

考虑围护结构特性的低碳养殖场优化调度方法

陈晚晴¹,陈柯任¹,施鹏佳¹,靳小龙²,王慧媛²

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院,福建 福州 350012;

2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:为降低规模化养殖业用能成本及碳排放水平,提出了考虑围护结构动态特性的低碳养殖场综合能源系统优化调度方法。首先,从“源-网-荷”全环节构建了低碳养殖场的综合能源系统模型,并通过线性化处理以提高求解速度;为了挖掘我国北方冬季养殖场热负荷的灵活性调节能力,建立了牲畜舍围护结构的热动态模型,可在保证牲畜温度舒适度的前提下,通过动态调整流经牲畜舍内散热器的水流量,参与系统运行调度;进而,以养殖场综合能源系统运行成本最小化为目标,构建了养殖场综合能源系统的优化调度模型;采用一个典型养殖场综合能源系统算例对所提方法进行验证。结果表明,基于所提方法得到的优化调度方案可最大限度利用养殖场中的沼气资源进行电能和热能的联合供给,同时通过对养殖场热负荷灵活性的利用可有效降低养殖场综合能源系统的运行成本。

关键词:低碳养殖场;综合能源系统;优化调度;散热器;灵活性

中图分类号: TM721 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24059

An Optimal Scheduling Method for Low-carbon Farms Considering Characteristics of the Livestock Houses

CHEN Wanqing¹, CHEN Keren¹, SHI Pengjia¹, JIN Xiaolong², WANG Huiyuan²

(1. Power Economic Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350012, Fujian, China; 2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To reduce the energy cost and carbon emissions due to the large-scale farming, an optimal scheduling method for integrated energy systems (IES) in low-carbon farm considering thermal dynamic characteristics of the livestock houses was proposed. First, the mathematical models of the integrated energy systems in a low-carbon farm were formulated from the perspective of "source-network-load", and the nonlinear models were linearized by certain mathematical methods to speed up the solving process. Second, the thermal dynamics of the livestock house with controllable indoor radiators was modeled to explore the flexibility of the heating loads of the livestock during the winter time in Northern China. Based on this model, the water flow rates in the radiators can be adjusted dynamically while the indoor temperatures are maintained within the comfort range. In this way, the heating loads of the livestock can be involved in the optimal scheduling of the integrated energy systems. Then, the optimal scheduling model of the integrated energy systems in a low-carbon farm was developed with the minimization of its operational cost as the objective. Numerical studies show that the proposed method can make full use of the biogas to supply electricity and heating loads in the low-carbon farm. Furthermore, the operational cost of the low-carbon farm can be further reduced by exploring the flexibility of the heating loads of the livestock.

Key words: low-carbon farm; integrated energy systems (IES); optimal scheduling; radiator; flexibility

双碳目标下,我国能源体系正处于绿色低碳转型的关键节点,构建清洁低碳安全高效能源体系、着力提高各环节能源利用效率是实现碳达峰、碳中和的重要途径^[1]。我国乡镇生态环

境污染问题突出,其中规模化养殖产生的大量粪污是重要的污染源,但是养殖粪污作为乡镇的可再生能源资源未获得充分开发和利用^[2]。与此同时,规模化养殖会消耗大量的电力和热力能源

(比如我国北方冬季的养殖场供热需求较大),导致用能成本居高不下,进一步产生额外污染及碳排放。低碳养殖指在可持续发展的理念指导下,通过多种手段,尽可能地减少畜禽养殖过程中的高碳能源消耗、减少温室气体排放、减少污染的科学养殖模式^[3]。低碳养殖不仅可以保证规模化养殖的经济效益,还可以降低养殖业发展过程中对环境的影响,助力我国双碳目标实现。

综合能源系统(integrated energy system, IES)可实现不同能源之间的优势互补,进而提高能源的利用效率,可为低碳养殖场提供高效低碳的能源解决方案^[4]。关于 IES 的优化运行和电/气/热协调互动已有大量研究。文献[5]基于热电联产机组(combined heat and power, CHP)热电比可调特性,提出一种 IES 双层优化模型,该模型减少了用能成本的同时提高了用能效率;文献[6]基于配电系统重构能力,研究了拓扑重构在降低 IES 运行成本、提高供电能力方面的潜力;文献[7]提出了一种利用独立的储热单元来提升区域 IES 灵活性的最优调度模型;文献[8-9]探索了建筑蓄热特性所带来的灵活性,并将这一灵活性应用到综合能源微网的优化调度中;文献[10]进一步探索了建筑热需求响应潜力,提出了考虑 IES 运营商和建筑的差异化利益诉求的主从博弈模型,所得的优化调度方案可以同时最大化二者利益;为了满足 IES 中多个主体的差异化利益诉求,文献[11]提出了 IES 的分布式优化调度方法,且分别测试了通信正常和通信失效情况下,分布式优化调度方法的有效性。

