  为综合能源系统的使用年限。

### 3 典型日生成

为全面刻画负荷运行特性,构建工业场景的特征向量。输入特征包括电负荷与热负荷的时序功率,引入小时级导数,反映负荷变化速率和波动趋势。增加工作日与非工作日的标识,以区分生产制度对负荷的差异性影响。为体现设备运行特征,特征向量包含关键设备的启停计数,用于捕捉短时突变及运行工况差异<sup>[27-29]</sup>。

东北地区不同季节的负荷具有较大差异,采用  $k$ -mean 算法对 4 个季节分别进行典型日生成。分别将 4 个季节设定为 4 个大类,各季节使用的聚类数据:春季为 3、4、5 月,夏季为 6、7、8 月,秋季为 9、10、11 月,冬季为 1、2、12 月。典型日生成步骤:(1)原始数据筛选。对原始数据进行采样频率调整和缺失数据处理。(2)特征选择。选取电、热负荷及小时级导数、工作日标识、设备启停次数作为分类特征。(3)数据归一化。由于特征规模差异较大,对特征进行归一化处理,均匀放缩至 0~1 之间。(4) $k$ -means 聚类。每个季节生成 3 个小类,将求解聚类中心作为季节的典型日数据。(5)典型日生成。将与聚类中心最接近的负荷曲线作为典型日负荷曲线。

$$\min_{C_k} \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2, \quad (36)$$

式中:  $C_k$  为第  $k$  个聚类;  $\mu_k$  为第  $k$  个聚类的聚类中心;  $x_i$  为样本;  $K$  为设定的聚类数。

更新聚类中心的位置公式为

$$\mu_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{x_i \in C_k} x_i. \quad (37)$$

## 4 仿真分析

### 4.1 数据采集

仿真实验数据采用中国东北地区某地某油田微型综合能源系统的全年电、热负荷。年负荷曲线见图 2(a),一年内的电负荷在冬季和夏季的幅值变化不大,主要受油田生产需求的影响,波动具有一定的周期性,热负荷呈冬季高、夏季低的趋势。周负荷曲线见图 2(b),一日内的电、热负荷数据呈一定的规律性。

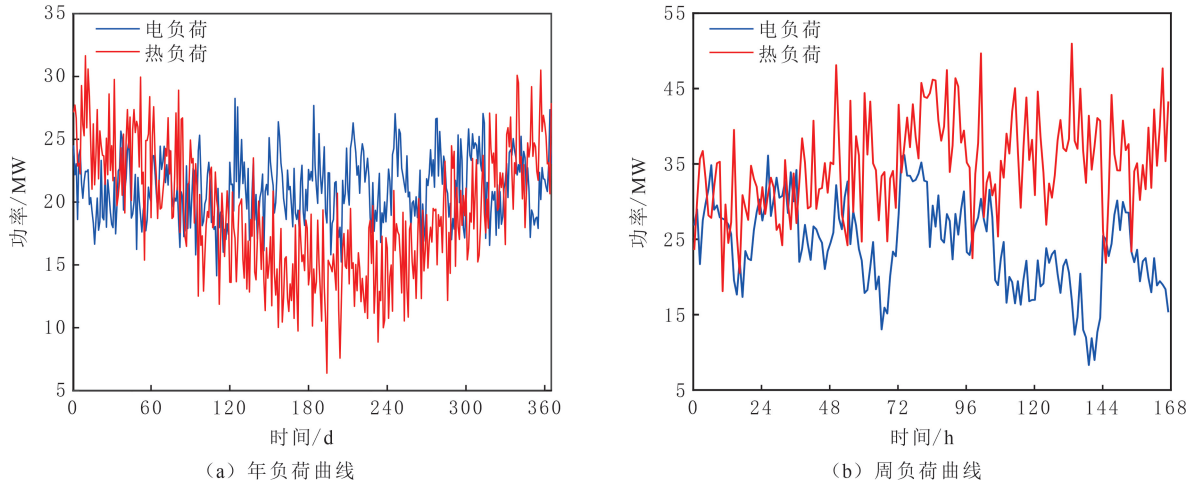


图 2 东北地区某油田综合能源系统负荷数据

Fig. 2 Load data of the integrated energy system in a certain oilfield in Northeast China

