考虑点对点电能共享的智能楼宇群分布式优化调度

周 军1,李佳旺1,马鸿君2,姜德龙3,张 虹1

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012;

2. 国网河南省电力有限公司南阳供电公司,河南 南阳 473000;

3. 吉林化工学院 信息与控制工程学院,吉林 吉林 132022)

摘要:针对兼具电能生产和消费能力的智能楼宇,基于能源与信息双向流动的特性,提出一种以点对点(P2P) 电能共享为核心的智能楼宇群能量管理框架。对智能楼宇内部资源进行量化建模,同时针对楼宇内部的供 冷特性,考虑用冰蓄冷储能系统满足楼宇冷却需求,利用P2P电能共享机制提升系统运行灵活性和经济性, 并建立智能楼宇群日前经济调度优化模型;通过快速交替方向乘子法对所提模型进行分布式求解,得到智能 楼宇群P2P电能共享的最优策略。算例结果表明,所提模型可以有效降低楼宇群对外部能源的依赖,在保证 楼宇内用户舒适性的同时,提高系统运行的整体经济性以及对新能源的消纳水平。

关键词:智能楼宇群;点对点电能共享;冰蓄冷储能;分布式优化调度;快速交替方向乘子法

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110029

0 引言

近年来,电力市场的深入改革使市场交易更加 开放透明,衍生出多种新型利益主体^[1]。智能楼宇 内部聚合了大量可调度资源,其兼具电能生产和消 费能力,可自主参与市场运行^[2]。多栋智能楼宇的 用能方式具有良好的互补特性和交互关系,可以使 分布式能源就近消纳,发挥资源共享互济的优势^[3]。 因此,如何优化智能楼宇资源配置,实现楼宇间资源 共享,以提升系统整体运行的经济性和灵活性成为 亟待解决的问题。

目前,国内外学者对楼宇群的电能共享机制进 行了相关研究。文献[4]将多栋智能楼宇进行互联, 通过集群运营商对楼宇群进行统一协调控制管理, 在电能共享的基础上进行日前优化调度。文献[5] 以含高比例分布式能源的居民小区为研究对象,通 过智能小区售电商对楼宇间的电能共享进行管理交 易,以调度成本最小为目标建立日前优化调度模型。 文献[6]以智能园区代理商作为能量管理者,统一协 调园区智能楼宇间的电能共享。但上述文献所构建 的模型均需通过第三方进行集中调度,忽视了兼具 电能生产和消费能力的相关主体可直接参与电能交 易的特点。

由去中心化交易机制支撑的点对点P2P(Peerto-Peer)能量共享可以使智能楼宇群直接参与批发 或零售市场^[7],提高智能楼宇参与市场的主动性。

收稿日期:2021-05-30;修回日期:2021-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777027);吉林省教 育厅科学技术研究项目(JJKH20210093KJ)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777027) and the Scientific Research Project of Jilin Provincial Department of Education(JJKH20210093KJ) 文献[8]建立 P2P共享可再生能源和电能存储 EES (Electric Energy Storage)系统的社区楼宇优化模型, 并在不同电价策略下对各楼宇的调度成本进行分析。文献[9]以热电联产楼宇组成的楼宇群为研究 对象,综合考虑热电联产容量以及运行策略,对不同 类型楼宇组合间的 P2P 能量共享进行分析。文献 [10]提出在微电网用户间进行 P2P 电能共享的能源 供应链网络,在考虑热需求的情况下,以总成本最小 为目标进行能源分配。但上述文献只考虑了楼宇的 电能需求和热能需求,而忽视了楼宇的供冷需求,没 有对含冷电联供系统的楼宇中的冷负荷进行研究。

在智能楼宇群 P2P 电能共享的过程中会产生大 量的数据交换,加重了计算负担,且对用户信息隐私 安全造成威胁。分布式求解算法由于具有保护用户 隐私信息、降低计算负担和保证调度相对独立性等 方面的优势,可以很好地解决上述问题。文献[11] 将拉格朗日分解与次梯度法结合对产消者能量共享 问题进行求解,但次梯度法在收敛速度方面表现不 够理想,可能导致无界解。文献[12]利用分解协调 内点法对多区域最优潮流问题进行分布式求解,但 其需要将子问题的全部矩阵信息传递给上层中心, 过大的通信量严重降低了计算效率,且容易丢失信 息,导致无法收敛。文献[13]通过交替方向乘子法 ADMM(Alternating Direction Method of Multipliers) 对具有不同偏好的产消者之间的电能共享进行分布 式求解。ADMM 虽然收敛精度高,但为了保证收敛 精度通常要求迭代次数足够多,这导致收敛速度较 慢,同时该算法也存在对模型要求严格、算法设置困 难等问题。