然而,上述研究多关注城市级 IES 的优化调度,针对低碳养殖场 IES 的优化调度的研究较少,特别是针对我国北方冬季具有大量供热需求的养殖场 IES 的优化调度研究更少。采用 IES 为养殖场提供能源方案可通过电、气、冷、热等多种供用能系统在养殖场的生产和消费等环节的协调优化,可实现养殖场能源的梯级利用,有效提高了能源综合利用效率;同时,养殖场牲畜舍的围护结构存在蓄热特性,在传递热量时具有一定的延时,使得养殖场热负荷存在一定的灵活性调节潜力。将这一灵活性融入养殖场 IES 的优化调度中,可进一步降低养殖场的运行成本,支撑系统低碳运行。为此,本文针对我国北方冬季场景下的养殖场,构建了养殖场牲畜舍围护结构的热动态模型,可在保证牲畜温度舒适度的前提下,动

态调整流经牲畜舍内散热器的水流量,为系统运行调度提供灵活性调节资源;在此基础上,提出了考虑围护结构动态特性的养殖场 IES 的优化调度方法,可最大限度利用养殖场中的沼气资源进行电能和热能的供给,降低养殖场 IES 的运行成本及碳排放。

1 低碳养殖场综合能源系统构建

1.1 系统结构

如图1所示,我国北方冬季场景下的一个典型的低碳养殖场 IES 主要包括3个部分:养殖场能量转换中心、综合能源配送网络以及养殖场多能负荷。养殖场能量转换中心主要包括变压器、CHP、热泵以及沼气处理单元。能量转换中心从上级购买的电力一部分通过变压器满足部分电负荷,另一部分供应给热泵产生热能满足部分热负荷,还有一部分供应沼气处理单元用于沼气生产。沼气处理单元产生的沼气供应给 CHP 机组,在产生电能的同时产生热能,满足部分热负荷和电负荷。能量转换中心生产的电能和热能通过综合能源配送网络输送至养殖场的牲畜舍,以满足牲畜的电热负荷需求。其中,电负荷主要包括牲畜舍内的照明、饲料处理、粪便处理及供水所需的电负荷;热负荷主要包括满足牲畜温度舒适度所需的采暖负荷。此外,本文假设牲畜舍配备屋顶光伏设备,光伏发电优先满足养殖场的电负荷。本文所提的低碳养殖场的综合能源系统结构仅针对含有 CHP 的养殖场。含有其他能源设备的低碳养殖场也可以依据类似方法进行综合能源系统的构建。

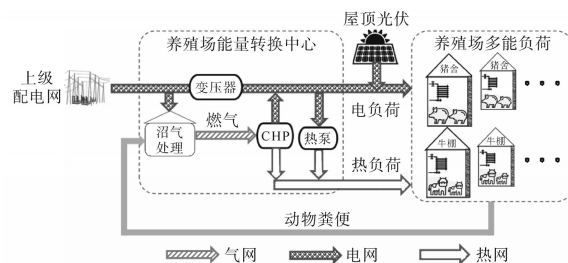


图1 低碳养殖场 IES 示意图

Fig.1 Schematic diagram of integrated energy systems in a low-carbon farm

1.2 低碳养殖场综合能源系统模型

1.2.1 低碳养殖场能量生产及转换单元建模

1) 沼气处理单元。如图2所示,养殖场沼气处理单元主要由发酵池、固液分离单元和沼液沼渣处理单元构成^[12]。首先,牲畜粪便经过收集转

运至发酵池,通过厌氧发酵产生沼气及沼液沼渣;随后,沼液沼渣经过固液分离单元和沼液沼渣处理单元形成符合环境排放要求的沼液沼渣以及肥料基质。沼气处理过程主要消耗的能源为电力,主要产出为沼气。沼气处理过程伴随的电力消耗可表示为

$$P_t^{\text{biogas}} = \eta_b P_t^g \quad (1)$$

式中: P_t^g 为 t 时段沼气处理单元产出的沼气功率; P_t^{biogas} 为沼气处理过程所消耗的电功率; η_b 为沼气处理过程中的电力消耗系数。

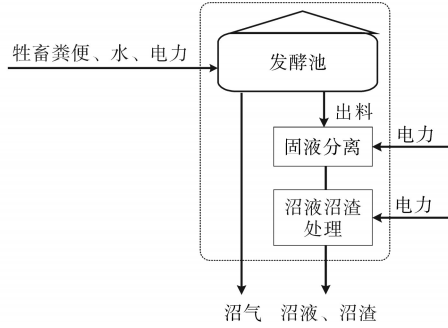


图2 沼气处理单元

Fig.2 Biogas treatment unit

2) 其它能量转换单元。本文假设 CHP 具有固定的气转电/热的效率^[8],其电、热功率输出如下式:

$$P_t^{\text{chp}} = \eta_e P_t^g \quad (2)$$

$$H_t^{\text{chp}} = \eta_h P_t^g \quad (3)$$

式中: η_e 为 CHP 的气转电效率; η_h 为 CHP 的气转热效率。

热泵热功率输出如下式所示:

$$H_t^{\text{hp}} = \eta_{\text{hp}} P_t^{\text{hp}} \quad (4)$$

式中: P_t^{hp} 为热泵消耗的电功率; H_t^{hp} 为热泵输出的热功率; η_{hp} 为热泵的电转热效率。

考虑到 CHP 和热泵设备有一定的容量,养殖场从上级配电网购电功率以及沼气处理单元输入到 CHP 的燃气功率需考虑相应的约束,如下式:

$$0 \leq P_t^e \leq P^{e,\max} \quad (5)$$

$$0 \leq P_t^g \leq P^{g,\max} \quad (6)$$

$$0 \leq P_t^{\text{hp}} \leq P^{\text{hp},\max} \quad (7)$$

式中: P_t^e 为养殖场从上级配电网购买的电功率; $P^{e,\max}$ 为养殖场从上级配电网购买的电功率上限; $P^{g,\max}$ 为沼气处理单元输入到 CHP 的燃气功率上限(即沼气处理单元最大产出燃气功率上限); $P^{\text{hp},\max}$ 为热泵出力的上限。

