

文章编号:1006-2467(2023)01-0010-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.017

需求响应下的并网型风-光-沼微能源网优化配置

俞发强¹, 张名捷¹, 程 语², 陈达伟², 杨函煜³, 黎灿兵²

(1. 广东电网有限责任公司清远供电局, 广东 清远 511500; 2. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240; 3. 南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 南京 211816)

摘 要: 我国农村地区存在丰富的生物质资源, 可通过发酵系统将其转化为沼气能加以利用. 然而, 沼气的产出以沼气为主, 经济效益普遍较低, 难以推广. 提出一种由多种可再生能源构成的并网风-光-沼微能源网, 利用太阳能、风能和沼气之间的互补性, 为用户提供沼气和电力. 根据微生物发酵动力学模型和沼气发酵的温敏特性, 对沼气的类储能特性进行建模. 同时考虑需求侧响应进一步增加系统灵活性, 利用分时电价节省购电成本, 从而将投资成本和年度运行成本降至最低. 案例研究表明, 该风-光-沼微能源网可稳定地向用户提供电力; 并且通过参与需求响应, 可使得投资成本降低 3%~9% 的情况下年收益增加 127%~240%.

关键词: 微能源网; 沼气发电; 需求侧响应; 优化配置

中图分类号: TM 619

文献标志码: A

Optimal Sizing of Grid-Connected Wind-Solar-Biogas Integrated Energy System Considering Demand Response

YU Faqiang¹, ZHANG Mingjie¹, CHENG Yu², CHEN Dawei²
YANG Hanyu³, LI Canbing²

(1. Qingyuan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Qingyuan 511500, Guangdong, China; 2. Key Laboratory of Power Transmission and Power Conversion Control of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: There are abundant biomass resources in China's rural areas, which can be converted into biogas energy through fermentation systems. However, the rewards of the investments of the pure biogas projects is poor because biogas is a cheap resource. This paper proposes a 100% renewable grid-connected wind-solar-biogas integrated energy system which utilizes the complementarity between solar energy, wind energy, and biogas to provide users with biogas and electricity. The battery-like characteristics of biogas are modeled based on the microbial fermentation kinetic model and the temperature-sensitive characteristics of biogas fermentation. In addition, the demand-side response is considered to further increase the flexibility of the system, and the time-of-use electricity price is used to save power purchase costs, thereby minimizing investment costs and annual operating costs. Case studies show that the wind-solar-biogas micro-energy network can effectively reduce the total investment cost by 3% to 9% while increasing the

收稿日期: 2022-01-24 修回日期: 2022-03-22 录用日期: 2022-03-25

基金项目: 广东电网公司科技项目(GDKJXM20185779-031800KK52180097)

作者简介: 俞发强(1990-), 工程师, 主要从事配电设备运维等工作.

通信作者: 杨函煜, 博士, 讲师; E-mail: hyang73@outlook.com.

benefit by 1.27 to 2.40 times.

Key words: integrated energy system; biogas generation; demand response; optimal sizing

生物质能作为一种可再生能源,其集成水平相较于风能、光能、氢能仍较为落后^[1-2].在我国广袤的农村地区,生物质能源丰富,农作物秸秆、禽畜粪便等均可通过发酵产生沼气,在减轻农村环境压力的同时为户主提供能源^[3].我国的沼气发展始于 20 世纪六七十年代,全国各地兴建 700 多万处户用沼气池^[4].然而,沼气产量与温度密切相关,多数沼气池由于难以越冬、缺乏维护而废弃.此外,沼气池能源形式单一,主要用作生火、照明,因此投资回报低,主要靠国家补贴^[5].

尽管如此,沼气具有与天然气相似的物理特性,可以作为气体燃料通过热电联产(CHP)燃气机组转化为电能和热能,与其他可再生能源集成于微能源网中,满足用户热、电、冷、气等多种负荷需求.这一优良性质引起了学者的关注,开展了一系列关于多能互补的微能源网研究.通过混合多种能源,如光伏、风力发电(简称风电)、柴油发电等,充分挖掘不同能源间的互补特性,可实现波动性可再生能源的消纳以及稳定的电力供应^[6].例如,文献[7]评估了当地生物质资源的分布情况,提出了“风-光-沼-储”的微电网,研究发现沼气发电与传统的柴油发电相比,可减少经济成本 20%和 CO₂ 年排放量 48 t;文献[8]提出一种考虑失电率的“风-光-沼-储”微电网,系统主要依赖沼气发电为用户供电;文献[9]提出利用太阳能沼气发电满足农村地区的炊事、照明等基本生活需求.