总体上,全年电负荷相对平稳,热负荷呈冬季高、夏季低的典型趋势,对环境气温高度敏感,与寒冷地区冬季供暖需求相关。与城市电网相比,油田负荷的日内规律性明显较弱,表现为波动幅度大、突发性变化多。油田负荷更具有不确定性,对系统运行的灵活性和调节能力提出更高的要求。

某地电力和氢能市场的交易能力与价格见表1。某地村庄、工厂等其他小型微电网需要电能和氢能的供应,电能和氢能消纳能力较强,具有一定的购能需求,两种能量的出售能力较差。

表1 某地电力和氢能市场交易能力与价格

Table 1 The trading capacity and prices of the electricity and hydrogen energy markets in a certain area

市场	参数	容量	价格
电力市场	市场购电能力	8 MW	0.45 元/(kW·h)
	市场售电能力	1 MW	0.35 元/(kW·h)
氢能市场	氢气购入能力	100 kg/天	30 元/kg
	氢气售出能力	10 kg/天	35 元/kg

该系统从油田电网购电,油田电网与城市电网独立运行,但油田负荷波动大,并网运行时,对电网的稳定性影响较大,且部分油田位置偏远,电网建设成本高,应降低油田微网对上级电网的依赖。假设系统独立运行,不从电网购电,模拟孤岛微网运行。设备投资成本、使用寿命和年运维费率见表2。应用线性数学模型,采用 cplex/yalmip 求解器进行求解。求解器采用 CPLEX 15.1,设置求解精度为  $10^{-6}$ ,最大迭代次数为  $10^4$  次。

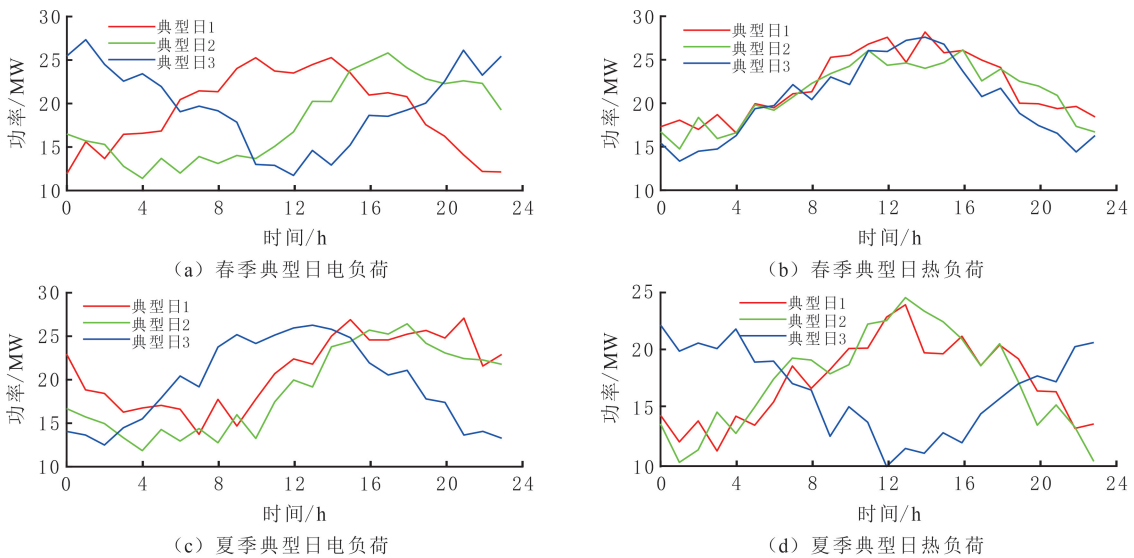
表2 设备投资成本、使用寿命和年运维费率

Table 2 Equipment investment cost, service life and annual operation and maintenance rate

设备类型	投资成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	设备寿命/a	年运维费率/%	设备类型	投资成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	设备寿命/a	年运维费率/%
光伏组件	4 500	25	1.5	电解槽	8 000	20	2.5
风力发电机	1 808	20	2.0	储氢罐	1 200	20	1.0
热电联产机组	6 000	15	3.0	氢燃料电池	10 000	15	3.0
锂电池储能	4 000	15	2.0	空气源热泵	3 000	20	1.5