1.2.2 低碳养殖场配电网数学模型

本文基于 Distflow 模型对配电网建模^[10]。如

图3所示,节点 i 是发送端,节点 $i+1$ 是接收端; $P_i + jQ_i$ 是节点 i 的复功率; $P_{i+1}^{\text{load}} + jQ_{i+1}^{\text{load}}$ 是节点 $i+1$ 所带负荷的复功率; $r_f + jx_f$ 是从节点 i 到节点 $i+1$ 线路的复阻抗。每个节点的潮流如下表示:

$$P_{i+1} = P_i - r_f \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{i+1}^{\text{load}} \quad (8)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_f \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{i+1}^{\text{load}} \quad (9)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_f P_i + x_f Q_i) + (r_f^2 + x_f^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (10)$$

式中: V_i 为节点 i 的电压。

为了使配电网正常工作,沿线的电压应在一定范围之内^[13],即

$$1 - \varepsilon \leq V_i \leq 1 + \varepsilon \quad (11)$$

式中: ε 为电压变化幅度。

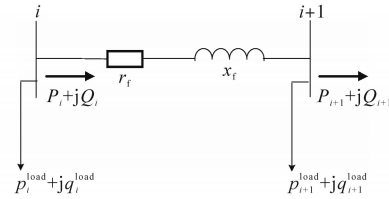


图3 配电网模型结构

Fig.3 Structure of electric distribution system

为提高求解效率,将配电网潮流约束中的平方项进行线性化处理。式(8)~式(10)的配电网潮流约束可以通过两个假设来线性化处理^[10]:非线性项 $(P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2$ 表示网损,在实际中要远小于节点有功、无功功率,因此可以忽略;同时,节点电压变化在很小范围内, V_0 为节点额定电压,可假设 $(V_0 - V_i)^2 \approx 0$,从而使 $V_i^2 \approx V_0^2 + 2V_0(V_i - V_0)$ 。线性化的潮流约束如下所示:

$$P_{i+1} = P_i - P_{i+1}^{\text{load}} \quad (12)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{i+1}^{\text{load}} \quad (13)$$

$$V_{i+1} = V_i - \frac{r_f P_i + x_f Q_i}{V_0} \quad (14)$$

1.2.3 低碳养殖场热网建模

如图4所示,低碳养殖场供热系统由热源、供水网络、回水网络以及牲畜舍的散热器组成。其中,热源包括热泵和 CHP;供水和回水网络由区域热网的二次侧供、回水网络构成。供热网络的调节模式一般分为质调节和量调节。质调节是指保持热网中水流量恒定而只调节供水温度的调节模式,一般都在热源处集中调节。量调节是指保持热网中供水温度恒定而只调节水流量的

调节模式,其适用范围可以是在热源处集中调节,也可以在用户的散热器处局部调节。本文研究的养殖场要根据不同牲畜对舍内温度的不同需求(如保育仔猪要求的舒适室内温度往往高于生长猪要求的舒适室内温度),动态调节流经舍内散热器的水流量,从而在保证牲畜温度舒适度的前提下,最大限度地节省供热成本。因此,在牲畜舍散热器处的局部量调节模式更适合本文提出的场景。此外,相较于一次热网,低碳养殖场中的二次热网规模小且距离短,可以忽略管网中的热损耗^[14],因此只需考虑二次热网水力模型。

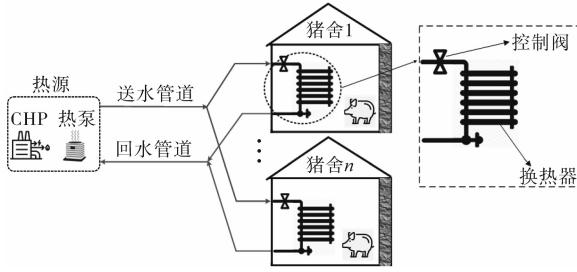


图4 低碳养殖场供热系统

Fig.4 Heating distribution network in the low-carbon farm

对于供热网络中的每个节点,进入节点的流量等于流出节点的流量^[15],如下式所示:

$$A_{\text{HDN}} m^{\text{pipe}} = m^{\text{node}} \quad (15)$$

式中: A_{HDN} 为热网的关联矩阵; m^{pipe} , m^{node} 分别为各个管道流量和节点流量矩阵。

为了防止管道振动,管道中热水的流量需要控制在一定范围内,即

$$m_l^{\text{pipe,min}} \leq m_l^{\text{pipe}} \leq m_l^{\text{pipe,max}} \quad \forall l \in N^{\text{pipe}}, t \in T \quad (16)$$

式中: m_l^{pipe} 为管道 l 在 t 时刻的流量; $m_l^{\text{pipe,min}}$, $m_l^{\text{pipe,max}}$ 分别为管道 l 中热水流量的下限和上限; N^{pipe} 为管道数量; T 为优化调度时段。

