

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210634

# 光伏建筑一体化社区热电联供调度策略

潘帅琪<sup>1</sup>, 魏繁荣<sup>2</sup>, 林湘宁<sup>2</sup>, 李正天<sup>2</sup>, 随权<sup>2</sup>, 徐海波<sup>3</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 易事特集团股份有限公司, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 针对冬季寒冷条件下光伏建筑一体化社区(Building Integrated Photovoltaic, BIPV)的电辅热装置性能系数(Coefficient of Performance, COP)大幅下降的问题, 提出一种新型光伏建筑一体化社区热电联供调度策略。首先, 提出一种含可翻转热电联供模式(Reversible Solar Thermal Electricity Cogeneration Mode, RSTECM)和相变储能系统的新型热电联供系统, 量化分析了热泵性能系数和光伏出力随环境条件的变化情况。然后, 引入一种含等效热参数(Equivalent Thermal Parameters, ETP)的建筑热力网络, 由此建立一种含热力系统和电力系统的社区微网模型, 并以社区运行成本最小化为优化目标。最后, 引入差分处理和热力侧-电力侧问题交互迭代的算法, 实现优化模型的高效求解。算例仿真验证了所提能源供给模式及协调调度策略的可行性和优越性。

**关键词:** 光伏建筑一体化社区; 热电联供; 相变储能系统; 差分法; 交互迭代

## Dispatch strategy of heat and power cogeneration in building integrated photovoltaic

PAN Shuaiqi<sup>1</sup>, WEI Fanrong<sup>2</sup>, LIN Xiangning<sup>2</sup>, LI Zhengtian<sup>2</sup>, SUI Quan<sup>2</sup>, XU Haibo<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. East Group Co., Ltd., Dongguan 523808, China)

**Abstract:** Given the problem that the coefficient of performance of electric auxiliary heating devices in building integrated photovoltaic decreases significantly under cold winter conditions, a novel combined heat and power supply scheduling strategy for building integrated photovoltaic is proposed. First, a new combined heat and power system with a reversible solar thermal electricity cogeneration mode and a phase change energy storage system is established. The variation of coefficient of performance of the heat pump and photovoltaic output with environmental conditions is quantified and analyzed. Secondly, a building thermal network with equivalent thermal parameters is introduced to establish a community micro-grid model with heat and power systems, and the optimization objective is to minimize the community operation cost. Finally, an algorithm of differential processing and interactive iteration of the thermodynamic-electrical side problem is introduced to achieve an efficient solution of the optimization model. The simulation verifies the feasibility and superiority of the proposed energy supply mode and coordinated scheduling strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107095).

**Key words:** building integrated photovoltaic; heat and power cogeneration; phase change material energy storage system; difference method; interactive iteration

## 0 引言

近年来, 随着可再生能源<sup>[1-3]</sup>的不断发展, 集成分布式光伏<sup>[4-5]</sup>等能量单元的光伏建筑一体化社区饱

受关注, 为推动“双碳”目标下建设新型电力系统提供方向, 建筑在能源网中由被动消耗者朝向主动生产者的角色过渡。然而, 由于新能源<sup>[6-7]</sup>出力的间歇性和波动性<sup>[8-9]</sup>, 发电侧出力与用户侧负荷不匹配<sup>[10-11]</sup>, 富余能源消纳矛盾逐渐凸显。从电网侧角度, 新能源馈电可能给大电网动态平衡和安全稳定运行造成风险, 并且带来调峰压力; 从社区业主角

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107095); 东莞市引进创新科研团队计划资助(201536000200036)

度,当光伏大发时,社区业主未必处于用能高峰期,用户侧将面临大量弃光或以低价余量上网等经济损失。在社区微电网内增设储能设备解决社区微网富余能源消纳问题是一个可行思路。然而,传统储能设备存在较高的充放电能量和寿命损耗,在并网型微网中作为消纳方式尚不具备较好的经济性。

考虑到社区建筑本身作为热能利用的终端,制热负荷<sup>[12-15]</sup>占社区建筑能耗约为60%,如使用储热装置替代储电装置满足用户侧热能需求,不失为一种更加适配现代建筑特点,且经济可行的优选方案。实际上,具备长时间尺度储能能力的相变材料(Phase Change Material, PCM)作为一种新型储热介质,在实际中已有相关应用。文献[16]开展了一项关于含相变材料的太阳能蒸馏器实验研究,文献[17]采用相变材料降低数据中心冷却成本,文献[18]提出一种利用相变材料潜热提高功率半导体暂态热容的集成方案。PCM具有价格低廉、状态稳定、储能容量大等优势,集成于社区建筑内部的复合PCM可以在相变过程中释放或吸收热量,在实现室内控温、余热储存、富余能源消纳等功能的同时,大幅降低对高成本储能系统的需求。

在储热过程中,社区微网大量应用诸如热泵或空调等具有较高能效比的供暖设备来实现电热转换并开展能量调度工作。目前已有不少学者对该领域进行探究,并取得了丰硕的研究成果<sup>[19-23]</sup>。文献[19]构建智能楼宇的空调系统优化调控模型,通过在温度舒适度范围内对楼宇室温进行优化调节;文献[20]提出一种聚合大规模空调负荷实现虚拟调峰的3层控制系统结构;文献[21]为实现大规模空调负荷参与需求响应,提出一种基于主从一致性的多智能体分散式协同控制策略;文献[22]根据空调负荷模型建立轮空策略下空调削负荷能力的概率模型;文献[23]提出一种考虑储能系统和空调负荷的主动配电网多目标调度优化方法。上述文献均研究了传统电辅热设备向建筑的供暖行为。

然而,受严寒地区气候条件等因素制约,在冬季时,热泵的电辅热设备性能系数会大幅下降<sup>[24-26]</sup>,以上问题在我国高纬度地区尤为突出。利用分布式电源尤其是光伏配合热泵转化为热能存储的传统方式,其效率难言最优,不利于实现社区微网长期可持续发展。加之传统热电联供型微网<sup>[27-28]</sup>存在热电比固定,调节能力较弱等不足,难以适配社区用户强耦合的电热用能需求。如若在用户侧引入可翻转热电联供模式,在制热和产电之间灵活切换,在完全适配能源网电-热负荷需求的前提下,将能够优化综合能源系统的总体效率,充分发挥太阳能光伏

光热系统的内在优势。

针对以上问题,本文首先提出一种基于RSTECM的新型热电联供系统,并考虑社区建筑的蓄热特性,建立一个精细的含热力系统和电力系统的社区微网模型。然后,设计一种新型热电联供调度策略,并针对复杂的热电联合模型,采用一种差分化和交互迭代的算法框架。最后,仿真验证所提调度策略的可行性和优越性。

## 1 新型热电联供系统

### 1.1 灵活翻转型热电联供模式

针对居住建筑供暖时间长、热负荷高等特点,本文提出一种灵活翻转型热电联供模式(Reversible Solar Thermal Electricity Cogeneration Mode, RSTECM),如图1所示。由图可知,系统由光伏组件、聚光集热器和支架组成,能够参照实时光照强度及环境温度,通过自动控制系统在光伏和集热两种模式下切换运行,提高系统对太阳能的利用率并满足用户电、热两种用能需求。当其处于集热模式时,采用聚光反射镜将太阳能汇聚至集热管,集热循环介质输出热量;当其处于光伏模式时,利用光伏组件产生电能并上传至微网。该模式还将覆盖热泵运行所需部分电力供应,降低微网系统购电量,提高系统节能效果。需要指出,该模式相较已有社区建筑热电联供模式需要追加建设投资,市场回收期有一定延长。另外,集热器温度对系统整体性能影响较为显著,因此对集热器隔热性能要求较高。