综上所述,本文基于P2P电能共享机制建立智能楼宇群能量管理框架,并采用冰蓄冷储能IES

(Ice Energy Storage)系统满足楼宇的冷却需求。在 日前阶段,以总运行成本最低为目标建立智能楼宇 群优化调度模型。最后通过仿真算例验证所提模型 的可行性与有效性。

1 智能楼宇群能源管理框架

考虑一个由N栋智能楼宇组成的楼宇群,每 栋楼宇通过电力和通信网络相连接。根据电能和信息的双向流动特性,构建智能楼宇群能量管理框架如图1所示。各楼宇内包含屋顶光伏PV(Photo-Voltaic)和可控负荷CL(Controllable Load),部分楼宇 含有储能系统ESS(Energy Storage System),ESS包 括EES系统和IES系统。每栋楼宇配备能够控制内 部PV、ESS和CL资源的能量管理系统EMS(Energy Management System)和高级计量体系AMI(Advanced Metering Infrastructure),以实现P2P电能共享。



在日前阶段,各楼宇内EMS根据历史发、用电数据,预测该楼宇内PV出力和负荷需求,并将该楼宇期望共享的电能信息P2P传递给其他楼宇。 各楼宇基于零售电力供应商REP(Retail Electricity Provider)共享的电价信息和楼宇间的电能交易价格,综合其他楼宇期望共享的电能,确定从REP和 其他楼宇的购售、电计划,并将后者信息传递给其他 楼宇。各楼宇参考彼此的购售、电计划不断迭代更 新自身的计划直到满足楼宇群内所有楼宇的要求。 楼宇通过P2P电能共享机制直接参与电能交易,电 能需求不足时从REP处购电,电能富余时将电能售 给REP获取收益。

2 智能楼宇资源模型

本节对智能楼宇中的 IES 系统、EES 系统和 PV 这3种分布式资源进行建模,并考虑 CL(包括暖通空 调HVAC(Heating Ventilating and Air Conditioning) 负荷、可转移电器 SEA(Shiftable Electrical Appliance)负荷和灵活商业服务 FCS(Flexible Commercial Service)负荷)耗能所带来的效益,建立 CL 的用能效 用模型。

2.1 IES系统模型

IES系统利用电能将冷能存储于蓄冷介质中,并 且在需要时进行融冰释放冷能。楼宇 $n(n \in Y = \{1, 2, \dots, N\}, Y$ 为楼宇集合)内IES系统的模型为:

$$W_n^t = \beta W_n^{t-1} + (P_{\text{IES},n,c}^t \kappa_{\text{ice},n} - P_{\text{IES},n,d}^t / \eta_n^{\text{ex}}) \Delta t \qquad (1)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{IES},n,c}^{t} \leq P_{\text{IES},n,c}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{IES},n,d}^{t} \leq P_{\text{IES},n,d}^{\text{max}} \end{cases}$$
(2)
$$0 \leq W_{c}^{t} \leq W_{c}^{\text{max}} \end{cases}$$

式中:t为调度时段, $t \in \Gamma = \{1, 2, ..., T\}, \Gamma$ 为调度时 段集合, $T = T_d/\Delta t$ 为总调度时段数, T_d 为全天调度时 长, Δt 为调度步长; W'_n 为t时段楼宇n内IES系统的 蓄冷量; β 为冰存储效率; $P'_{\text{IES},n,c}$ 和 $P'_{\text{IES},n,d}$ 分别为t时 段楼宇n内IES系统制冰消耗的电功率和融冰释放 的冷功率; $\kappa_{\text{ice},n}$ 和 η_n^{ex} 分别为楼宇n内IES系统制冰 的性能系数和IES系统与楼宇之间交换的热效率; $P_{\text{IES},n,c}^{\text{max}}$ 和 $P_{\text{IES},n,d}^{\text{max}}$ 分别为楼宇n内IES系统的制冰消耗 电功率和融冰释放冷功率的上限; W_n^{max} 为楼宇n内 IES系统的最大存储容量。

2.2 EES系统模型

EES系统在电能富余时存储电能,在电能短缺时释放电能。与IES系统类似,其模型为:

$$S_n^t = S_n^{t-1} + \eta_n^c P_{c,n}^t \Delta t - P_{d,n}^t \Delta t / \eta_n^d$$
(3)

$$\begin{cases} 0 \leq P_{c,n}^{t} \leq P_{c,n}^{\max} \\ 0 \leq P_{d,n}^{t} \leq P_{d,n}^{\max} \\ S_{n}^{\min} \leq S_{n}^{t} \leq S_{n}^{\max} \\ S_{n}^{t} \geq S_{n}^{0} \end{cases}$$
(4)