水流沿管道摩擦产生管道压降,压降与水流量的平方成正比^[16],如下式:

$$p_{n,t} - p_{n+1,t} = \xi_l \cdot (m_l^{\text{pipe}})^2 \quad \forall l \in N^{\text{pipe}}, n \in N^{\text{node}} \quad (17)$$

其中

$$\xi_l = \frac{8K_l L_l}{d_l^5 \pi^2 \rho}$$

式中: $p_{n,t}$ 为节点 n 在 t 时刻的压力; K_l , L_l , d_l 分别为管道 l 的摩擦系数、长度和内壁管径; ρ 为水的密度; N^{node} 为节点数量。

为了热网的正常运行,节点压力也需要约束在一定的范围内,如下式:

$$p^{\min} \leq p_{n,t} \leq p^{\max} \quad (18)$$

式中: $p^{\max}$, $p^{\min}$ 分别为节点压力上、下限值。

本文选择采用分段线性化的方法将式(17)进行线性化处理。根据文献[17]的分段线性化的近似理论,如果能够把变量分成足够多的段,则可以使用分段的线性函数来近似非线性模型。线性化处理示意图如图5所示。

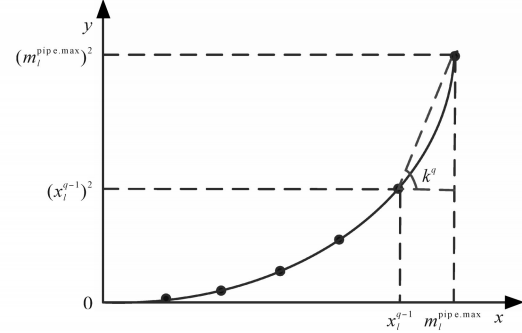


图5 热网分段线性化示意图

Fig.5 Approximation principle of piecewise linearization

式(17)的非线性项是 t 时刻的管道 l 的流量 m_l^{pipe} ,可以将其划分为 Q 段(图5中 $q \in Q$)在横坐标上表示出来,相应的坐标和斜率如下式:

$$\begin{cases} x_l^q = 0 \\ y_l^q = 0 \end{cases} \quad q = 1 \quad (19)$$

$$\begin{cases} x_l^q = \frac{m_l^{\text{pipe,max}} \cdot q}{Q} \\ y_l^q = (x_l^q)^2 \\ k_l^q = \frac{y_l^q - y_l^{q-1}}{x_l^q - x_l^{q-1}} \end{cases} \quad q \geq 2 \quad (20)$$

通过将图5的曲线进行分段处理,以一组线性方程代替原始的非线性模型,如下式:

$$p_{n,t} - p_{n+1,t} = \xi_l \cdot \sum_{q=1}^Q [(A_{l,t}^{\text{pipe}} - \delta_{l,t}^q x_l^q) k_l^q + \delta_{l,t}^q y_l^q] \quad (21)$$

其中

$$\delta_{l,t}^q x_l^q \leq A_{l,t}^{\text{pipe}} \leq \delta_{l,t}^q x_l^{q+1} \quad (22)$$

$$\sum_{q=1}^Q \delta_{l,t}^q = 1 \quad (23)$$

式中: $A_{l,t}^{\text{pipe}}$ 在数值上等于 m_l^{pipe} ; $\delta_{l,t}^q$ 为0~1的变量,用来表示 $A_{l,t}^{\text{pipe}}$ 的值是否在第 q 段上。

至此,热网的非线性约束转换为线性约束,从而方便IES的优化求解。

1.2.4 低碳养殖场牲畜舍数学模型

1) 牲畜舍围护结构热动态数学模型。由于牲畜舍的墙体等围护结构材料存在蓄热特性,导致围护结构在传递热量时存在一定的时间延迟,进而影响舍内空气温度的变化^[18]。本文采用热阻-热容(resistance-capacitance, RC)网络模型^[19-20]

来对牲畜舍的这一热动态过程进行数学建模,从而对牲畜舍的围护结构蓄热特性加以利用,进一步降低牲畜采暖能耗。

以一个猪舍为例,图6描述了该猪舍的RC网络构成。RC网络模型包括墙体节点和室内空气节点,热阻和热容。节点各自通过热阻相互连接,并经过热容接地。如图6所示,以猪舍制热区域的室内空气温度为参考节点,设该节点为节点1,温度为 T_r^1 ,与制热区域相邻的其他区域的空气节点(分别为节点2,3,4,5),温度分别为 T^2, T^3, T^4, T^5 ;猪舍四面墙体的热容、热阻分别为 $C_w^{1,2}, C_w^{1,3}, C_w^{1,4}, C_w^{1,5}, R_w^{1,2}, R_w^{1,3}, R_w^{1,4}, R_w^{1,5}$;四面墙体温度分别为 $T_w^{1,2}, T_w^{1,3}, T_w^{1,4}, T_w^{1,5}$ 。假设该制热区域内温度分布均匀,空气的总质量不变,则该猪舍的墙体热动态模型和室内热动态模型可以分别描述^[19-20]为