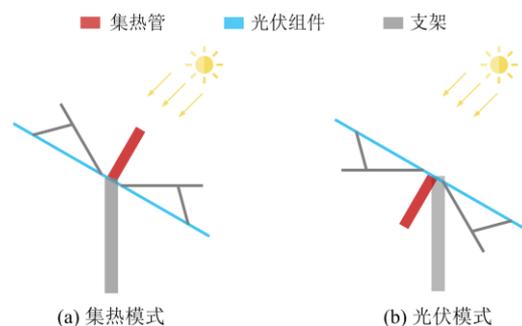


图1 灵活翻转型热电联供模式示意图

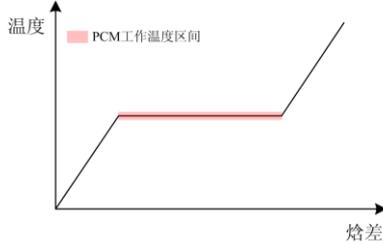
Fig. 1 Schematic diagram of RSTECM

### 1.2 相变储能系统

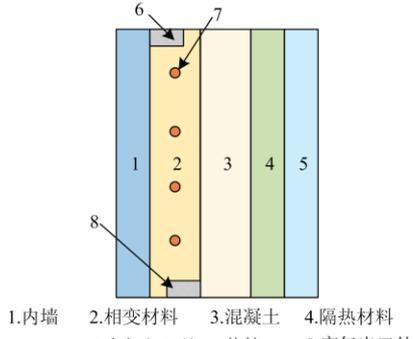
相变储能系统是一种新型的建筑室温控制系统,可以在相变过程中储存大量潜热。该系统既能储存富余能源,也能通过主动的热调节以降低整体能源需求<sup>[29]</sup>。在长时间尺度上,相变储能系统具有储能容量大,状态稳定等优势;在短时间尺度上,相变储能系统响应速度快,热力侧和电力侧平衡互

不影响<sup>[30]</sup>。

参照室内舒适温度,本文制备相变点在 20 °C 的复合相变材料,参照地暖管道敷设原理,在建筑墙体夹层内嵌入封装 PCM 的管道和热管。PCM 焓差-温升关系及相变建筑墙体结构如图 2 所示。



(a) 相变材料焓差-温升示意图



1.内墙 2.相变材料 3.混凝土 4.隔热材料  
5.外墙 6.空气入口 7.热管 8.空气出口  
(b) 相变建筑墙体结构示意图

图 2 PCM 焓差-温升及相变建筑墙体图

Fig. 2 Enthalpy difference-temperature and structure diagram of building wall with phase change materials

### 1.3 灵活翻转型热电联供与相变储能系统协调调度

含 RSTECM 与相变储能系统的光伏建筑一体化社区微网拓扑如图 3 所示。RSTECM 针对每个时刻微网电力/热力负荷和环境条件,优化每个时刻的工作状态(光伏/集热)和输出功率,并通过传动装置来驱动系统版面的翻转。当 RSTECM 处于光伏状态时,光伏组件侧朝上,系统输出功率输送至微电力网;当 RSTECM 处于集热状态时,聚光集热器朝上,此时传热工质经由集热器吸收热能并进入热力管

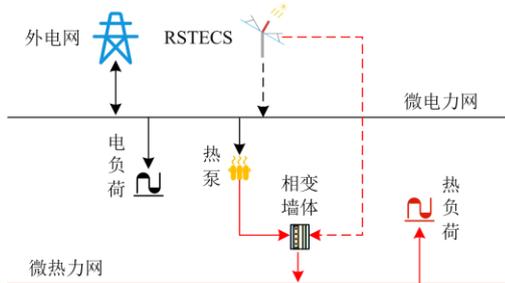


图 3 光伏建筑一体化社区微网拓扑

Fig. 3 BIPV microgrid topology

网。高温传热工质流经敷设于相变材料内的热/冷管与相变材料进行热交换,通过改变阀门开度来调节供热工质压力和流量,相变储能能够吸收、储存供热管网的热能,并控制电风扇满足热力侧制热需求,使得建筑室内温度长期保持在人体舒适温度范围内。

需要说明,在实时运行时,调节辅助热泵跟随电力侧光伏出力,可以消解光照强度的随机性和波动性引起的不利影响。

## 2 热电联供系统模型

本节对该文所提的含热力系统和电力系统的社区建筑精细模型展开分析。

### 2.1 光伏模型

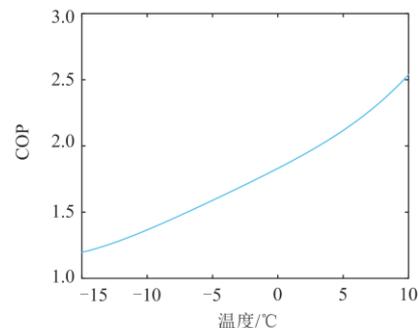
当 RSTECM 处于光伏状态时,其输出功率由光照强度、环境温度决定。

$$T_c^t = [1 + \frac{G^t}{G_{noct}} \frac{k\eta_{mppt}}{\tau\alpha} (T_{c,noct} - T_{a,noct})]^{-1} \cdot [T_a^t + \frac{G^t}{G_{noct}} (T_{c,noct} - T_{a,noct}) (1 - \frac{\eta_{mppt}(1 - kT_{c,S})}{\tau\alpha})] \quad (1)$$

$$P_{pv}^t = P_{stc} \frac{G^t}{G_{stc}} [1 + k(T_c^t - T_{stc})] \quad (2)$$

式中:  $T_c^t$ 、 $G^t$  和  $T_a^t$  分别为  $t$  时刻光伏电池温度、光照强度和环境温度;  $G_{noct}$ 、 $T_{a,noct}$  和  $T_{c,noct}$  分别表示额定运行条件的光照强度、环境温度和光伏电池表面温度;  $\eta_{mppt}$  是标准测试条件下光伏最大功率点 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 效率;  $T_{stc}$  和  $G_{stc}$  分别为标准测试条件下的光伏电池温度和光照强度;  $\tau$  和  $\alpha$  分别为玻璃板透过率和太阳能吸收率;  $P_{pv}^t$  为  $t$  时刻光伏电池输出功率;  $P_{stc}$  为光伏电池额定容量;  $k$  为光伏电池温度系数。

根据文献[31]数据,调用 Matlab 中的 polyfit 函数对热泵 COP-环境温度曲线  $COP = f(T_a)$  进行四阶多项式拟合,与实际系数曲线已能基本重合,如图 4(a)所示,能够在热泵实际运行时对不同环境温度下的热泵性能进行精细化度量。