通过引入需求侧响应来增强微能源网的灵活性,可进一步提高其经济性.例如,文献[10]通过建立转移、转换和可削减模型的需求响应机制,对含天然气和储能的微能源网进行优化调度,有效降低了系统的运行成本;文献[11-12]充分考虑用户舒适度,并将其作为需求侧响应的约束条件,进行微能源网优化运行调度;文献[13]对储电、蓄冷、储热 3 种储能装置进行建模,实现了电、热、冷多能源优化调度.上述文献均通过电力存储或热力存储,配合可调度负载进行需求侧响应规划,其储能装置的成本较高.

沼气适合大量储存,实际上,是一种优良的储能介质.通过电加热或热电联产机组可以对发酵池进行增温,提高沼气产量,相当于将多余能量转化为沼气储存.自 2012 年以来,我国沼气产业已经基本告

别家用微型沼气池的阶段,开始朝规模化、集中化、专业化方面发展.中、大型养殖场受到环保部门的严格把控,需要投资建设大规模沼气工程作为其污染物排放的处理手段^[14].此外,养殖场中具有大量可调节的负荷,如饲料搅拌机、厂棚增温设备、加工设备等,为园区微能源网的优化配置、调度提供了基本场景^[15-16].

总体来说,国内外对含沼气的混合可再生微能源网的研究更侧重于利用农林生物质原料实现沼气发电或热电联产,减少对化石燃料的依赖以及环境排放,沼气在微网中的功能模式相对比较单一^[17-19].此外,利用沼气发电或热电联产的发电量和产热量极大程度上受到沼气产量的影响^[20-22],而目前对于沼气发酵速率和产量的精细化建模并未被充分考虑在现有的微能源网规划研究中.与此同时,沼气易储存的类储能特性使其具有成为低成本储能介质的潜力,加以充分利用养殖场园区内大量可调节负荷参与需求响应,含沼气的微能源网将拥有较大优化空间,具有一定研究价值.

本文提出一种并网型风能-太阳能-沼气多能互补微能源网优化配置方法.根据微生物发酵动力学模型和沼气发酵的温敏特性,提出沼气的类储能特性,对沼气与电能之间的“电能-化学能(气体)-电能”的能量变换机制所涉及的产气、储气、用气过程进行差异化、精细化建模.同时考虑需求侧响应,进一步增加系统灵活性,利用分时电价节省购电成本,从而将投资成本和年度运行成本降至最低.通过对全年的 12 个典型场景进行仿真,验证所提微能源网模型的有效性.

1 风-光-沼微能源网模型

1.1 目标函数

作为并网的微能源网,需求侧管理(DSM)是最小化发电和负载之间不平衡的必要解决方案.根据负荷灵活性可分为关键、可时移和可调负荷.关键负荷,例如电梯和照明负载,与人员生命安全息息相关,应当优先保障电力供应;可时移负荷则指在时间上可以进行平移的电力需求,例如空调的使用;可调负荷是在可接受范围内功率需求可调的负荷.

本模型的最终目标是最小化并网型风-光-沼微能源网(见图 1)的年度总成本,包括初始投资成本

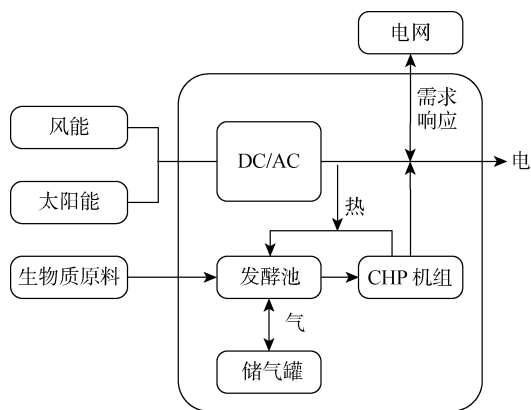


图 1 风-光-沼微能源网

Fig. 1 Integrated energy system of wind-solar-biogas

和运营成本. 其中, 运营成本包括维护成本、从电网公司销售/购买能源的成本和需求侧管理成本. 因此, 优化模型可由下式描述:

$$\min C_{\text{total}} = C_{\text{INV}} + C_{\text{M}} + C_{\text{Grid}} + C_{\text{d}} \quad (1)$$

$$C_{\text{INV}} = c_{\text{PV}} C_{\text{PV}}^{\text{INV}} + c_{\text{WT}} C_{\text{WT}}^{\text{INV}} + c_{\text{AD}} C_{\text{AD}}^{\text{INV}} + c_{\text{BES}} C_{\text{BES}}^{\text{INV}} \quad (2)$$