### 4.2 典型日选取

四季典型日电、热负荷数据见图3。由图3可知,夏季主要由热负荷波动主导,春、秋季以电负荷变化为主导。其中,春季的电负荷受生产计划影响显著,典型日1在午间达到负荷高峰,清晨和夜晚负荷较低;典型日2、3的负荷高峰出现在清晨和夜晚,反映不同班次和生产制度的运行特征。



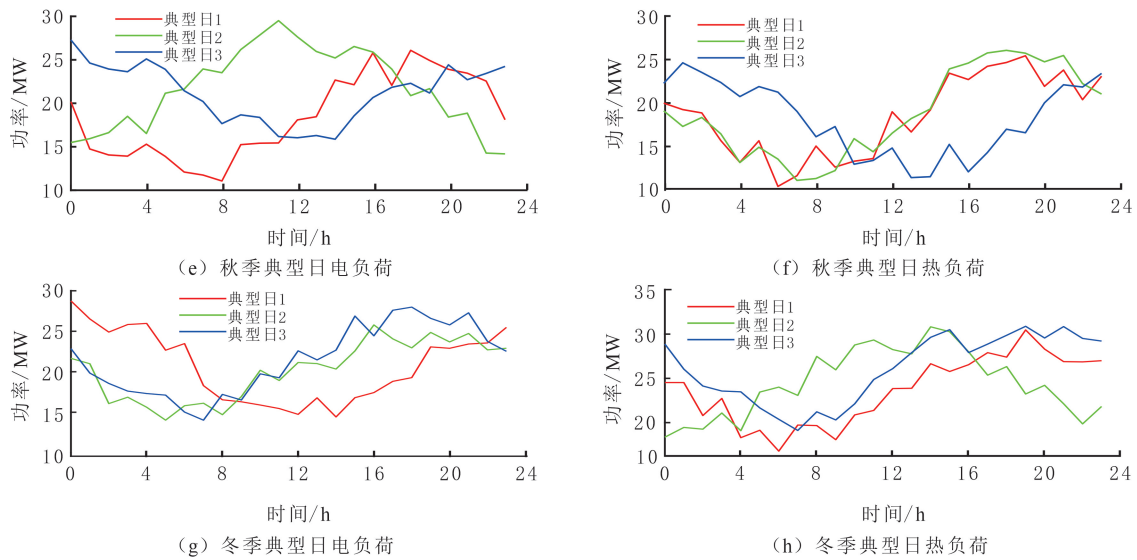


图3 四季典型日电、热负荷曲线

Fig. 3 Typical curves on electricity load and heat load for the four seasons

油田电力系统的电负荷主要包括采油机、注水泵等大功率设备运行负荷。全年电负荷平均约为 20.1 MW, 峰值为 25.6 MW, 谷值为 15.2 MW, 小时级变异系数为 0.12, 整体平稳, 存在短时波动。热负荷的季节性较为明显, 冬季平均为 26.4 MW, 峰值为 31.2 MW; 夏季平均为 14.3 MW, 谷值为 10.5 MW; 春秋平均约为 20.8 MW, 峰谷比约为 1.4, 小时级变异系数为 0.18, 波动主要受井加热与采暖设备启停影响。油田负荷具有基高荷、热电耦合明显、短时波动频繁的特性, 应兼顾长期稳定性与短期调度性。

#### 4.3 容量配置

根据年化投资与运行优化模型, 计算孤岛油田综合能源系统的设备容量配置结果。系统的风电装机容量为 15.3 MW, 光伏装机容量为 16.4 MW, 总装机容量超过电负荷均值。由于新能源出力与负荷具有显著的波动性和随机性, 系统中存在冗余与缺口, 表明仅依赖风光资源并不能保证系统安全运行, 必须配置储能设备进行平衡调节。