(a) COP-气温图

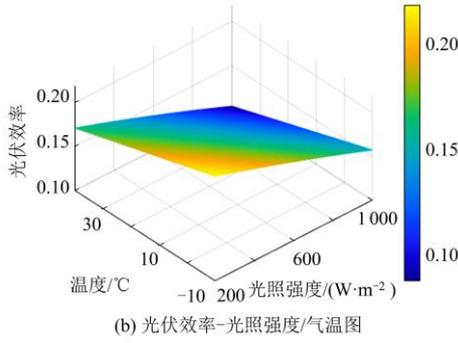


图4 环境因子影响

Fig. 4 Impact of environmental factors

基于式(1)、式(2), 分析不同光照强度和环境温度下的光伏功率, 如图 4(b)所示。由图可知, 光伏效率与光照强度呈正向关联性, 与温度呈负向关联性。例如, 当气温为 10 °C 时, 光照强度从 200 W m<sup>-2</sup> 递次上升至 1 000 W m<sup>-2</sup>, 光伏效率增大 47.1%。上述结果验证了光伏效率对环境因子的敏感性。

## 2.2 热传递系统模型

热传递系统结构如图 5 所示, 该系统由太阳能集热器、热泵和相变储能系统组成。其中, 太阳能集热器将吸收的热量通过换热传输至相变墙体中。

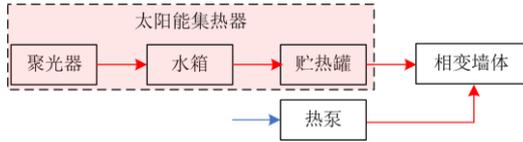


图5 热传递系统模型图

Fig. 5 Diagram of heat transfer model

热传递系统约束如下。

### 1) 太阳能聚光器约束

$$Q_{sc}^t = Q_{sc,ht}^t + c_w \rho_w V_{sc} \frac{dT_{sc}^t}{dt} \quad (3)$$

$$0 \leq T_{sc}^t \leq T_{sc,max} \quad (4)$$

$$Q_{sc}^t \leq Q_{sc,t}^t \quad (5)$$

式中:  $T_{sc}^t$  为  $t$  时刻太阳能聚光器温度;  $Q_{sc}^t$  为  $t$  时刻太阳能聚光器集热功率;  $Q_{sc,ht}^t$  为太阳能聚光器向水箱提供的热功率;  $c_w$ 、 $\rho_w$  分别为传热工质比热容和密度;  $V_{sc}$  为流经聚光器的传热工质容积;  $T_{sc,max}$  为聚光器工质高温保护温度;  $Q_{sc,t}^t$  为根据太阳辐照度计算得出的聚光器理论热功率。

### 2) 水箱运行约束

$$T_{sc}^t - \Delta T_{sc,ht,max} \leq T_{ht}^t \leq T_{sc}^t - \Delta T_{sc,ht,min} \quad (6)$$

$$T_{tw} + \Delta T_{ht,pt} \leq T_{ht}^t \leq T_{ht,max} \quad (7)$$

$$Q_{sc,ht}^t = Q_{ht,pt}^t + c_w \rho_w V_{ht} \frac{dT_{ht}^t}{dt} \quad (8)$$

式中:  $\Delta T_{sc,ht,max}$  和  $\Delta T_{sc,ht,min}$  分别为聚光器和水箱之间的温差上限和下限;  $T_{tw}$  为进水温度;  $\Delta T_{ht,pt}$  为水箱和贮热罐之间的温差下限;  $T_{ht}^t$  为  $t$  时刻水箱温度, 其高温保护温度为  $T_{ht,max}$ ;  $V_{ht}$  为水箱容积;  $Q_{ht,pt}^t$  为  $t$  时刻水箱向贮热罐的热传递功率。

### 3) 贮热罐约束

$$T_{ht}^t - \Delta T_{ht,pt,max} \leq T_{pt}^t \leq T_{ht}^t - \Delta T_{ht,pt,min} \quad (9)$$

$$Q_{ht,pt}^t = Q_{pt,pcm}^t + c_w \rho_w V_{pt} \frac{dT_{pt}^t}{dt} \quad (10)$$

$$Q_{pt,pcm}^t = c_w \rho_w V_{pw} (T_{pt}^t - T_p^t) \quad (11)$$

式中:  $T_{pt}^t$  为  $t$  时刻贮热罐工质温度;  $\Delta T_{ht,pt,max}$  和  $\Delta T_{ht,pt,min}$  分别为水箱、贮热罐之间循环泵启停温差上限和下限;  $Q_{pt,pcm}^t$  为贮热罐向相变储能墙体热传递功率;  $V_{pt}$  为贮热罐容积;  $T_p^t$  为相变材料温度。

相变储能系统吸收来自太阳能集热器输出热功率和辅助热泵功率。

$$Q_{hp}^t + Q_{pt,pcm}^t = Q_i^t \quad (12)$$

式中:  $Q_{hp}^t$  为热泵产热功率;  $Q_i^t$  为相变储能系统热力学输入。

## 2.3 室内热力模型

室内建筑结构热力交换包括热传导和热辐射, 且以强制对流作为相变储能释放热量的方式。如图 6 所示, 本文以一种含等效热参数(Equivalent Thermal Parameters, ETP)的典型建筑热力网络<sup>[32]</sup>模型进行说明。该热网节点含墙体节点和空气节点, 节点间经由热阻连接, 并均经过热容节点。

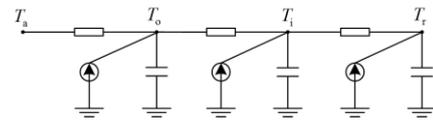


图6 典型建筑热力网络模型图

Fig. 6 Diagram of typical building thermal network model

具体热力学约束如下。

### 1) PCM 墙体空气约束

$$C_a m_a^i (T_{p,a}^t - T_r^t) = \frac{T_p^t - T_{p,a}^t}{R_{p,a}} + \frac{T_{p,i}^t - T_{p,a}^t}{R_{i,a}} + \frac{T_{p,o}^t - T_{p,a}^t}{R_{o,a}} \quad (13)$$

### 2) PCM 墙体约束

$$C_p m_p \frac{dT_p^t}{dt} = \frac{T_{p,o}^t - T_p^t}{R_{p,o}} + \frac{T_{p,i}^t - T_p^t}{R_{p,i}} + \frac{T_{p,a}^t - T_p^t}{R_{p,a}} + Q_i^t - Q_o^t \quad (14)$$

3) 室内空气约束

$$C_a m_a^t (T_{p,a}^t - T_r^t) + \frac{T_{p,i}^t - T_r^t}{R_{i,r}} = \sum_{k=1}^N \frac{T_r^t - T_{k,i}^t}{R_{r,k}} \quad (15)$$

4) 其他墙体约束

$$\frac{T_{p,a}^t - T_{p,i}^t}{R_{i,a}} + \frac{T_{p,o}^t - T_{p,i}^t}{R_{o,i}} + \frac{T_p^t - T_{p,i}^t}{R_{p,i}} = \sum_{k=1}^N \frac{T_{p,i}^t - T_{k,i}^t}{R_{i,k}} + \frac{T_{p,i}^t - T_r^t}{R_{i,r}} \quad (16)$$

$$\frac{T_a^t - T_{p,o}^t}{R_d} + \sigma G_p^t = \frac{T_{p,o}^t - T_{p,i}^t}{R_{o,i}} + \frac{T_{p,o}^t - T_p^t}{R_{p,o}} + \frac{T_{p,o}^t - T_{p,a}^t}{R_{o,a}} \quad (17)$$