$$\begin{cases} C_w^{1,2} \frac{dT_w^{1,2}}{dt} = \frac{T_r^1 - T_w^{1,2}}{R_w^{1,2}} + \frac{T^2 - T_w^{1,2}}{R_w^{1,2}} + r^{1,2} \alpha^{1,2} A_w^{1,2} Q_{rad}^{1,2} \\ C_w^{1,3} \frac{dT_w^{1,3}}{dt} = \frac{T_r^1 - T_w^{1,3}}{R_w^{1,3}} + \frac{T^3 - T_w^{1,3}}{R_w^{1,3}} + r^{1,3} \alpha^{1,3} A_w^{1,3} Q_{rad}^{1,3} \\ C_w^{1,4} \frac{dT_w^{1,4}}{dt} = \frac{T_r^1 - T_w^{1,4}}{R_w^{1,4}} + \frac{T^4 - T_w^{1,4}}{R_w^{1,4}} + r^{1,4} \alpha^{1,4} A_w^{1,4} Q_{rad}^{1,4} \\ C_w^{1,5} \frac{dT_w^{1,5}}{dt} = \frac{T_r^1 - T_w^{1,5}}{R_w^{1,5}} + \frac{T^5 - T_w^{1,5}}{R_w^{1,5}} + r^{1,5} \alpha^{1,5} A_w^{1,5} Q_{rad}^{1,5} \end{cases} \quad (24)$$

$$C_r^1 \frac{dT_r^1}{dt} = \sum_{j=2}^5 \frac{T_w^{1,j} - T_r^1}{R_w^{1,j}} + \frac{T^{out} - T_r^1}{R_{win}} + Q_r^1 + Q_{int}^1 + \tau_{win} A_{win} Q_{rad}^{1,5} \quad (25)$$

式中: $r^{1,2}, r^{1,3}, r^{1,4}, r^{1,5}$ 在该面墙体接受阳光照射时取1,否则取0; $\alpha^{1,2}, \alpha^{1,3}, \alpha^{1,4}, \alpha^{1,5}$ 和 $A_w^{1,2}, A_w^{1,3}, A_w^{1,4}, A_w^{1,5}$ 分别为四面墙体的吸热率和表面积; C_r^1 为猪舍的室内空气等效热容; Q_r^1 为猪舍内的散热器散热量; Q_{int}^1 为猪舍内牲畜活动及代谢所产生的内

得热; A_{win} 为猪舍和节点5之间墙体上的窗户面积; $Q_{rad}^{1,5}$ 为透过窗得到的室外光照强度; R_{win} 为窗户的热阻; τ_{win} 为窗户透光率。

2)牲畜舍散热器数学模型。牲畜舍内的散热器上安装有智能调节阀和控制器,养殖场可以根据不同牲畜对舍内温度的不同需求,动态调整调节阀的开合度,从而调节流经舍内散热器的水流量。根据流体传热方程^[21],第*i*个牲畜舍的散热器在*t*时刻消耗的热功率 Q_{rad}^i 可以表示为

$$Q_{rad}^i = c_p v_t^i (T_s - T_r) \quad (26)$$

式中: c_p 为水的比热容; v_t^i 为*t*时刻舍内散热器中的水流量; T_s, T_r 分别为供热网络中的供水和回水温度。

由于养殖场可以通过调节散热器流量改变热负荷,热量调节采用局部量调节模式,因此,假设每个牲畜舍的供水温度是恒定的^[22]。为了达到节能的目的,需要一定的控制策略将散热器的回水温度变化保持在很小的范围内。因此,假定散热器的回水温度恒定且已知^[14]。

2 低碳养殖场综合能源系统优化调度方法

1)目标函数。本文考虑的优化调度目标函数为养殖场运行成本最低,如下式所示:

$$\min(OC) = \sum_{t=1}^T C_t^{elec} P_t^{Eload} \quad (27)$$

式中: C_t^{elec} 为*t*时段内电价; P_t^{Eload} 为*t*时段的养殖场总电负荷。

2)约束条件。优化调度约束条件包括养殖场 IES 中“源-网-荷”各个环节的运行约束。“源”包括养殖场内能量生产和转换单元的运行约束,如沼气处理单元运行约束(式(1))、CHP 和热泵运行约束(式(2)~式(7))。“网”包括配电网运行约束(式(11)~式(14))、配热系统运行约束(式(15)、式(16)、式(18)~式(23))。“荷”包括以猪舍为例的牲畜舍约束(式(24)~式(26))。

此外,养殖场 IES 需要保证电功率平衡和热功率平衡,如下式:

$$P_t^e + P_t^{chp} = P_t^{hp} + P_t^{biogas} + P_t^{elec} + P_t^{loss} \quad (28)$$

$$H_t^{chp} + H_t^{hp} = P_t^{Hload} \quad (29)$$

其中

$$P_t^{loss} = \sum_n r_{ln} \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} \quad (30)$$

式中: P_t^{loss} 为*t*时刻养殖场配电网的有功损耗;