在可调节电能供应方面, 系统配置热电联产机组与燃料电池, 最大供电功率分别为 13.6、7.4 MW。热电联产机组在供电时需考虑供热需求, 实际出力受限。在新能源不足时, 能够为系统提供稳定支撑, 说明系统具备较强的电力保障能力。在可调节热能供应方面, 热电联产机组与空气热泵共同承担供热任务, 最大供热功率分别为 23.7、8.7 MW。该配置与系统在严寒季节的热负荷需求基本匹配, 系统在热能供给方面具有较强的保障能力, 确保电热耦合运行的可靠性。

在氢储能系统的配置中, 电解槽最大功率为 13.8 MW, 氢燃料电池最大功率为 7.4 MW, 氢储罐容量为 1 463 kg。根据燃料电池的满载功率计算, 氢储量可支持系统约为 14 h 的连续运行。在夜间或新能源低谷时段, 氢储能系统能够与热电联产协同, 保障系统平稳运行, 保证系统长周期调节能力。同时, 氢储能还可部分用于外售。

#### 4.4 调度优化

以春季的典型日 1 为例, 油田孤岛综合能源微网日调度的电、热负荷平衡结果见图 4-5。由图 4-5 可知, 典型日 1 的热电联产机组总供电量为 187.2 MW·h, 总供热量为 306.6 MW·h。新能源发电量为 487.4 MW·h, 消纳 436.8 MW·h。热电联产机组的供热量远超过于供电量, 系统的电能主要由新能源发电供应, 热电联产机组具有调节作用, 新能源消纳率为 89.6%。热电联产机组受设备启停、爬坡功率约束等因素限制, 全天功率相对比较平均。系统更趋向于在夜间向电力市场售电, 在 13:00~14:00 消纳受阻时段向电力市场售电, 当日未从电力市场购电。空气热泵总供热量为 209.4 MW·h, 热负荷由热电联产机组和空气热泵供应, 二者具有一定的自主调控能力, 但受功率上限和电负荷耦合的约束, 在部分时段产