式中:  $C_a$  为空气比热容;  $C_p$  为相变材料比热容;  $m_a^t$  为相变墙体内部空气质量流量;  $m_p$  为相变材料质量;  $T_{p,a}^t$  为相变墙内空气温度;  $T_r^t$  为室内温度;  $R_{p,a}$  为相变材料与相变墙体内部空气的热阻;  $T_{p,i}^t$  为相变墙体内部温度;  $R_{i,a}$  为相变墙体内部与相变墙体内部空气的热阻;  $T_{p,o}^t$  为相变墙体外部温度;  $R_{o,a}$  为相变墙体外部与相变墙体内部空气的热阻;  $R_{p,o}$  为相变材料与相变墙体外部的热阻;  $R_{p,i}$  为相变材料与相变墙体内部的热阻;  $R_{i,r}$  为相变墙体内部与室内空气的热阻;  $R_{r,k}$  为室内空气与墙体  $k$  内侧的热阻;  $R_{o,i}$  为相变墙体外部与内侧的热阻;  $R_{i,k}$  为相变墙体内部与墙体  $k$  内侧的热阻;  $R_d$  为环境与相变墙体外部的热阻;  $T_{k,i}^t$  为其他墙体内部温度;  $G_p^t$  为相变墙体外部吸收的太阳辐射;  $Q_o^t$  为相变储能墙体  $t$  时刻的热力学输出;  $\sigma$  为外墙吸收的太阳辐射比。式(13)表示相变墙体内部空气焓增量约束, 式(14)表示相变材料焓增量约束, 式(15)表示室内空气焓增量约束, 式(16)、式(17)分别表示相变墙体内部、外侧热力学约束。

相变储能系统充放热前后系统储热量关系为

$$H_p^t = \int_{T_p^0}^{T_p^t} C_p m_p d\sigma \quad (18)$$

式中:  $H_p^t$  为储能系统的实时储能量;  $T_p^0$  和  $T_p^t$  分别为 PCM 起始温度和实时温度。本文通过 SOC(State of Charge)代表储能系统荷电状态。

$$SOC^t = \frac{H_p^t}{H_{p,max}} \quad (19)$$

$$SOC_{min} \leq SOC^t \leq SOC_{max} \quad (20)$$

式中:  $SOC^t$  为储能系统在  $t$  时刻的荷电状态;  $H_{p,max}$  为相变储能系统的最大储能量;  $SOC_{min}$  和  $SOC_{max}$

分别为 SOC 的下限和上限。

考虑到为下一个调度周期预留一定的调节裕量, 使得储能系统在该周期开始时能够满足用户侧对其充放热的需求, 设置储能系统运行一个调度周期后的储热量恢复至起始储热量, 即添加调度可持续性约束:

$$SOC^0 = SOC^T \quad (21)$$

式中,  $SOC^0$  和  $SOC^T$  分别为调度周期始、末时刻的荷电状态。

社区建筑由多个制热模型聚合而成, 本文假设在同种控制方法以及相同光照强度、温度等环境参数下, 社区中每个制热区域的热力负荷相同。相变储能系统热量释放通过可控的强制对流方式对风扇的空气流量进行灵活调节, 从而使得冬季室内温度处于人体舒适温度范围内。

$$0 \leq m_a^t \leq m_{a,max} \quad (22)$$

$$T_{min} \leq T_r^t \leq T_{max} \quad (23)$$

式中:  $m_{a,max}$  为最大空气对流量;  $T_{min}$  和  $T_{max}$  分别为室内舒适温度区间下界和上界, 可由文献[33]的体感温度模型得出。式(22)为风扇转速约束, 式(23)为室内温度约束。

## 2.4 电力侧模型

社区建筑的电力需求由屋顶光伏和大电网两部分供应。参照文献[34]设置峰时段(07:00—12:00, 17:00—21:00)、平时段(01:00—17:00)、谷时段(00:00—07:00, 21:00—24:00)购电电价及售电电价, 如图7所示。

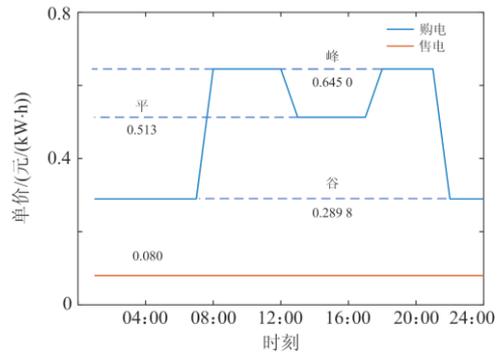


图7 购电和售电价

Fig. 7 Electricity purchase and sale price

电力侧存在以下约束。

1) 电能守恒关系

$$\sum_{i=1}^{N_{pv}} P_{pv,i}^t + P_b^t - P_s^t = \sum_{i=1}^{N_{hp}} P_{hp,i}^t + \sum_{i=1}^{N_d} P_{d,i}^t \quad (24)$$

式中:  $N_{pv}$  为光伏数量;  $N_{hp}$  为热泵数量;  $N_d$  为负荷数量;  $P_b^t$  和  $P_s^t$  分别为联络线上的购电、售电功率;

$P_{hp,i}^t$  为热泵功率;  $P_d^t$  为电负荷。

2) 功率交换约束

$$|P_b^t - P_s^t| \leq P_{e,max} \quad (25)$$

式中,  $P_{e,max}$  为联络线的最大传输功率, 取值为 3 kW。

3) 电热转换约束

$$Q_{hp}^t = COP^t \cdot P_{hp}^t \quad (26)$$

式中,  $COP^t$  为热泵性能系数。

4) 热泵功率约束

$$U_{hp}^t P_{hp,min} \leq P_{hp}^t \leq U_{hp}^t P_{hp,max} \quad (27)$$

$$\Delta P_{hp,min} \leq P_{hp}^t - P_{hp}^{t-1} \leq \Delta P_{hp,max} \quad (28)$$

式中:  $U_{hp}^t$  为表征热泵状态的布尔变量, 取值为 1 时热泵开启, 否则关闭;  $P_{hp,min}$  和  $P_{hp,max}$  分别为热泵功率下限和上限, 分别为 0 和 2 kW;  $\Delta P_{hp,min}$  和  $\Delta P_{hp,max}$  分别为热泵爬坡速率的下限和上限, 分别为 -0.5 kW 和 0.5 kW。

## 2.5 协调调度模型

本文所提含新型热电联供模式的社区微网优化调度, 其中联络线功率和风扇转速分别受不同因素主导。

1) 热力侧调度子问题

注意到相变储能系统的能量释放由可控的强制空气对流和不可控的热泄漏构成, 因此需要对可控和不可控部分占比进行协调, 在满足室内温度控制需求的约束下, 实现对该能量释放过程的优化。热力侧以最小化所有时刻空气对流速度之和为目标。

$$\min \sum_{t=1}^T m_a^t \quad (29)$$

s.t. 式(3)一式(23)