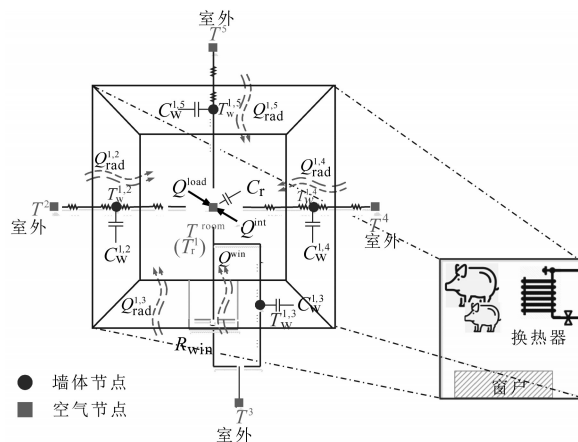


图6 猪舍热动态RC网络模型

Fig.6 RC model of the heating zone of the piggery

P_t^{Hload} 为 t 时段的养殖场总热负荷。

本文基于 Matlab-Yalmip 平台,通过 CPLEX 求解器对上述线性规划模型进行求解。

3 算例分析

3.1 算例描述

采用图7所示的养殖场 IES 算例对本文所提方法进行验证。其中,配电网基于 IEEE 33 算例,系统数据参考文献[23];热网采用 11 节点系统,系统数据参考文献[10]。如图7所示,猪舍共有 6 组,每组包含 20 间单独猪舍,每间猪舍饲养 50 头

猪。1~4 组猪舍饲养生长猪,5~6 组猪舍饲养保育仔猪。每间猪舍长 8 m、宽 8 m、高 2 m。猪舍的建筑热参数为^[24]: $R_w^{1,j}=0.06 \text{ K/W}$, $R_{\text{win}}=0.02 \text{ K/W}$, $C_r=2.5\text{e}+5 \text{ J/K}$, $C_w^{1,j}=7.9\text{e}+5 \text{ J/K}$, $A_{\text{win}}=4 \text{ m}^2$ 。6 组猪舍分别接入配网节点 20,7,9,14,30 和 7,同时接入热网节点 4,5,8,7,9 和 11。本文假设每组猪舍都配备同等容量的屋顶光伏设备,每组猪舍对应的屋顶光伏的出力数据如图8所示。本文设定生长猪的室内温度舒适度区间为 $[20^\circ\text{C}, 22^\circ\text{C}]$,而保育仔猪的室内温度舒适度区间为 $[22^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}]$ 。其他相关参数为: $\eta_e=0.3$, $\eta_h=0.4$, $\eta_{\text{hp}}=4$, $\eta_b=0.1$, $\varepsilon=0.05$ 。

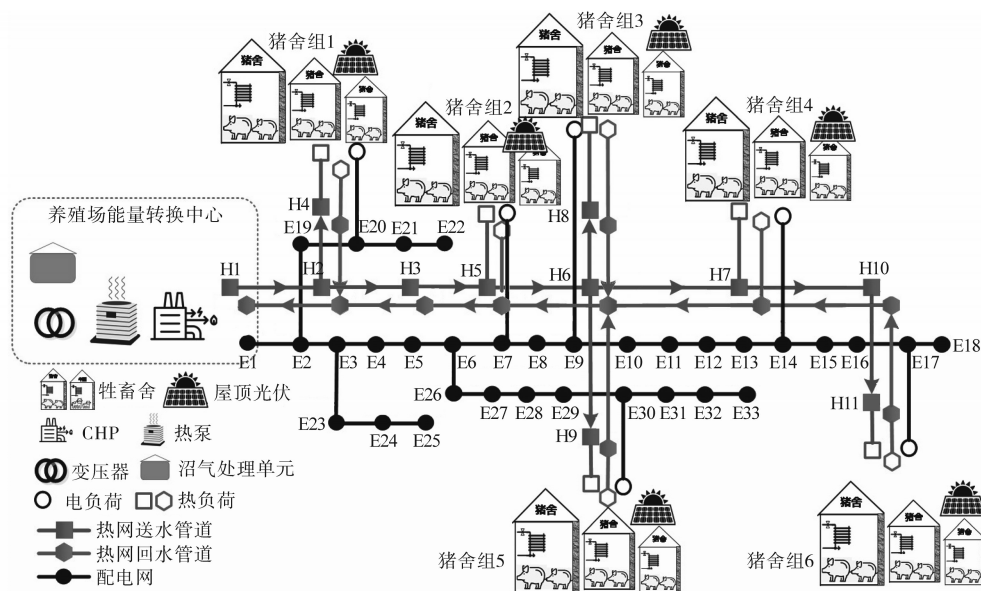


图7 养殖场 IES 算例结构

Fig.7 Schematic diagram of the integrated energy systems in the low-carbon and ecological farms

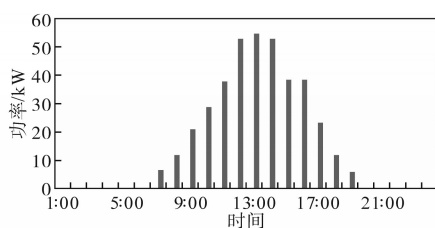


图8 光伏出力

Fig.8 PV output

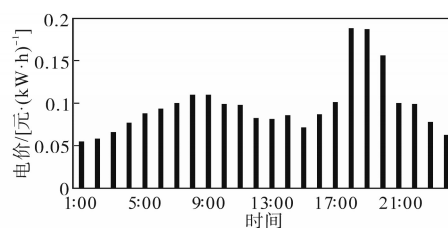


图10 电价

Fig.10 Electricity price

本文选取我国北方冬季某一典型日,室外温度和太阳辐射强度如图9所示^[24],电价如图10所示^[24]。

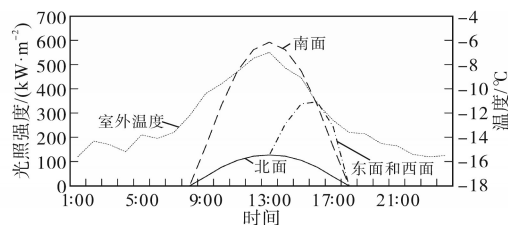


图9 太阳辐射强度和室外温度

Fig.9 Solar radiations and outdoor temperature

假设沼气处理单元的沼气生产量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[25],沼气热值取 15.56 MJ/m^3 ,折合为功率是 216.1 kW 。单间猪舍的电负荷及室内得热如图11所示。