生负荷缺额,在 17:00 时的切负荷为 3.8 MW。

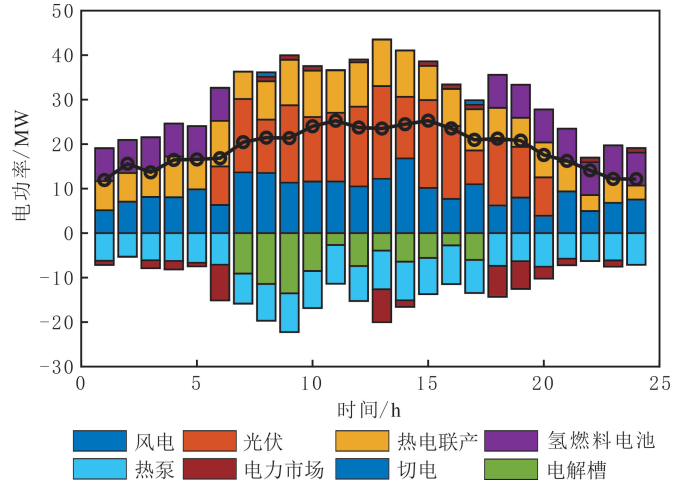


图 4 典型日 1 的电负荷平衡结果

Fig. 4 Results of electrical load balancing of typical day 1

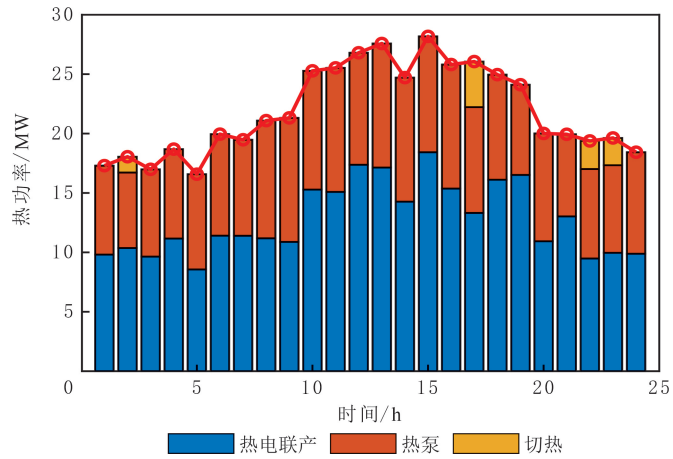


图 5 典型日 1 的热负荷平衡结果

Fig. 5 Results of heat load balancing of typical day 1

典型日 1 的储氢罐剩余容量见图 6。在氢储能系统中,氢燃料电池的放电量为 96.2 MW · h,在新能源出力低谷期具有较好的调节作用,在中午时段太阳能发电高峰期进行电解水,电解槽总耗能为 107.4 MW · h,将氢气输入储氢罐进行存储,向氢能市场售氢量为 27.4 kg。切电负荷为 2.2 MW,切热负荷为 9.7 MW,切负荷产生惩罚成本。为达到经济性最优的调度目标,考虑电负荷与热负荷的重要性不同,调度方案中对电负荷和热负荷进行削减,在允许范围内,实现系统综合目标最大化。

#### 4.5 经济性对比

为验证氢储能系统在油田综合能源系统中的经济性优势,对油田孤岛综合能源微网结构设计 3 种场景:(1)场景 1,油田孤岛综合能源微网系统;(2)场景 2,系统中不配置电解槽、氢储罐和氢燃料电池,配置电化学储能;(3)场景 3,系统中不配置储能,并网运行,从主网购电量无限制。3 种场景的年运行成本见

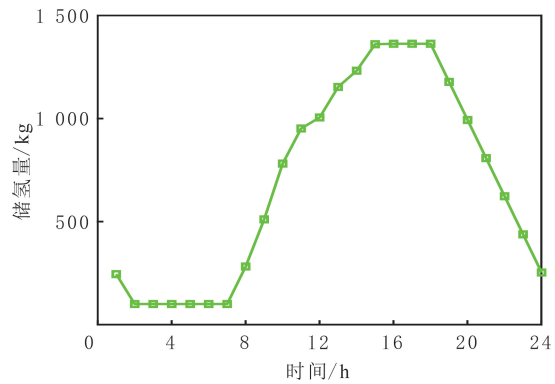


图 6 典型日 1 的储氢罐剩余容量

Fig. 6 Remaining capacity of the hydrogen storage tank of typical day 1

表 3。

表 3 不同场景的年运行成本

场景	购电成本	购氢成本	购天然气成本	售绿证成本	投资运维成本	惩罚成本	总成本
1	-186	-121	929	-293	3 845	42	4 216
2	57	0	910	-182	3 553	118	4 456
3	1 073	0	235	-31	526	53	1 856

油田孤岛综合能源微网系统在建设氢储能后获得购电收益和购氢收益,场景 2 和场景 3 的购电成本为正数,即系统从电力市场和主电网中的购电大于售电,场景 3 并网运行,从主网购电为主要的电能来源,购电成本占总成本的大部分。场景 2 和场景 3 的售绿证成本降低,说明场景 2 和场景 3 的新能源消纳量降低,投资运维成本降低。这是由于储能容量和新能源容量低于场景 1 的,两个场景的新能源装机总量分别为 17.6、8.2 MW。场景 2 的惩罚成本较高,切负荷较多,说明电化学储能与氢储能相比,调节单位负荷所需成本更高,产生更多的切负荷。

与场景 2 相比,场景 1 总成本降低 5.4%,说明在油田 IEM 长期孤岛模式运行时,氢储能相比于电化学储能具有更好的经济优势。场景 3 的总成本较低,与主网连接,可以从电网中购电,无需配备大容量的发电设备。由于未考虑电网的建设费用,总成本为孤岛模式的一半。除去建设成本,3 个场景的年运行成本分别为 371、903、1 330 万元,说明场景 1 具有较好的经济优势。考虑氢储能的油田孤岛综合能源微网模型,保证经济性的同时具有较低的切负荷率,说明氢储能在油田孤岛微网场景下具有较好的经济优势和工程前景。

## 5 结论

(1) 考虑氢储能建立油田孤岛综合能源微网模型,以年化投资运行成本最低为目标,建立考虑设备容量配置和运行优化的线性优化模型;根据算例地区负荷,分 4 个季度生成典型日,模拟系统的年运行成本,探讨氢储能系统的引入对油田孤岛微网经济发展的影响。