式中,  $T$  为调度时段数, 本文取为 24。

通过求解热力学子问题, 可获得相变储能系统热力学输出的最小值, 而储能系统的热力学输入由集热器和热泵消耗电力提供, 因此热力学和电学子问题可由储能系统的 SOC 进行耦合, 可表示为

$$H_p^{t+1} = H_p^t + Q_{hp}^t + Q_{pt,pcm}^t - Q_{pa}^t \quad (30)$$

式中,  $Q_{pa}^t$  为相变储能系统与相变墙空气的换热功率。

2) 电力侧调度问题

电力侧从经济性最优角度出发, 即最小化所有时刻社区建筑微网从大电网购买电能成本之和。

$$\min \sum_{t=1}^T (P_b^t \cdot C_b^t - P_s^t \cdot C_s^t) \quad (31)$$

s.t. 式(1)一式(2)、式(24)一式(28)

## 3 模型求解

### 3.1 模型转换

含动态约束的微网调度是含微分代数方程 (Differential Algebraic Equations, DAE) 的优化数学问题<sup>[35]</sup>。此类问题可根据泛函优化理论求取时域解析解, 也可以进行离散化代数处理, 求取沿时域离散的代数解<sup>[36]</sup>。考虑到本文热传递的慢动态过程, 可将微分方程约束进行差分化处理, 此处以式(14)为例, 经过差分化处理转变为式(32)。

$$C_p m_p (T_p^{t+1} - T_p^t) = \frac{T_{p,o}^t - T_p^t}{R_{o,p}} + \frac{T_{p,i}^t - T_p^t}{R_{i,p}} + \frac{T_{p,a}^t - T_p^t}{R_{a,p}} + Q_{in}^t - Q_{out}^t \quad (32)$$

至此, 原模型被转换为一个典型的混合整数线性规划 (Mixed integer Linear Program, MILP) 模型。

### 3.2 交互迭代求解算法

为提高上述模型求解效率, 本文提出一种交互迭代算法求解热力侧和电力侧问题。迭代算法如图 8 所示。

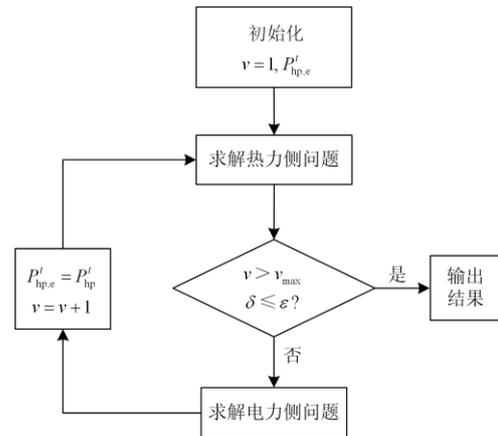


图 8 迭代算法流程图

Fig. 8 Flowchart of iteration algorithm

步骤 1: 初始化

输入参数为光照强度、电负荷、热负荷、建筑热力学参数和热泵功率预估值  $P_{hp,e}^t$ 。此外, 设置迭代次数  $v=1$ , 最大迭代次数  $v_{max}$  和误差  $\varepsilon$ 。

步骤 2: 求解热力侧问题

目标函数式(29)和约束条件式(3)一式(23)被转化为

$$\min \delta \quad (33)$$

$$\text{s.t. } \delta \geq \sum_t P^t \quad (34)$$

$$P' \geq 0 \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{hp}} P'_{hp,i} - P' = \sum_{i=1}^{N_{hp}} P'_{hp,e,i} \quad (36)$$

式(3)一式(23)

求解以上优化问题并得到目标函数值  $\delta$  和热泵功率  $P_{hp,i}$ 。

步骤 3: 检查终止条件

判据 1:  $v > v_{max}$  ;

判据 2:  $\delta \leq \varepsilon$  。

如判据 1 或判据 2 被满足, 终止迭代。否则,

令  $P'_{hp,i} = P'_{hp,e,i}$ , 转至步骤 4。

步骤 4: 求解电力侧问题

添加约束:

$$\sum_t \sum_{i=1}^{N_{hp}} P'_{hp,i} = \sum_t \sum_{i=1}^{N_{hp}} P'_{hp,e,i} \quad (37)$$

以式(1)一式(2)、式(24)一式(28)、式(37)为约束, 求解目标函数(31)。

步骤 5: 更新

令  $P'_{hp,i} = P'_{hp,e,i}$ , 转至步骤 2。

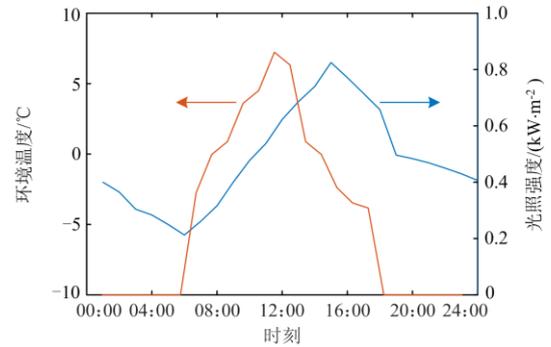
## 4 仿真分析

### 4.1 仿真条件

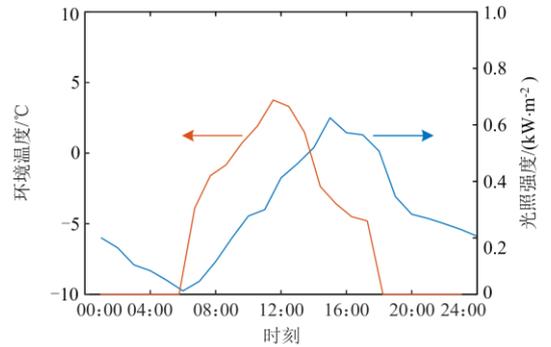
为验证本文所提调度策略的有效性, 本文以我国黑龙江省某地区并网型社区微网系统为例进行仿真。图 9 为该地区冬季晴天、阴天典型光照和气温分布<sup>[37]</sup>曲线。考虑该地区居民为 1 000 户, 室内热力模型参数详见文献[38]。

经过文献调研发现该地夏季气温处于人体舒适温度区间范围内, 故不设置制冷负荷, 设置冬季内晴朗天气和阴云天气两种供热负荷。该地区每年中有 5 个月存在制热需求。参考文献[39]拟定不同温度条件下电负荷和热负荷的相对比例以及 24 h 的分布情况。

根据美国可再生能源实验室开发的 System Advise Model 软件参数, 设置光伏电池在额定运行条件下的光照强度、环境温度和表面温度<sup>[40]</sup>分别为  $0.8 \text{ kW/m}^2$ 、 $20 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 标准测试条件下光伏电池温度和光照强度分别为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $1 \text{ kW/m}^2$ , 玻璃板透过率和太阳能吸收率均为 90%, 光伏最大跟踪点效率为 20%, 光伏电池额定容量为 2 kW, 光伏电池温度系数为  $-0.47\%$ 。集热器传热工质比热容和密度分别为  $4.2 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$  和  $10^3 \text{ kg/m}^3$ , 集热器额定容积为  $120 \text{ m}^3$ , 太阳能热水箱容积为  $90 \text{ m}^3$ , 贮热罐容积为  $31 \text{ m}^3$ , 高温保护温度为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 相邻容器



(a) 晴朗天气



(b) 阴云天气

图 9 环境温度、光照典型曲线

Fig. 9 Typical curve of ambient temperature and solar illumination

温差上限和下限分别为  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

本文仿真环境为 Intel Core i7-8750H, 16GB 内存, Windows11 64 位操作系统, 并在 Matlab R2016a 下的 Yalmip 工具箱建模调用 Gurobi 进行求解, 运行一次计算, 求解时间约为 50~60 s。