$$C_{\text{M}} = P_{\text{PV},t} C_{\text{PV}}^{\text{M}} + P_{\text{WT},t} C_{\text{WT}}^{\text{M}} + P_{\text{AD},t} C_{\text{AD}}^{\text{M}} + c_{\text{BES}} C_{\text{BES}}^{\text{M}} \quad (3)$$

$$C_{\text{d}} = \sum_{s \in S} \rho_s \sum_{t=1}^T C_{\text{TU}} \text{PE}_{\text{st}}^{\text{AL}} \quad (4)$$

$$C_{\text{Grid}} = \sum_{s \in S} \rho_s \sum_{t=1}^T (\text{PE}_{\text{st}}^{\text{TG}} C_{\text{TG}} + \text{PE}_{\text{st}}^{\text{FG}} C_{\text{FG}}) \quad (5)$$

式中: C_{total} 为年度总成本; C_{INV} 为总投资成本; C_{M} 为维护成本; C_{Grid} 为向电网公司销售或购买电量的成本; C_{d} 为负荷参与需求响应的成本; c_{PV} , c_{WT} , c_{AD} , c_{BES} 分别为太阳能 (PV)、风电 (WT)、沼气发酵池 (AD) 发电和储气罐 (BES) 的规划容量; $P_{\text{PV},t}$, $P_{\text{WT},t}$, $P_{\text{AD},t}$ 分别为太阳能、风电、沼气发电在 t 时刻的输出功率; $C_{\text{PV}}^{\text{INV}}$, $C_{\text{WT}}^{\text{INV}}$, $C_{\text{AD}}^{\text{INV}}$, $C_{\text{BES}}^{\text{INV}}$, C_{PV}^{M} , C_{WT}^{M} , C_{AD}^{M} , $C_{\text{BES}}^{\text{M}}$ 的上标 INV 和 M 分别表示投资成本和运营成本; ρ_s 为不同场景 s 下的概率系数; C_{TU} 为调整单位负荷参与需求响应所获得的收益; $\text{PE}_{\text{st}}^{\text{AL}}$ 为参与需求响应的总负荷功率; C_{TG} 和 $\text{PE}_{\text{st}}^{\text{TG}}$ 分别为向电网售电的成本和总量, 其中售电成本为负值; C_{FG} 和 $\text{PE}_{\text{st}}^{\text{FG}}$ 分别为向电网购电的成本和总量; S 为优化场景集合; $T=24$.

1.2 发酵池建模

沼气发酵池作为光-沼微网的关键组件, 运行阶段应充分考虑 AD 蓄热与温度特性. 由于用户级光-沼微网多以规模较小的地理式 AD 为主, 可假设: 在厌氧消化过程中, 放热能量很小, 并且微生物产生热量可被忽略; 沼池周围的环境温度和周围土壤温度分布均匀; 原料所带入的热量可忽略. 由此, 根据能量守恒原理, AD 的传热过程及发酵温度的变化可

通过下式约束表示:

$$T_{\text{d}}(\tau+1, s) = T_{\text{d}}(\tau, s) + \frac{H_{\text{heat}}(\tau, s) + H_{\text{PE}}(\tau, s) - H_{\text{sur}}(\tau, s)}{c_{\text{m}} \rho_{\text{m}} V_{\text{AD}}} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{\text{heat}}(\tau, s) &= \eta_{\text{bio}} \text{PG}_{\text{st}}^{\text{heat}} \\ H_{\text{PE}}(\tau, s) &= \eta_{\text{ele}} \text{PE}_{\text{st}}^{\text{heat}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$H_{\text{sur}}(\tau, s) = \sum_{i=1}^I n_i A_i (T_{\text{d}}(\tau, s) - T_{\text{soil}}(\tau, s)) \quad (8)$$

式中: $T_{\text{d}}(\tau, s)$ 为发酵温度; $H_{\text{heat}}(\tau, s)$, $H_{\text{PE}}(\tau, s)$ 分别为 CHP 机组、电加热设备所产热量分配至 AD 中的热功率; $\text{PG}_{\text{st}}^{\text{heat}}$ 为沼气发电机热电回收的热量; $\text{PE}_{\text{st}}^{\text{heat}}$ 为通过电阻热转化为热能的电量; $H_{\text{sur}}(\tau, s)$ 为 AD 表面的平均散热功率; τ 为时间步长; c_{m} 为发酵基液的比热容; ρ_{m} 为发酵基液密度; V_{AD} 为 AD 容积; η_{bio} 为生物质基液与沼气之间的能量转化效率; η_{ele} 为沼气转换为电力的效率; n_i 为 AD 第 i 个表面的导热系数; A_i 为 AD 内第 i 个表面的表面积; $T_{\text{soil}}(\tau, s)$ 为地理式 AD 外的土壤温度. 池壁等表面与外界温度发生产生的热传导可由约束式 (8) 计算.