(2) 在油田 IEM 长期孤岛模式运行时,氢储能相比于电化学储能具有更好的经济优势。采用氢储能的综合能源微网系统的新能源消纳率明显提高,年运行成本降低 5.4%。

(3) 与常规并网运行方式相比,考虑氢储能的油田孤岛综合能源微网模型具有较低的运行成本和切负荷率,氢储能在孤岛油田微网场景下具有较好的经济优势和工程前景。

## 参考文献(References):

- [1] 高建崇,刘义刚,卢祥国,等. 疏松砂岩油藏弱凝胶驱油井堵塞机制及技术对策[J]. 特种油气藏, 2025, 32(6): 141-149.  
Gao Jianchong, Liu Yigang, Lu Xiangguo, et al. Plugging mechanisms of weak gel flooding wells in unconsolidated sandstone reservoirs and corresponding technical countermeasures[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2025, 32(6): 141-149.
- [2] 顾启林,宋宏志,林涛,等. 海上稠油热采井新型隔热油管扶正器的研制与应用[J]. 特种油气藏, 2025, 32(2): 162-167.  
Gu Qilin, Song Hongzhi, Lin Tao, et al. Development and application of a new type of insulated tubing centralizer for offshore heavy oil thermal production wells[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2025, 32(2): 162-167.
- [3] 袁杰,杜银昌,许建奎,等. 基于 ETAP 的海上油田群电力系统组网暂态稳定性仿真分析[J]. 电气应用, 2024, 43(5): 8-14.  
Yuan Jie, Du Yinchang, Xu Jiankui, et al. Simulation analysis on transient stability of offshore oil fields power system networking based on ETAP[J]. Electrotechnical Application, 2024, 43(5): 8-14.
- [4] 王学斌,梁剑峰. 油田电力系统自动化控制技术的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(11): 172-174.  
Wang Xuebin, Liang Jianfeng. The application of automatic control technology in oilfield power systems[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2024, 44(11): 172-174.
- [5] 魏澈,苏开元,邱银锋,等. 海上油田群新型电力系统的构建路径与关键技术[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3287-3298.  
Wei Che, Su Kaiyuan, Qiu Yinfeng, et al. Construction path and key technologies of new-type offshore oilfield power systems[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3287-3298.