为凸显相变储能系统优越性, 作为对比引入空调制热满足建筑温控需求, 并让空调电热转换效率与相变储能系统所配置的热泵保持一致。设置以下 3 种策略。

策略 1: 建设光伏系统, 采用空调供暖。

策略 2: 建设光伏系统, 采用相变储能系统供暖。

策略 3: 建设含 RSTECM 和相变储能的联合系统, 采用该系统供暖。

根据天气情况, 将仿真验证分为两个场景。

场景 1: 晴朗场景。

场景 2: 多云到阴天场景。

### 4.2 仿真结果

#### 4.2.1 微网运行分析

##### 1) 晴朗天气场景

晴朗天气下, 微网光伏发电量充足, 3 种策略的仿真结果如图 10 所示。

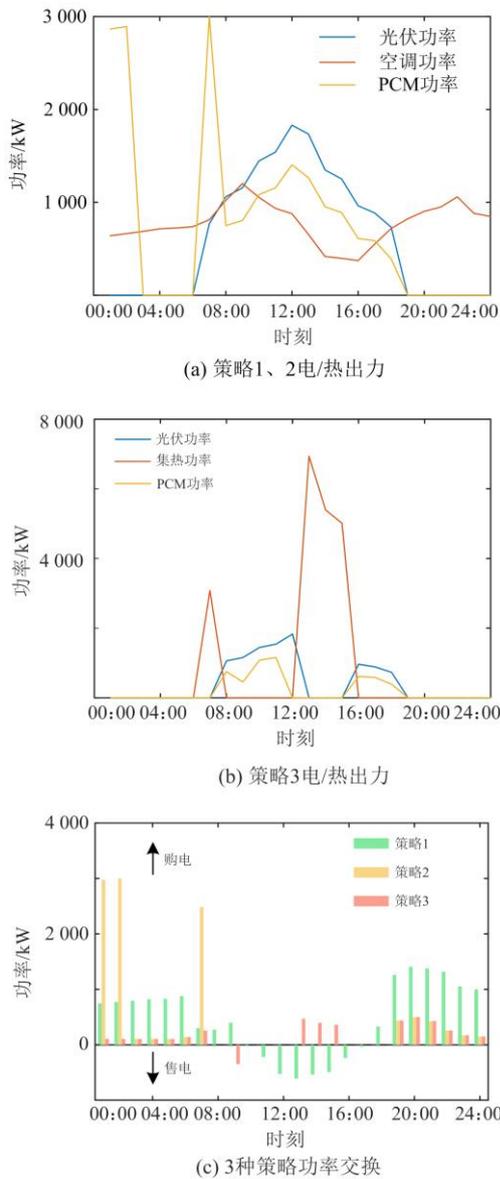


图 10 晴朗天气电-热出力 and 电力交换

Fig. 10 Electricity-thermal output and electricity exchange under sunny weather

由图 10 可以得出,策略 1 中的空调功率紧随室内热负荷变化情况。微网在午间光伏大发时, 富余能源以 0.08 元/kW·h 低价上网, 而在光伏出力不足时, 不得不以高价从外电网购进电力, 以满足社区电力侧和热力侧平衡。由此可见, 在现有建筑热力网模型下, 策略 1 由于仅依靠空调设备调节室温, 购电功率紧随电负荷和空调负荷的波动, 策略 1 中热负荷几乎是现制现用, 且调节能力不足, 无法在长时间尺度上就地规模化消纳富余能源。策略 2 为了应对热负荷的高峰, 相变储能系统不得不在早晨大量产热以应对社区热负荷需求, 此时联络线会出

现峰值功率。

策略 3 中的热电联供系统处于光伏状态时, 相变储能系统能够保持对较高光伏功率的密切跟踪, 即时消纳富余能源。当系统由光伏状态切换至集热状态时, 相变储能系统大量吸收并存储热能, 此时联络线仅传输少量功率以满足微网电力侧和热力侧需要, 与此同时, 相变储能系统释放热能满足制热需求, 实现了业主侧能源规模化就地消纳的愿景。策略 3 相较前两种策略, 联络线的交换功率更加平稳。

加装新型热电联供系统之后, 微网与外电网之间的交换功率峰值大幅下降, 其中策略 1 为 1405.3 kW, 策略 2 为 3000 kW, 策略 3 仅为 501.9 kW, 相较策略 1 和策略 2 分别减少了 64.3% 和 83.3%。从表 1 可以得出, 在购买电量上, 策略 3 为 4100 kW·h, 策略 1 为 13554 kW·h, 策略 2 为 10863 kW·h, 策略 3 相较策略 1 和策略 2 分别减少了 69.8% 和 62.3%。在余量上网方面, 策略 3 的微网余量上网为 348.43 kW·h, 相较策略 1 的 2691.7 kW·h, 减少了 87.1%, 新型热电联供系统的富余能源就地化消纳能力大幅增强。

表 1 晴朗天气 3 种策略的日运行费用

Table 1 Daily operating costs for 3 strategies

| 策略编号 | 购电/(kW·h)           |        |        | 售电/(kW·h) | 费用/元   |
|------|---------------------|--------|--------|-----------|--------|
|      | under sunny weather |        |        |           |        |
|      | 峰                   | 平      | 谷      |           |        |
| 1    | 5041.6              | 0      | 8512.6 | 2691.7    | 5503.4 |
| 2    | 1367.0              | 0      | 9495.6 | 0         | 3633.5 |
| 3    | 1367.0              | 1228.1 | 1505.8 | 348.42    | 1920.2 |

## 2) 阴天天气场景

阴天天气下, 富余能源不足, 微网消纳更多谷时段电能制热并储存于相变储能系统。阴天天气下微网用电负荷如图 11 所示。由图可知, 策略 1 的制热负荷仍然集中在峰时段, 并未发生明显的偏移。热电联供系统选择在电价相对便宜的谷时段补充能量。

在交换功率峰值上, 策略 1 为 1495.6 kW, 策略 2 为 3000 kW, 策略 3 仅为 501.9 kW, 相较策略 1 和策略 2 分别降低了 66.4% 和 83.3%。由表 2 可以得出, 在购买电量上, 策略 3 为 4827 kW·h, 策略 1 为 16053 kW·h, 策略 2 为 15041 kW·h, 策略 3 相较策略 1 和策略 2 分别减少了 69.9% 和 67.9%。在余量上网方面, 策略 1 的上网电量为 1012.3 kW·h, 策略 3 的上网电量为 82.2 kW·h, 相较策略 1 减少了 91.9%。