沼气产量由原料类型、进水挥发性固体浓度、发酵池容量、发酵温度等多种因素决定. 为了表示沼气发酵过程中的温度敏感性, 提出一种基于微生物反应动力学的沼气产量预测模型:

$$\mu_{\text{st}}^{\text{d}} = \begin{cases} \alpha_{11} e^{\alpha_{12} T_{\text{st}}}, & T_0 \leq T_{\text{st}} < T_1 \\ \alpha_{21} T_{\text{st}} - \alpha_{22}, & T_1 \leq T_{\text{st}} \leq T_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$K^{\text{bio}} = \beta_{11} e^{\beta_{12} S_0} + \beta_{13} \quad (10)$$

$$\text{PG}_{\text{st}}^{\text{AD}} = \frac{B_0 S_0 V_{\text{AD}}}{24 t_{\text{HRT}}} \left(1 - \frac{K^{\text{bio}}}{t_{\text{HRT}} \mu_{\text{st}}^{\text{d}} - 1 + K^{\text{bio}}} \right) \quad (11)$$

式中: $\mu_{\text{st}}^{\text{d}}$ 为微生物在中温和高温发酵中的最大日繁殖率; 不同下标的 α 和 β 为微生物繁殖相关系数; T_0 , T_1 , T_2 为不同温度阈值, 与微生物种类相关; T_{st} 为发酵温度, 可由式 (6)~(8) 计算; $\text{PG}_{\text{st}}^{\text{AD}}$ 为受温度、微生物数量、活性影响的每小时产气量; S_0 和 B_0 分别为进水挥发性固体浓度和甲烷生物势能; t_{HRT} 为发酵液停留时间; 式 (11) 为厌氧发酵过程中发酵速率和稳定性的动力学方程.

所产生的沼气将被直接储存在储气罐中用于沼气机组发电. 由此, 储气罐中的储气量可用下式描述:

$$\text{PG}_{\text{st},t+1}^{\text{BES}} = \text{PG}_{\text{st}}^{\text{BES}} + \eta_{\text{BES}} \text{PG}_{\text{st}}^{\text{AD}} - \frac{\text{PG}_{\text{st}}^{\text{FB}}}{\eta_{\text{BES}}}, \quad \forall s, t \quad (12)$$

$$0 \leq \text{PG}_{\text{st}}^{\text{BES}} \leq \sum Q_{\text{CH}_4} c_{\text{BES}}, \quad \forall s, t \quad (13)$$

式中: η_{BES} , Q_{CH_4} , c_{BES} 分别为沼气存储效率、沼气热值和储气量系数; $\text{PG}_{\text{st}}^{\text{FB}}$ 为 BES 放气量, 相当于发电机组的耗气量. 约束式 (13) 表示储气量大小不应超

过 BES 的规划容量。

发酵所产生的沼气送往 CHP 机组进行发电,发电量与耗气量的关系由下式表示:

$$PE_{st}^u = \eta_u PG_{st}^{FB} \quad (14)$$

式中: η_u 为能量转化效率系数。

1.3 约束条件

容量约束. 包括太阳能、风电、沼气发电和储气罐的容量:

$$\left. \begin{aligned} c_{PV}^{\min} &\leq c_{PV} \leq c_{PV}^{\max} \\ c_{WT}^{\min} &\leq c_{WT} \leq c_{WT}^{\max} \\ c_{AD}^{\min} &\leq c_{AD} \leq c_{AD}^{\max} \\ c_{BES}^{\min} &\leq c_{BES} \leq c_{BES}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(1) 波动性新能源出力约束: 微能源网内各新能源出力应受限于对应的规划容量, 同时与当地气候条件相关. 因此, 在对微能源网进行优化配置时, 需根据风能、光照辐射的预测数据确定风电、光伏出力上下限:

$$PE_{st}^{WT} = \begin{cases} 0, & v_{st} \leq v_{ci} \text{ 或 } v_{st} \geq v_{co} \\ c_{WT} \frac{v_{st}^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} < v_{st} < v_r, \forall s, t \\ c_{WT}, & v_r \leq v_{st} < v_{co} \end{cases} \quad (16)$$

$$PE_{st}^{PV} = J_{st} PE_r^{PV} c_{PV}, \quad \forall s, t \quad (17)$$

式中: PE_{st}^{WT} 和 PE_{st}^{PV} 分别为风力发电和光伏发电在场景中 t 时刻下的有功输出; v_{st} , v_{ci} , v_r 和 v_{co} 分别为预测风速、风机切入风速、风机额定风速和风机切除风速; J_{st} 为预测的太阳能辐射量; PE_r^{PV} 为单位平方米光伏面板的额定功率。