式中: S'_n 为t时段楼宇n内 EES 系统的电能存储量; η^e_n 和 η^d_n 分别为楼宇n内 EES 系统充电和放电效率; $P'_{e,n}$ 和 $P'_{d,n}$ 分别为t时段楼宇n内 EES 系统充电和放电功 率; $P^{max}_{d,n}$ 分别为楼宇n内 EES 系统充电和放电 功率极限; S^{max}_n 和 S^{min}_n 分别为楼宇n内 EES 系统的储 能容量上限和下限; S^0_n 为楼宇n内 EES 系统的初始 电能存储量。式(4)保证了 EES 系统在运行过程中 不会过充 / 过放,以延长 EES 系统的使用寿命,此外 还保证了 S'_n 不低于 S^0_n ,以满足紧急需求。

2.3 PV 模型

每栋楼宇都装有PV,其所产生的电能除了供给 楼宇自身负荷外,还可以共享给其他楼宇以及出售 给REP。根据实际电能需求情况,允许对PV出力进 行削减,PV模型为:

$$P_{\text{PV},n}^{t} = P_{\text{PV},n}^{t,\max} - P_{\text{PV},n,\text{ab}}^{t}$$
(5)

$$\begin{cases} P_{\text{PV},n}^{\text{r,min}} \leqslant P_{\text{PV},n}^{\text{r}} \leqslant P_{\text{PV},n}^{\text{r,max}} \\ 0 \leqslant P_{\text{PV},n,ab}^{\text{r}} \leqslant \mu P_{\text{PV},n}^{\text{r,max}} \end{cases}$$
(6)

式中: $P_{PV,n}^{t}$ 为t时段楼宇n实际调度的PV出力; $P_{PV,n}^{t,max}$ 为t时段楼宇n的PV预测出力最大值; $P_{PV,n,ab}^{t}$ 为t时

段楼宇n的弃光量; $P_{PV,n}^{t,max}$ 和 $P_{PV,n}^{t,min}$ 分别为t时段楼宇n的 PV 实际出力上限和下限; μ 为最大允许弃光比例,本文取20%。

2.4 CL能效模型

本节通过建立CL的效用函数,表示智能楼宇用 户从CL消耗电能中获得的效用,度量用户的用电满 意度。

2.4.1 HVAC负荷

HVAC负荷是智能楼宇中的主要可控负荷之一,其消耗电能的目的是为智能楼宇内的用户带来 适宜的室内温度,装设HVAC的智能楼宇室内温度^[14]为:

$$T_{\text{in},n}^{t} = T_{\text{in},n}^{t-1} - \frac{\Delta t}{C_n R_n} \left(T_{\text{in},n}^{t-1} - T_{\text{out}}^{t} + \omega R_n P_{\text{ch},n}^{t} \Delta t \right) \quad (7)$$

式中: $T_{in,n}^{t}$ 为t时段楼宇n的室内温度; C_{n} 、 R_{n} 和 ω 为楼宇n内HVAC的运行参数; T_{out}^{t} 为t时段室外温度; $P_{ch,n}^{t}$ 为t时段楼宇n制冷所消耗的电能。

根据室内实际温度与参考温度之间的关系, HVAC负荷效用函数描述用户对HVAC负荷实际消 耗电能的满意度,可以表示为:

$$U_{n, \text{HVAC}} = M_n - \sum_{t=1}^{l} \gamma_n (T_{\text{in}, n}^t - T_{\text{ref}})^2$$
(8)

式中: $U_{n,HVAC}$ 为楼宇n内HVAC负荷的效用函数; M_n 为一个给定的正常数,其保证了在实际应用中效用为正值; γ_n 为量化系数; T_{ref} 为设定的参考温度。 2.4.2 SEA负荷

在含有 SEA 负荷的楼宇中,实际能耗与期望能 耗可能会产生偏差,影响用户用能体验。根据实际能 耗与期望能耗的关系,SEA 负荷效用函数描述用户对 SEA 负荷实际消耗电能的满意程度^[15],可表示为:

$$U_{n, \text{SEA}} = M_n - \sum_{t=1}^{I} \varphi_n (P_{\text{S}, n}^t \Delta t - P_{\text{ref}, n}^t \Delta t)^2$$
(9)