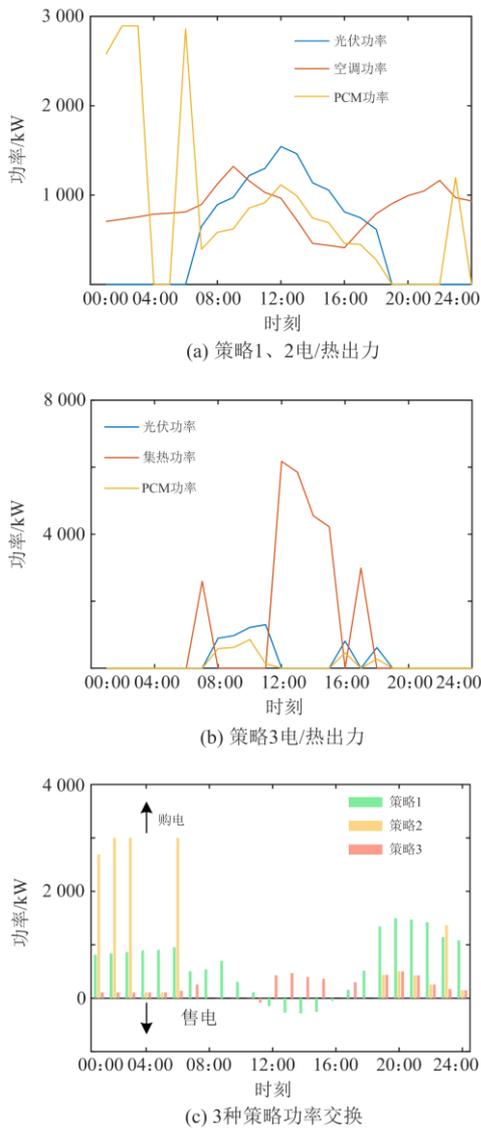


图 11 阴云天气电-热出力和电力交换

Fig. 11 Electricity-thermal output and electricity exchange under cloudy and overcast weather

表 2 阴云天气 3 种策略的日运行费用

Table 2 Daily operating costs for 3 strategies under cloudy and overcast weather

| 策略编号 | 购电/(kW·h) |         |          | 售电/(kW·h) | 费用/元    |
|------|-----------|---------|----------|-----------|---------|
|      | 峰         | 平       | 谷        |           |         |
| 1    | 6 484.5   | 157.4   | 9 411.5  | 1 012.3   | 6 909.7 |
| 2    | 1 367.0   | 0       | 13 674.0 | 0         | 4 844.4 |
| 3    | 1 794.2   | 1 527.2 | 1 505.8  | 82.3      | 2 370.5 |

4.2.2 经济性分析

本节考虑各类设备的投资成本，在上文各种运行策略日运行成本分析的基础上，进一步对三种策略的投资经济性展开对比分析。

年安装成本需考虑资金的贴现率，参照文献[41-42]的年平均安装费用和投资回收期(Payback Period, PBP)计算方法。本文将资金贴现率设置为5%，每套空调设备计0.5万元；每套相变储能系统单元计0.9万元<sup>[38]</sup>，其中相变材料为0.4万元，辅助热泵0.15万元，电风扇0.05万元，相变储能系统的建筑预制件为0.2万元，人工安装成本计0.1万元，翻转电机、热水罐和太阳能集热器批发成本分别为0.035万元、0.065万元和0.1万元。光伏设备改造成本取0.2万元较为合理。本文将翻转装置的后期维护成本设为0.1万元/年。

年制热时长为150天，其中晴朗和多云到阴天<sup>[43]</sup>分别占比60%、40%，3种策略的等值年成本如表3所示。较之策略1和策略2，策略3可分别节省52.69万元和17.26万元。策略3相较策略1和策略2的投资回收期分别为11.39年和11.59年，远低于相变储能系统30年以上的设计使用寿命，在经济性上具备明显优势。

表 3 3种策略的等值年成本

Table 3 Equivalent annual costs for 3 strategies

| 策略编号 | 投资成本/万元 | 等值年投资成本/万元 | 年运行成本/万元 | 等值年成本/万元 |
|------|---------|------------|----------|----------|
| 策略1  | 500     | 64.75      | 90.99    | 155.74   |
| 策略2  | 900     | 58.54      | 61.77    | 120.31   |
| 策略3  | 1 100   | 71.55      | 31.50    | 103.05   |

4.3 灵敏性分析

4.3.1 环境影响

对RSTECM的若干重要参数，如光照强度和环境温度进行灵敏性分析，分析结果如图12所示。计算结果表明，光照强度对发电成本的影响较大，这是因为光照强度会直接影响光伏发电效率和光伏发电产出；环境温度对运行成本影响相对较小，这是由于在严寒地区，气温波动不会给光伏效率和光伏产出造成显著差异。

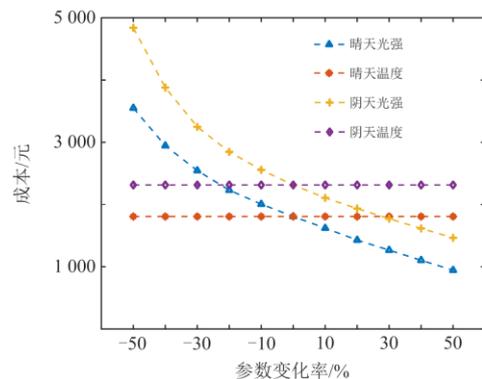


图 12 环境因子对运行成本的影响

Fig. 12 Impact of environmental factors on operating costs

### 4.3.2 电价影响

此处分析 RSTECM 运行成本随电价波动的影响, 如图 13 所示。由图可知, 随着电价上升, 微网运行成本也在上升, 其中, 阴天的运行成本对电价的变化更为敏感。

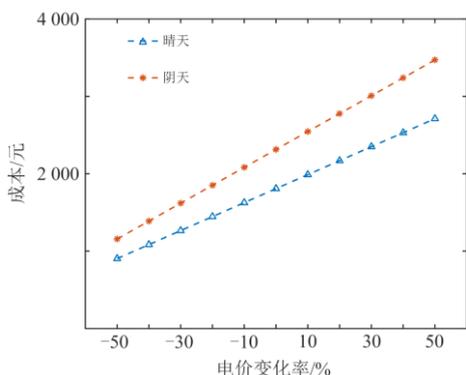


图 13 电价对运行成本的影响

Fig. 13 Impact of electricity price on operating costs

## 5 结论

本文建立 RSTECM 与相变储能系统联合运行模型, 提出一种光伏建筑一体化社区热电联供调度策略。通过理论与仿真分析得出如下结论。

1) 本文所提的新型热电联供系统与空调制热相比, 具有热电解耦、柔性可调等优越特性。在每个时刻优化热电联供系统光伏/集热状态可实现光伏的最大消纳, 提升能量利用率和社区微网的运行经济性。

2) 新型热电联供系统的投资回收期远小于相变储能系统的使用寿命, 具备较高的经济价值。

3) 差异化处理和热力侧-电力侧问题交互迭代算法, 能够高效求解优化模型。

### 参考文献

[1] 刘德旭, 刘艳, 潘永旗, 等. 基于可再生能源发电优先消纳的电力电量平衡模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1): 64-71.  
LIU Dexu, LIU Yan, PAN Yongqi, et al. Research on power balance model based on priority consumption of renewable energy power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 64-71.

[2] 卢操, 管霖, 陈恒安, 等. 考虑储能调度的可再生能源独立微电网电源规划[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 84-91.  
LU Cao, GUAN Lin, CHEN Heng'an, et al. Generation planning for renewable energy isolated micro-grid considering energy storage dispatching[J]. Electrical

Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 78-83.

[3] 李国武, 许健, 吉小鹏. 计及光伏的配电网多级无功联动协调优化[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8): 103-111.  
LI Guowu, XU Jian, JI Xiaopeng. Coordinated optimization of multi-level reactive power in the distribution network considering photovoltaic[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 103-111.