(2) 其他常规约束:

$$PE_{st}^{PV} + PE_{st}^{WT} + PE_{st}^{FG} - PE_{st}^{heat} + PE_{st}^u = PE_{st}^L + PE_{st}^{in} - PE_{st}^{out} \quad (18)$$

$$PE = PE_{st}^L + PE_{st}^{in} - PE_{st}^{out} \quad (19)$$

$$PE_{st}^{AL} = PE_{st}^{in} + PE_{st}^{out} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq PE_{st}^{in} \leq z_{st}^{in} PE_{st}^{in, \max}, \quad \forall s, t \\ 0 &\leq PE_{st}^{out} \leq z_{st}^{out} PE_{st}^{out, \max}, \quad \forall s, t \\ z_{st}^{in} + z_{st}^{out} &\leq 1, \quad \forall s, t \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\sum_t PE_{st}^{in} = \sum_t PE_{st}^{out} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq PE_{st}^{TG} \leq z_{st}^{TG} PE_{st}^{TG, \max}, \quad \forall s, t \\ 0 &\leq PE_{st}^{FG} \leq z_{st}^{FG} PE_{st}^{FG, \max}, \quad \forall s, t \\ z_{st}^{TG} + z_{st}^{FG} &\leq 1, \quad \forall s, t \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中: PE_{st} 为 s 场景下 t 时刻的总电功率负荷; PE_{st}^L 为关键负荷; PE_{st}^{heat} 为电加热负荷; PE 为总电功率负荷; PE_{st}^{in} , PE_{st}^{out} 分别为需求响应增加和减少的负荷; z_{st}^{in} , z_{st}^{out} 为状态变量. 式(18)~(19)为负荷平移前、

后功率等式约束, 式(20)为有功的供需平衡等式约束。

2 模型线性化处理

由于约束式(6)~(11)是非线性的, 不能直接求解, 所以首先对模型中存在的非线性约束分段线性化。

在所提出的沼气发酵动力学模型中, 当模型只考虑发酵温度对厌氧发酵速率影响时, 其他环境因素可视作模型参数, 则根据约束式(6)~(8)的函数关系, 发酵温度对单位容积沼气发酵速率的影响最终可通过非线性一元函数 $G_t = f(T_t)$ 表示, 如图 2 所示。

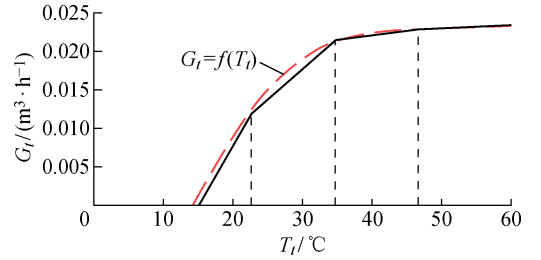


图 2 温度与发酵速率的函数关系

Fig. 2 Fermentation rate versus temperature

针对 $G_t = f(T_t)$ 非线性问题, 采用分段线性化方法处理非线性约束. 分段线性化方法如下: 对于任意 t 时刻, 在发酵温度 T_{ts} 的取值范围 $[T_{t0}, T_{tS}]$, 即温度范围 15~60 °C 内, 依次确定 S 个分段点 T_{t0} , T_{t1}, \dots, T_{tS} , 引入 0-1 变量 q_{ts} 和特殊序列 2(SOS2) 变量组 z_{ts} , 其中约束表示 SOS2 变量组中, 有且只有相邻的两个 0-1 变量不为 0. 最终 $G_t = f(T_t)$ 满足如下约束。

$$G_t = f(T_t) \approx \sum_{s=0}^S z_{ts} f(T_{ts}), \quad \forall t \quad (25)$$

$$T_{ts} = \sum_{s=0}^S z_{ts} T_{ts}, \quad T_{t0} < T_{t1} < \dots < T_{tS}, \quad \forall t \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} z_{t0} &\leq q_{t0} \\ z_{ts} &\leq q_{ts-1} + q_{ts} \\ z_{tS} &\leq q_{tS-1} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$\sum_{s=1}^S z_{ts} = 1, \quad \forall t \quad (28)$$

$$\sum_{s=0}^{S-1} q_{ts} = 1, \quad \forall t \quad (29)$$

3 模型验证

最终该模型以式(1)~(5)为目标函数, 包括传

热约束式(6)~(8)、发酵约束式(9)~(11)、沼气与电能转化约束模型式(12)~(13)、储气罐约束模型式(14)~(17)、有功平衡及功率限制约束式(18)~(24),形成混合整数线性规划(MILP)问题,可通过GAMS 软件中的 Cplex 求解器直接求解.