- [6] 赵书琪,刘勇,徐建军,等.考虑共享储能的孤岛油田微电网协同调度策略[J/OL].南方电网技术,1-14[2026-01-28].<https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250422.0650.010>.  
Zhao Shuqi, Liu Yong, Xu Jianjun, et al. Collaborative scheduling strategy for islanded oilfield microgrid clusters considering shared energy storage [J/OL]. Southern Power System Technology, 1-14 [2026-01-28]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250422.0650.010>.
- [7] 徐建军,黄立达,闫丽梅,等.基于层次多任务深度学习的绝缘子自爆缺陷检测[J].电工技术学报,2021,36(7):1407-1415.  
Xu Jianjun, Huang Lida, Yan Limei, et al. Insulator self-explosion defect detection based on hierarchical multi-task deep learning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021,36(7):1407-1415.
- [8] 王韵怡,张金亚.太阳能储热井口原油加热系统性能研究[J].石油化工高等学校学报,2025,38(1):49-58.  
Wang Yunyi, Zhang Jinya. Study on solar heating crude oil system with thermal energy storage-based installation[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2025,38(1):49-58.
- [9] 闫丽梅,刘永强,徐建军,等.基于 Grabcut 分割和填充物面积判别的复合绝缘子断串诊断[J].电力系统保护与控制,2021,49(22):114-119.  
Yan Limei, Liu Yongqiang, Xu Jianjun, et al. Broken string diagnosis of composite insulator based on Grabcut segmentation and filler area discrimination[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(22):114-119.
- [10] Quan Dongrui, Xie Haipeng, Li Peixuan, et al. Optimal operation of electric-hydrogen coupling micro-energy networks considering the self-heat-recovery[J]. Energy, 2025,320:135309.
- [11] 彭程,赵雪峰,邓炜瀚,等.基于源荷不确定性的油田综合能源系统优化调度方法[J].东北石油大学学报,2025,49(1):101-116.  
Peng Cheng, Zhao Xuefeng, Deng Weihang, et al. An optimal scheduling method for oilfield integrated energy system considering source-load uncertainty[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2025,49(1):101-116.
- [12] 张育伟,肖迁,穆云飞,等.考虑频率与电压越限风险的孤岛微电网群分层协调控制策略[J].电力系统自动化,2025,49(5):99-108.  
Zhang Yuwei, Xiao Qian, Mu Yunfei, et al. Hierarchical coordinated control strategy of islanded microgrid cluster considering frequency and voltage limit violation risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025,49(5):99-108.
- [13] 田书欣,姚尚坤,符杨,等.地震灾害下考虑交通路况的主动配电网动态协同恢复策略[J].电力建设,2024,45(1):68-82.  
Tian Shuxin, Yao Shangkun, Fu Yang, et al. Dynamic collaborative restoration strategy of active distribution network considering traffic condition under earthquake[J]. Electric Power Construction, 2024,45(1):68-82.
- [14] 胡寰宇,艾欣,胡俊杰,等.考虑频率动态安全的孤岛微电网分布鲁棒调度方法[J].电网技术,2023,47(12):5057-5071.  
Hu Huanyu, Ai Xin, Hu Junjie, et al. Distributionally robust optimal scheduling for island microgrid cluster considering frequency dynamic security[J]. Power System Technology, 2023,47(12):5057-5071.
- [15] 冉金周,李华强,李彦君,等.考虑灵活性供需匹配的孤岛微网优化调度策略[J].太阳能学报,2022,43(5):36-44.  
Ran Jinzhou, Li Huaqiang, Li Yanjun, et al. Optimal scheduling of isolated microgrid considering flexible power supply and demand [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022,43(5):36-44.
- [16] 李家鑫.基于遗传算法的多目标微电网优化调度研究[J].中国设备工程,2022,45(3):137-139.  
Li Jiaxin. Research on multi-objective microgrid optimal scheduling based on genetic algorithm[J]. China Plant Engineering, 2022, 45(3):137-139.
- [17] 张林,郭辉,姚李孝.基于改进蝙蝠算法的微电网优化研究[J].电网与清洁能源,2021,37(4):122-126.  
Zhang Lin, Guo Hui, Yao Lixiao. Research on microgrid optimization based on improved bat algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2021,37(4):122-126.
- [18] 杨茂,王金鑫.考虑可再生能源出力不确定的孤岛型微电网优化调度[J].中国电机工程学报,2021,41(3):973-985.  
Yang Mao, Wang Jinxin. Optimal scheduling of islanded microgrid considering uncertain output of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(3):973-985.
- [19] 张忠,王建学,曹晓宇.基于负荷分类调度的孤岛型微网能量管理方法[J].电力系统自动化,2015,39(15):17-23.  
Zhang Zhong, Wang Jianxue, Cao Xiaoyu. Generalized control strategy for grid-connected and island operation of VSC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(15):17-23.
- [20] Zhang Yuanshi, Ge Yiwu, Wang Shunjiang, et al. Research on the optimal operation of a prosumer micro energy network centred on data centres[J]. IET Renewable Power Generation, 2024,18(16):3869-3889.
- [21] Ju Liwei, Lu Xiaolong, Li Fanqi, et al. Two-stage optimal dispatching model and benefit allocation strategy for hydrogen energy storage system-carbon capture and utilization system-based micro-energy grid[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 313:118618.
- [22] 樊围国,聂万庆,宋明浩.多元市场下含氢储能替代的零碳综合能源系统容量优化配置研究[J].电力科学与工程,2025,41(3):11-19.  
Fan Weiguo, Nie Wanqing, Song Minghao. Research on capacity optimization configuration of zero-carbon integrated energy system