[4] 张家安, 王琨玥, 陈建, 等. 基于空间相关性的分布式光伏出力预测[J]. 电力建设, 2020, 41(3): 47-53.  
ZHANG Jia'an, WANG Kunyue, CHEN Jian, et al. Research on prediction of distributed photovoltaic output considering spatial relevance[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 47-53.

[5] 卢仁军, 李然, 王健, 等. 考虑需求侧响应的新能源接入下的配电网无功规划研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 46-51.  
LU Renjun, LI Ran, WANG Jian, et al. Reactive power planning of distribution network with renewable energy resource considering demand side response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 46-51.

[6] 王李龔, 许强, 黄开艺, 等. 计及新能源及负荷不确定性的多能微网系统两阶段随机规划方法[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 100-108.  
WANG Liyan, XU Qiang, HUANG Kaiyi, et al. A two-stage stochastic programming method for multi-energy microgrid system considering the uncertainty of new energy and load[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 100-108.

[7] 陈建华, 王磊, 巨云涛. 基于 Mean-shift 聚类的大规模新能源对电网线损影响评估方法[J]. 供用电, 2021, 38(2): 59-64, 76.  
CHEN Jianhua, WANG Lei, JU Yuntao. Evaluation method of large scale new energy impact on power grid line loss based on Mean-shift clustering[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(2): 59-64, 76.

[8] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.

[9] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.

[10] FUNDE N A, DHABU M M, DESHPANDE P S, et al. SF-OEAP: starvation-free optimal energy allocation policy in a smart distributed multimicrogrid system[J]. IEEE

- Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 4873-4883.
- [11] SU H I, GAMAL A E. Modeling and analysis of the role of energy storage for renewable integration: power balancing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4109-4117.
- [12] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.  
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [13] HANIF S, MASSIER T, GOOI H B, et al. Cost optimal integration of flexible buildings in congested distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2254-2266.
- [14] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.  
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [15] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.  
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.
- [16] ABUELNUOR A A A, OMARA A A M, MUSA H M H, et al. Experimental study on solar still desalination system integrated with solar collector and phase change material[C] // 2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), February 26-March 1, 2021, Khartoum, Sudan.
- [17] SKACH M, ARORA M, HSU C H, et al. Thermal time shifting: decreasing data center cooling costs with phase-change materials[J]. IEEE Internet Computing, 2017, 21(4): 34-43.
- [18] REN H, SHAO W, RAN L, et al. A phase change material integrated press pack power module with enhanced overcurrent capability for grid support a study on FRD[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 3956-3968.
- [19] 陈厚合, 李泽宁, 靳小龙, 等. 集成智能楼宇的主动配电网建模及优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6550-6562.  
CHEN Houhe, LI Zening, JIN Xiaolong, et al. Modeling and optimization of active distribution network with integrated smart buildings[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6550-6562.
- [20] 王永权, 张沛超, 姚垚. 聚合大规模空调负荷的信息物理建模与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6509-6520.  
WANG Yongquan, ZHANG Peichao, YAO Yao. Cyber-physical modeling and control method for aggregating large-scale ACLs[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6509-6520.
- [21] 王蓓蓓, 胡晓青, 顾伟扬, 等. 分层控制架构下大规模空调负荷参与调峰的分散式协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3514-3528.  
WANG Beibei, HU Xiaoqing, GU Weiyang, et al. Hierarchical control architecture and decentralized cooperative control strategy for large scale air conditioning load participating in peak load regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3514-3528.
- [22] 肖天颖, 裴玮, 陈乃仕, 等. 考虑空调削负荷能力不确定性的孤岛最大运行时长评估[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 4982-4994, 5280.  
XIAO Tianying, PEI Wei, CHEN Naishi, et al. Maximum operation duration assessment of isolated island considering the uncertainty of load reduction capability of air conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 4982-4994, 5280.
- [23] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 14-23.  
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 14-23.
- [24] LI N, ZHANG W, WANG L, et al. Experimental study on energy efficiency of heat-source tower heat pump units in winter condition[C] // 2011 Third International Conference on Measuring Technology & Mechatronics Automation, Shanghai, China.
- [25] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.  
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the

- coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 119-127.
- [26] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 76-83. SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 76-83.
- [27] 吴鸣, 骆钊, 季宇, 等. 基于模型预测控制的冷热电联供型微网动态优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(24): 7174-7184. WU Ming, LUO Zhao, JI Yu, et al. Optimal dynamic dispatch for combined cooling, heating and power microgrid based on model predictive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(24): 7174-7184.
- [28] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 1-8. LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 1-8.
- [29] SHCHUKINA E M, GRAHAM M, ZHENG Z, et al. Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(11).
- [30] ARC M, BILGIN F, NIETI S, et al. PCM integrated to external building walls: an optimization study on maximum activation of latent heat[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 165.
- [31] EPDF M. Heating and cooling with a heat pump[M]. Canada: Natural Resources, 2004.
- [32] LU Ning. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [33] LUO Fengji, DONG Zhaoyang, MENG Ke, et al. An operational planning framework for large-scale thermostatically controlled load dispatch[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(1): 217-227.
- [34] 国家发展改革委关于 2020 年光伏发电上网电价政策有关事项的通知[EB/OL]. [2020-03-31]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202004/t20200402\\_1225031.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202004/t20200402_1225031.html).
- [35] GENG G, AJJARAPU V, JIANG Q. A hybrid dynamic optimization approach for stability constrained optimal power flow[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5): 2138-2149.
- [36] 王孟夏, 韩学山, 杨朋朋, 等. 计及电热耦合的动态最优潮流模型与算法[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(3): 28-32. WANG Mengxia, HAN Xueshan, YANG Pengpeng, et al. Dynamic optimal power flow model considering electro-thermal coupling and its algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(3): 28-32.
- [37] 中国气象数据网综合实况[EB/OL]. <http://data.cma.cn/dataGis/static/gridgis/#/pcindex>.
- [38] WEI Fanrong, LI Yuanzheng, SUI Quan, et al. A novel thermal energy storage system in smart building based on phase change material[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 2846-2857.
- [39] 于波. 微网与储能系统容量优化规划[D]. 天津: 天津大学, 2012. YU Bo. Optimal planning of microgrid and energy storage system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [40] System Advisor Model[EB/OL]. <https://sam.nrel.gov/>.
- [41] 黄南天, 包佳瑞琦, 蔡国伟, 等. 多主体联合投资微电网源-储多策略有限理性决策演化博弈容量规划[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1212-1225, 1412. HUANG Nantian, BAO Jiaruiqi, CAI Guowei, et al. Multi-agent joint investment microgrid source-storage multi-strategy bounded rational decision evolution game capacity planning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1212-1225, 1412.
- [42] HUI Z, VITTAL V, HEYDT G T, et al. A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 1125-1133.
- [43] 游阳, 荆朝霞. 考虑电动汽车的车-站-路-网多主体联合优化[J]. *新能源汽车供能技术*, 2019, 3(1): 7-12. YOU Yang, JING Zhaoxia. Vehicle-station-road-network multi-agent joint optimization considering electric vehicles[J]. *Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles*, 2019, 3(1): 7-12.

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-11-08

作者简介:

潘帅琪(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源微网技术。E-mail: 1103516574@qq.com

(编辑 许威)