考虑到需求负荷的不确定性、太阳辐射带来的优化结果的变化,采用基于典型场景的方法,选择一年的 12 个场景来模拟各种新能源和负荷的组合情况,如图 3 所示. 其中,风速和太阳能采用标么值表示,基准值为年最大出力值. 成本投资组成如表 1 所示.

在负荷需求响应中,考虑到一些负载具有可切换或时移的特性,其允许的最大移出/移入需求在冬季为 50 kW,在夏季为 200 kW. 如表 2 所示的分时电价用于引导用户进行负荷需求响应,以实现优化运行.

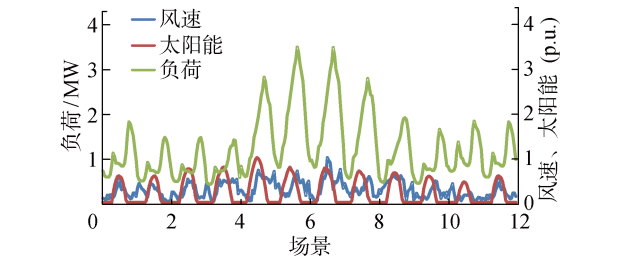


图 3 各场景中电力负荷与新能源波动
Fig. 3 Electrical and renewables profiles in each scenario

表 1 系统各部分成本组成				
Tab. 1 Economic specifications of system components				
成本	发酵池/ (元·m ⁻³)	光伏/ (元·kW ⁻¹)	储气罐/ (元·m ⁻³)	风电/ (元·kW ⁻¹)
投资	1 000	800	100	2 500
运营	200	6	20	0

表 2 分时电价			
Tab. 2 Time-of-use electricity price			
元/(kW·h)			
电价区间	时间段	电价	
		购电	售电
低谷	0—8 时	0.3	0.1
	9—11 时	0.3	0.1
正常	14—16 时	0.5	0.3
	22—23 时	0.5	0.3
峰值	12—13 时	0.8	0.5
	17—21 时	0.8	0.5

考虑负荷需求响应的微能源网优化配置结果如表 3 所示. 可以看出,总成本与发酵池的最大容量成负相关. 发酵池的容量增加,总成本就会降低,这表明沼气发酵系统可以有效降低系统成本. 其中,主要原因是沼气发电更为灵活、可调度性强,利用高峰电价向电网提供功率支撑是其收入的重要来源. 此外,增加沼气发电使得微能源网对于风电、光伏以及的投资更低. 不具备负荷需求响应的微能源网优化结果如表 4 所示. 对比表 3 和表 4,当负荷参与需求响应后,系统总成本可降低 3%~9%,年收益增加 127%~240%.

图 4 给出了一个典型场景中的每日最优调度来

表 3 考虑负荷需求响应的系统优化配置结果					
Tab. 3 Optimal sizing results for system considering DSM					
发酵池/m ³	光伏/kW	储气罐/m ³	风电/kW	年收益/元	总成本/元
650	249.8	808.2	629.2	11.6×10 ⁴	330.3×10 ⁴
700	208.8	845.2	591.9	17.1×10 ⁴	309.9×10 ⁴
750	166.2	930.7	562.8	24.6×10 ⁴	291.4×10 ⁴
800	124.2	1 090.0	512.9	28.5×10 ⁴	268.8×10 ⁴
850	82.0	1 276.9	480.2	34.3×10 ⁴	250.6×10 ⁴

表 4 不考虑负荷需求响应的系统优化配置结果					
Tab. 4 Optimal sizing results for system without considering DSM					
发酵池/m ³	光伏/kW	储气罐/m ³	风电/kW	年收益/元	总成本/元
650	253.9	816.2	659.7	5.1×10 ⁴	339.6×10 ⁴
700	236.1	859.1	611.2	6.7×10 ⁴	325.8×10 ⁴
750	198.2	949.3	592.8	7.6×10 ⁴	311.9×10 ⁴
800	164.8	1 180.2	552.4	8.9×10 ⁴	295.8×10 ⁴
850	123.1	1 350.9	513.3	10.1×10 ⁴	276.1×10 ⁴