式中: $U_{n,SEA}$ 为楼宇n内SEA负荷的效用函数; φ_n 为 对负荷转移的敏感度; $P'_{s,n}$ 为t时段楼宇n内SEA负 荷消耗的电能; $P'_{ref,n}$ 为t时段楼宇n内SEA负荷的期 望能耗。

2.4.3 FCS负荷

在商业楼宇中一般存在FCS负荷,根据FCS负荷 消耗电能带来的经济效益,FCS负荷效用函数描述 用户对FCS负荷消耗电能的满意程度^[16],可表示为:

$$U_{n, \text{FCS}} = \sum_{t=1}^{T} \delta_n \ln \left(P_{\text{F}, n}^t \Delta t + 1 \right)$$
 (10)

式中: $U_{n,FCS}$ 为楼宇n内FCS负荷的效用函数; δ_n 为楼 宇n内FCS负荷的偏好系数; $P_{F,n}^{t}$ 为t时段楼宇n内 FCS负荷消耗的功率。

3 P2P电能共享模型

3.1 P2P 电能交易价格模型

本文所考虑智能楼宇间的电能共享是完全P2P

的,每栋楼宇都可以向其他楼宇出售或购买电能。 当2栋楼宇共享电能时,其电能交易价格由双方根 据供需关系以及与REP电能交易价格自行决定。

每栋楼宇的电能需求和供应情况由其净功率决 定,*t*时段楼宇*n*的净功率为:

$$P_{\text{net},n}^{t} = P_{n}^{t} - P_{\text{PV},n}^{t}$$
(11)

式中: $P_{net,n}^{t}$ 为t时段楼宇n的净功率; P_{n}^{t} 为t时段楼宇n的总功率消耗。

若t时段楼宇n的净功率 $P_{net,n}^{t}$ 为正值,则楼宇n向其他楼宇或REP购买电能,若t时段楼宇n的净功率 $P_{net,n}^{t}$ 为负值,则楼宇n可将富余电能出售给其他楼宇或REP,分别如式(12)和式(13)所示。

$$P_{d,n}^{t} = P_{net,n}^{t} = P_{n}^{t} - P_{PV,n}^{t}$$
(12)

$$P_{f,n}^{t} = -P_{net,n}^{t} = P_{PV,n}^{t} - P_{n}^{t}$$
(13)

式中: $P_{d,n}^{t}$ 和 $P_{f,n}^{t}$ 分别为t时段楼宇n的电能需求和供应量。

t时段楼宇n向楼宇m售电或购电时双方的电能供需比 $r_{n,m}^{i}$ 、 $r_{m,n}^{i}$ 分别为:

$$\begin{cases} r_{n,m}^{t} = \frac{P_{f,n}^{t}}{P_{d,m}^{t}} \\ r_{m,n}^{t} = \frac{P_{f,m}^{t}}{P_{d,n}^{t}} \end{cases}$$
(14)

根据P2P电能共享双方的供需关系以及与REP 的电能交易价格,可得到楼宇间的电能交易价格,影

$$\lambda_{n,m}^{\mathrm{b},t} = \begin{cases} \frac{\lambda_{\mathrm{b}}^{t} \lambda_{\mathrm{s}}^{t}}{(\lambda_{\mathrm{b}}^{t} - \lambda_{\mathrm{s}}^{t}) r_{m,n}^{t} + \lambda_{\mathrm{s}}^{t}} & 0 < r_{m,n}^{t} < 1\\ \lambda^{t} & r^{t} \ge 1 \end{cases}$$
(15)

$$\lambda_{n,m}^{s,t} = \begin{cases} \frac{\lambda_{b}^{t} \lambda_{s}^{t}}{(\lambda_{b}^{t} - \lambda_{s}^{t}) r_{n,m}^{t} + \lambda_{s}^{t}} & 0 < r_{n,m}^{t} < 1\\ \lambda_{s}^{t} & r_{n,m}^{t} \ge 1 \end{cases}$$
(16)

式中: $\lambda_{n,m}^{b,t}$ 和 $\lambda_{n,m}^{s,t}$ 分别为t时段楼宇n向楼宇m的购 电和售电价格; λ_{b}^{t} 和 λ_{s}^{t} 分别为t时段楼宇群与REP 进行交易时的购电和售电价格。

3.2 P2P电能共享运行约束

智能楼宇群内各楼宇间的电能共享价格应限制 在与REP电能交易的售电价格与购电价格之间,以 促进当地PV的就地消纳,电能共享价格应满足以下 约束:

$$\begin{cases} \lambda_{s}^{t} \leq \lambda_{n,m}^{b,t} \leq \lambda_{b}^{t} \\ \lambda_{s}^{t} \leq \lambda_{n,m}^{s,t} \leq \lambda_{b}^{t} \end{cases}$$
(17)