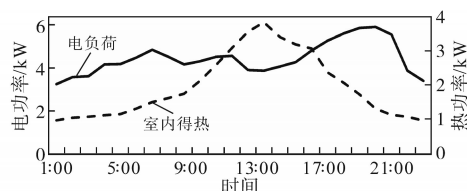


图11 单间猪舍的电负荷和室内得热

Fig.11 Electricity load and internal heat gains

3.2 结果分析

养殖场电能购买量和沼气的使用量如图12所示。可以看出,养殖场在光伏出力时期减少电能购买量,实现对光伏发电的全部消纳,养殖场以沼气处理单元的最大沼气生产功率(216.1 kW)优先使用沼气进行综合能源供给,不足的部分通过向外部电网购电来满足。这是由于沼气是通过养殖粪污处理得到,优先使用沼气可最大限度降低养殖场的能源花费。

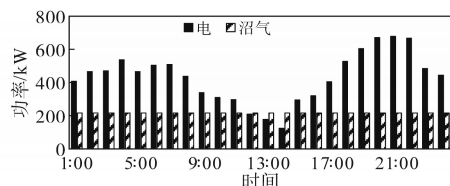


图12 养殖场电能购买量和沼气的使用量

Fig.12 Optimal electricity purchase and biogas consumption

养殖场 IES 的能源优化调度方案如图13所示。可以看到,CHP最大限度利用沼气生产电能和热能,因此其全天保持恒定的电能和热能功率输出。屋顶光伏出力被全部消纳,进一步降低了购电成本。在 CHP 产出热能不能满足养殖场热负荷的时候,养殖场调度热泵,通过消耗电能来产生热能。

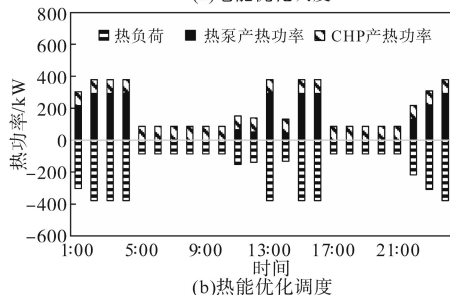
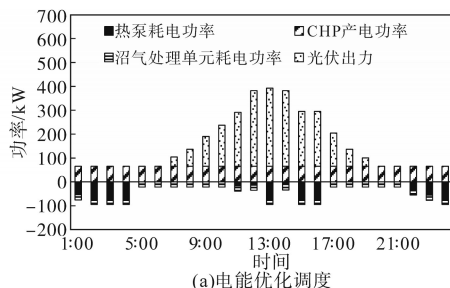


图13 养殖场 IES 的能源优化调度方案

Fig.13 Optimal energy schedules of IES in the farm

两种类型猪舍的室内温度及散热器流量如图14所示。基于猪舍围护结构的蓄热特性,养殖场可分别在生长猪舍和保育仔猪舍的舍内温度舒适度区间内,动态调整猪舍内散热器的水流量,从而节省猪舍的供热成本,降低养殖场的运行成本。

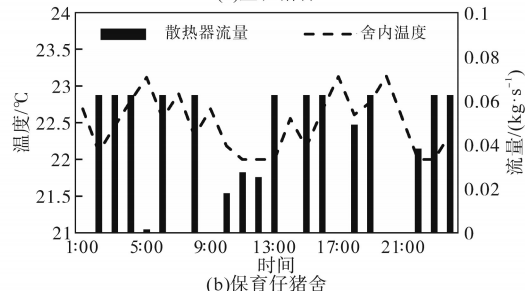
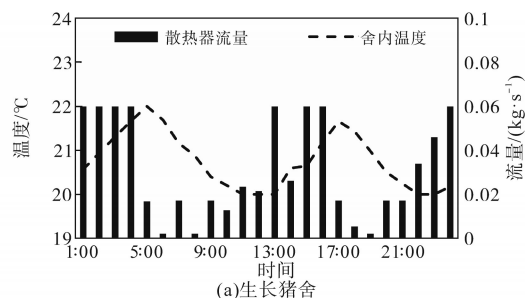


图14 猪舍舍内温度及散热器流量(以1间猪舍为例)

Fig.14 Indoor temperatures and the water flow rates of the radiator in the piggery (taking one piggery as an example)

为了验证沼气利用对低碳养殖场的好处,本文对比了不使用沼气场景下的养殖场运行成本,如表1所示。可以看到,通过沼气利用,养殖场可以降低约12.1%的运行成本,同时减少向外部电网购电约13%,从而进一步降低对外部电网的依赖。因此,通过对沼气的有效利用可在解决养殖场粪污污染的同时,降低养殖场的用能成本,且进一步降低对外部电网的依赖,从而减缓潜在的农村电网备用容量的建设。