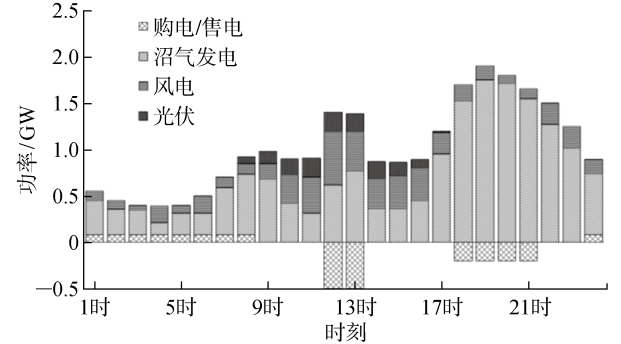


图 4 典型场景中风光出力曲线及最优沼气发电曲线
Fig. 4 Operation of solar and wind generation, and optimal generation of BES

说明微能源网与负荷需求响应的性能.可以观察到光伏和风电的输出主要分布在白天,而夜间负荷较低,并且此时可低价从电网购电维持本地负荷,并使用廉价电力进行增温,提高沼气产量并储存在储气罐中,从而实现电能转化为易储存的生物质能.由于风电的间歇性,沼气发电成为白天负荷的主要承担者,并在高峰电价阶段向电网售电.因此,间歇性的新能源与沼气发电具有互补特性,充分利用沼气的易储存特性可大大降低系统成本.

储气罐中的沼气储量如图 5 所示.夜间通过廉价电力对发酵池进行增温,并提高沼气产量.在中午 12 时左右,沼气储量超过 80%,并且属于高峰电价时段.因此,沼气发电在 12—13 时出力增加,并向电网售电,获取额外利润.在 12—16 时,储气罐中的沼气储量进一步增加并达到峰值.在接下来的 4 h 中,沼气发电成为系统负荷的主要承担者,并且向电网售电以获取利润.至 24 时,沼气体量仍接近 50%,可以确保次日的沼气供应.值得注意的是,图 4 与图 5 为 12 个典型场景之一,每个场景结束后,其剩余沼气储量并不一定为 50%,但在连续的 12 个场景中,沼气储量是连续供应、不间断的,因此其供电可靠性为 100%.

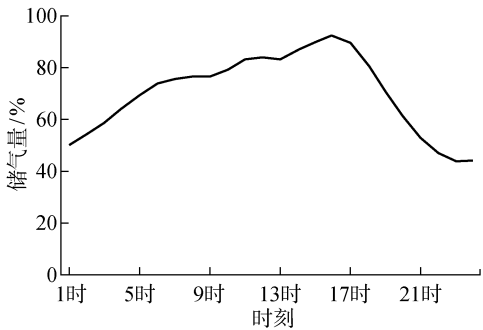


图 5 1 d 内沼气储量变化趋势

Fig. 5 Variation of biogas storage in a day

4 结语

提出一种风-光-沼微能源网,可通过电加热提高沼气发酵温度,从而将电能转化为生物质能储存,而沼气可通过热电联产机组发电,实现多种能量流的耦合.将需求侧响应机制应用于并网微能源网,使得投资成本降低 3%~9%的情况下,年收益增加 127%~240%.在日常优化调度中,夜间多余的电能转化为沼气储存在储气罐中,在白天可以稳定连续地满足客户需求.通过对比研究,显示该微能源系统在经济性方面具有较大优势.然而,基于生物质的设施受到周围生物质能源可用性的限制,未来工作将

考虑生物质可利用性的约束以及与其他可再生能源的协同规划.

参考文献:

[1] 王文彬,郑蜀江,范瑞祥,等. “双碳”背景下微网分布式电能交易绩效评价指标与方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 312-324.
WANG Wenbin, ZHENG Shujiang, FAN Ruixiang, et al. Performance evaluation index and method of micro-grid distributed electricity trading under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(3): 312-324.

[2] 王伟胜. 我国新能源消纳面临的挑战与思考[J]. 电力设备管理, 2021(1): 22-23.
WANG Weisheng. China’s challenges and considerations regarding new energy consumption[J]. Electric Power Equipment Management, 2021(1): 22-23.

[3] 罗尔呷,张宇,冯祎宇,等. 我国沼气产业发展的历程、现状和未来方向研究: 基于河南漯河地区的典型案例案例分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(5): 132-142.
LUO Erga, ZHANG Yu, FENG Yiyu, et al. The research on cours, current situation and future direction of China’s biogas industry development—Based on the typical case analysis of Luohe area, Henan[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(5): 132-142.