- with hydrogen storage replacement under multiple markets[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2025,41(3):11-19.
- [23] 周建新, 孙腾浩, 张力洪. 基于共享氢储能服务的售电公司双层优化运行[J]. *热力发电*, 2025,54(1):99-107.  
Zhou Jianxin, Sun Tenghao, Zhang Lihong. Two-layer optimization operation of power selling company based on shared hydrogen energy storage service[J]. *Thermal Power Generation*, 2025,54(1):99-107.
- [24] 余晋宇, 周荔丹, 于天佑, 等. 基于分布式模型预测控制的电—氢混合储能系统控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2025,49(3):114-124.  
Yu Jinyu, Zhou Lidan, Yu Tianyou, et al. Control strategy for electricity-hydrogen hybrid energy storage system based on distributed model predictive control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025,49(3):114-124.
- [25] 王永利, 姜斯冲, 郭璐, 等. 基于共享氢容量备用的多微网双层优化方法[J]. *电力建设*, 2024,45(11):65-78.  
Wang Yongli, Jiang Sichong, Guo Lu, et al. Multiple microgrid bilayer optimization method based on shared hydrogen capacity backup[J]. *Electric Power Construction*, 2024,45(11):65-78.
- [26] 谭玲玲, 孙鹏, 郭沛璇, 等. 含氢储能的微电网低碳—经济协同优化配置[J]. *发电技术*, 2024,45(5):983-994.  
Tan Lingling, Sun Peng, Guo Peixuan, et al. Low-carbon and economic synergy optimization configuration for microgrid with hydrogen energy storage[J]. *Power Generation Technology*, 2024,45(5):983-994.
- [27] 孙靓雨, 林泽源, 李伟. 考虑氢储能的多目标综合能源优化配置方案研究[J]. *高压电器*, 2024,60(7):88-96.  
Sun Liangyu, Lin Zeyuan, Li Wei. Research on multi-objective comprehensive energy optimization configuration scheme considering hydrogen storage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024,60(7):88-96.
- [28] 王晗雯, 马智刚, 钱欣, 等. 面向资源集群调控的园区共享储能分布鲁棒优化配置方法[J]. *太阳能学报*, 2025,46(11):69-78.  
Wang Hanwen, Ma Zhigang, Qian Xin, et al. Distributionally robust optimal configuration method of shared energy storage distribution for parks-level resource cluster regulation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2025,46(11):69-78.
- [29] 杨立滨, 曹阳, 魏韡, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. *电力系统自动化*, 2020,44(16):45-52.  
Yang Libin, Cao Yang, Wei Wei, et al. Configuration method of energy storage for wind farms considering wind power uncertainty and wind curtailment constraint[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020,44(16):45-52.

.....

(上接第 108 页)

- [42] Memon S, Verrall M, Lebedev M, et al. Nanoscale analysis of shale matrix alteration after supercritical CO<sub>2</sub> treatment: implications for ScCO<sub>2</sub> fracturing in shales[J]. *Energy & Fuels*, 2024,38:1873-1890.
- [43] Zhou Yang, You Lijun, Kang Yili, et al. Experimental study of the fracture initiation through the synergy of spontaneous imbibition and hydration of residual fracturing fluids in shale gas reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022,102:104577.
- [44] Quainoo A K, Negash B M, Bavoh C B, et al. A perspective on the potential application of bio-inhibitors for shale stabilization during drilling and hydraulic fracturing processes[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020,79:103380.
- [45] 殷鹏飞. 川南龙马溪组页岩力学特性及水力压裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020:1-10.  
Yin Pengfei. Study on mechanical behavior and hydraulic fracturing mechanism of Longmaxi Formation shale in Southern Sichuan Basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020:1-10.

## 《东北石油大学学报》入选 “中国科技期刊卓越行动计划(二期)” 集群(集团)化试点项目

《东北石油大学学报》入选高等教育出版社有限公司“中国科技期刊卓越行动计划(二期)”集群(集团)化试点项目(项目编号:B-01),成为中国高校科技期刊与中国工程院院刊集群“成员刊”,并获颁证书。

中国科技期刊卓越行动计划(二期)项目(2024—2028年)由中国科协、教育部、科技部、财政部、国家新闻出版署、中国科学院和中国工程院共同实施,旨在深入贯彻党的二十届三中全会精神和全国科技大会精神,认真落实习近平总书记关于加快培育世界一流科技期刊的重要指示,持续增强我国科技期刊的学术引领力和国际影响力。