表1 对比结果

Tab.1 Comparative results

	电能购买总量/kW	养殖场运行成本/元
不使用沼气	11 910.5	1 199.7
使用沼气(本文)	10 346.5	1 054.5

为了进一步验证养殖场热负荷灵活性的利用价值,本文设置了如下两个对比场景:

场景1:考虑猪舍围护结构的蓄热特性以及由此带来的热负荷的灵活性,即本文的方案。该场景下,猪舍内散热器的水流量可在保证舍内温度舒适度的前提下动态调整;

场景2:不考虑猪舍围护结构的蓄热特性以及由此带来的热负荷的灵活性。该场景下,猪舍内散热器的水流量不可以调整。假设生长猪舍散热器流量设定为0.03 kg/s,而保育仔猪舍散热器流量设定为0.035 kg/s。

两种场景下两种类型猪舍室内温度如图15所示。与场景1不同,场景2由于不对散热器的水流量做调节,因此舍内温度只是跟随外界环境

(即室外温度和光照强度)的变化而变化,而不会发生剧烈变化。

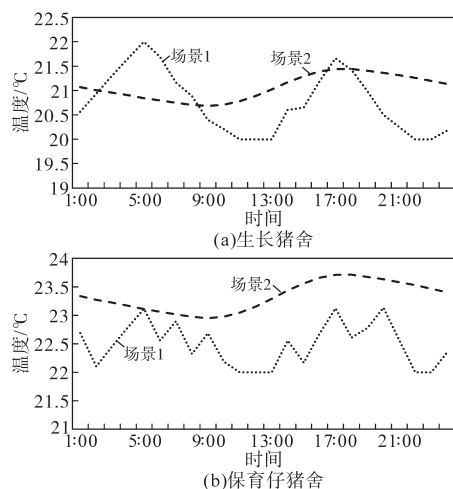


图15 猪舍舍内温度(以1间猪舍为例)

Fig.15 Indoor temperatures (taking one piggery as an example)

两种场景下养殖场的热负荷和运行成本对比结果如表2所示。可以看到,由于场景2不对散热器的水流量做调节,无法利用热负荷的灵活性,使得其热负荷总量和运行成本均高于场景1。此外,场景2的猪舍散热器流量由人为设定,而非通过优化调度来决定。因此可能会造成猪舍内温度过高或过低,无法保证舍内温度舒适度,且有可能造成热能的浪费。

表2 两种场景的对比结果

Tab.2 Comparative results in two scenarios

场景	热负荷总量/kW	养殖场运行成本/元
场景1	4 847.2	1 054.5
场景2	5 987.5	1 098.8

4 结论

本文针对我国北方冬季具有大量供热需求的低碳养殖场构建了其IES模型,并提出了养殖场IES的优化调度方法,所得结论如下:

1) IES可以有效利用养殖场的沼气资源和屋顶光伏设备进行综合能源供给,一方面可解决养殖场粪污污染,且降低养殖场的用能成本;另一方面可以减少养殖场向外部电网的购电量,从而进一步降低对外部电网的依赖,减缓潜在的农村电网备用容量的建设;

2) 猪舍围护结构的蓄热特性使得养殖场的热负荷具有一定的灵活性。养殖场可在保证舍内温度舒适度的前提下,动态调整流经猪舍内散热器的水流量,从而降低养殖场供热成本;

3) 与传统的养殖场牲畜舍供热方式不同(人

为设定舍内散热器的流量),本文通过优化的方法确定舍内散热器的流量,不仅能保证舍内温度舒适度,还能有效避免热能的浪费,符合养殖场的低碳目标发展需求。

参考文献

- [1] 孙宏斌,潘昭光,孙勇,等. 跨界思维在能源互联网中应用的思考与认识[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 63-72.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, SUN Yong, et al. Reflection and understanding of application of transboundary thinking in energy internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 63-72.
- [2] 赵汝东,董恒诚,黄华,等. 我国畜禽粪污肥料化利用研究现状[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 151-156.
ZHAO Rudong, DONG Huancheng, HUANG Hua, et al. Research status of fertilizer utilization of livestock and poultry in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 151-156.
- [3] 田素妍,郑微微,周力,等. 中国低碳养殖的环境库兹涅茨曲线特征及其成因分析[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 481-493.
TIAN Suyan, ZHENG Weiwei, ZHOU Li, et al. Characteristics of environmental Kuznets curve for the low carbon breeding in China and its causes[J]. Resources Science, 2012, 34(3): 481-493.
- [4] 靳小龙. 集成智能楼宇的电/气/热区域综合能源系统建模及运行优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
JIN Xiaolong. Modelling and optimal operation of smart buildings-integrated electricity, gas and heating systems at community level[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [5] 施锦月,许健,曾博,等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化模型[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2959-2966.
SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2959-2966.
- [6] JIN X L, MU Y F, JIA H J, et al. Optimal day-ahead scheduling of integrated urban energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 180: 1-13.
- [7] LIU B, MENG K, DONG Z Y, et al. Optimal dispatch of coupled electricity and heat system with independent thermal energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3250-3263.
- [8] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-590.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-590.
- [9] 杜丽佳,靳小龙,何伟,等. 考虑电动汽车和虚拟储能系统优