[4] 李景明,李冰峰,徐文勇. 中国沼气产业发展的政策影响分析[J]. 中国沼气, 2018, 36(5): 3-10.
LI Jingming, LI Bingfeng, XU Wenyong. Analysis of the policy impact on China’s biogas industry development[J]. China Biogas, 2018, 36(5): 3-10.

[5] WANG Z Q, WANG J, MA M L, et al. Distributed event-triggered fixed-time fault-tolerant secondary control of islanded AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 4078-4093.

[6] XU D, ZHOU B, CHAN K W, et al. Distributed multienergy coordination of multimicrogrids with biogas-solar-wind renewables[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3254-3266.

[7] ZHOU B, XU D, LI C B, et al. Optimal scheduling of biogas-solar-wind renewable portfolio for multicarrier energy supplies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6229-6239.

[8] GHAEM SIGARCHIAN S, PALETA R, MALMQUIST A, et al. Feasibility study of using a biogas engine as backup in a decentralized hybrid (PV/wind/battery) power generation system—Case

- study Kenya[J]. **Energy**, 2015, 90: 1830-1841.
- [9] LI C B, YANG H Y, SHAHIDEHPOUR M, *et al.* Optimal planning of islanded integrated energy system with solar-biogas energy supply[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2020, 11(4): 2437-2448.
- [10] 杨欢红, 史博文, 黄文焘, 等. 基于综合需求响应的微能源网日前优化调度方法[J]. **电力建设**, 2021, 42(7): 11-19.
YANG Huanhong, SHI Bowen, HUANG Wentao, *et al.* Day-ahead optimized operation of micro energy grid considering integrated demand response [J]. **Electric Power Construction**, 2021, 42(7): 11-19.
- [11] 刘洪, 王亦然, 李积逊, 等. 考虑建筑热平衡与柔性舒适度的乡村微能源网电热联合调度[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(9): 50-58.
LIU Hong, WANG Yiran, LI Jixun, *et al.* Coordinated heat and power dispatch of micro-energy network of countryside considering heat balance model of building and flexible indoor comfort constraint [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 43(9): 50-58.
- [12] 江岳春, 曾诚玉, 邹嘉嘉, 等. 计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度[J]. **电力自动化设备**, 2019, 39(8): 254-260.
JIANG Yuechun, ZENG Chengyu, HUAN Jiajia, *et al.* Integrated energy collaborative optimal dispatch considering human comfort and flexible load [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2019, 39(8): 254-260.
- [13] 李林晏, 韩爽, 乔延辉, 等. 面向高比例新能源并网场景的风光-电动车协同调度方法[J]. **上海交通大学学报**, 2022, 56(5): 554-563.
LI Linyan, HAN Shuang, QIAO Yanhui, *et al.* A wind-solar-electric vehicles coordination scheduling method for high proportion new energy grid-connected scenarios[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2022, 56(5): 554-563.
- [14] YANG H Y, LI C B, SHAHIDEHPOUR M, *et al.* Multistage expansion planning of integrated biogas and electric power delivery system considering the regional availability of biomass[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2021, 12(2): 920-930.
- [15] WANG Z Q, WANG J, MA M L, *et al.* Distributed event-triggered fixed-time fault-tolerant secondary control of islanded AC microgrid[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2022, 37(5): 4078-4093.
- [16] RODRÍGUEZ-GALLEGOS C D, YANG D Z, GANDHI O, *et al.* A multi-objective and robust optimization approach for sizing and placement of PV and batteries in off-grid systems fully operated by diesel generators: An Indonesian case study[J]. **Energy**, 2018, 160: 410-429.
- [17] LEE J T, CALLAWAY D S. The cost of reliability in decentralized solar power systems in sub-Saharan Africa[J]. **Nature Energy**, 2018, 3(11): 960-968.
- [18] RIGO-MARIANI R, SARENI B, ROBOAM X. Integrated optimal design of a smart microgrid with storage[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2017, 8(4): 1762-1770.
- [19] HONG Y Y, LIAN R C. Optimal sizing of hybrid wind/PV/diesel generation in a stand-alone power system using Markov-based genetic algorithm [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2012, 27(2): 640-647.
- [20] XU L, RUAN X B, MAO C X, *et al.* An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2013, 4(3): 774-785.
- [21] SARKAR T, BHATTACHARJEE A, SAMANTA H, *et al.* Optimal design and implementation of solar PV-wind-biogas-VRFB storage integrated smart hybrid microgrid for ensuring zero loss of power supply probability[J]. **Energy Conversion and Management**, 2019, 191: 102-118.
- [22] RAHMAN M M, HASAN M M, PAATERO J V, *et al.* Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries[J]. **Renewable Energy**, 2014, 68: 35-45.

(本文编辑:孙伟)