楼宇间进行电能共享时,共享的能量要满足线路容量约束。在同一时段,2栋楼宇之间购、售电不能同时发生,应满足如下能量传输约束:

式中: $P_{n,m}^{b,t}$ 和 $P_{n,m}^{s,t}$ 分别为t时段楼宇n向楼宇m的购 电和售电量; $P_{n,m,max}^{b,t}$ 为楼宇n与楼宇m之间线路能够 承受的最大传输功率; $Z_{n,m}^{t,line}$ 为0-1变量,表征楼宇n的购/售电状态,取值为1时表示楼宇n向楼宇m购 电,为0时表示楼宇n向楼宇m售电。

此外,楼宇间进行 P2P 电能共享时还必须满足 以下能量耦合约束:

$$\begin{cases} P_{n,m}^{b,t} = P_{m,n}^{s,t} \\ P_{n,m}^{s,t} = P_{m,n}^{b,t} \end{cases}$$
(19)

4 智能楼宇群优化调度模型及求解方法

4.1 目标函数

本文考虑智能楼宇间 P2P 电能共享,对各类资 源进行协调调度,以智能楼宇群总运行成本最低为 目标,建立包括电能交易成本、设备运维成本、弃光 惩罚成本以及 CL 用能效用的日前经济调度模型,优 化目标为:

$$\min F = \sum_{n=1}^{N} F_n^1 = \sum_{n=1}^{N} \left(C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 - U_n(P_{cl,n}) \right) \quad (20)$$

式中:F为智能楼宇群总运行成本; F_n^1 为楼宇n的运 行成本; C_n^1 为楼宇n的电能交易成本; C_n^2 为楼宇n的 设备运维成本; C_n^3 为楼宇n的弃光惩罚成本; $U_n(P_{cl,n})$ 为楼宇n内的 CL 用能效用, $P_{cl,n}$ 为楼宇n内 CL 消耗 的电能。

1)电能交易成本。

楼宇n的电能交易成本包括楼宇n与REP的电能交易成本 C_n^{REP} 以及与其他楼宇P2P电能共享成本 C_n^{REP} ,即:

$$C_n^1 = C_n^{\text{REP}} + C_n^{\text{ES}} \tag{21}$$

$$C_n^{\text{REP}} = \sum_{t=1}^{T} \left[(\lambda_b^t + \alpha^t) P_{b,n}^t \Delta t - \lambda_s^t P_{s,n}^t \Delta t \right]$$
(22)

$$C_n^{\text{ES}} = \sum_{m \in Y_n} \sum_{t=1}^T \left(\lambda_{n,m}^{\text{b},t} P_{n,m}^{\text{b},t} \Delta t - \lambda_{n,m}^{\text{s},t} P_{n,m}^{\text{s},t} \Delta t \right)$$
(23)

式中: $P_{b,n}^{t}$ 和 $P_{s,n}^{t}$ 分别为t时段楼宇n与REP进行电能 交易时的电能需求和供应量; α^{t} 为t时段碳排放附 加税。

2)设备运维成本。

楼宇n的设备运维成本包括IES设备运维成本 C_n^{IES} 、EES设备运维成本 C_n^{EES} 以及PV设备运维成本 $C_n^{\text{PV,op}}$,即:

$$C_n^2 = C_n^{\text{IES}} + C_n^{\text{EES}} + C_n^{\text{PV, op}}$$
(24)

$$\begin{cases} C_n^{\text{IES}} = \sum_{t=1}^{T} K_n^{\text{IES}} P_{\text{IES},n}^t \Delta t \\ C_n^{\text{EES}} = \sum_{t=1}^{T} K_n^{\text{EES}} P_{\text{EES},n}^t \Delta t \\ C_n^{\text{PV, op}} = \sum_{t=1}^{T} K_n^{\text{PV}} P_{\text{PV, n}}^t \Delta t \end{cases}$$
(25)

式中: K_n^{IES} 、 K_n^{EES} 和 K_n^{PV} 分别为楼宇n内 IES、EES和PV 设备单位运维成本; $P_{\text{IES},n}^t$ 和 $P_{\text{EES},n}^t$ 分别为t时段楼宇n内 IES和EES设备的出力值。

3) 弃光惩罚成本。

为了提高PV的消纳水平,对弃光进行惩罚,即:

$$C_{n}^{3} = \sum_{t=1}^{r} C_{ab} P_{PV,n,ab}^{t} \Delta t$$
 (26)

式中: Cab 为单位弃光惩罚成本。

4)CL用能效用。

$$U_n(P_{\rm cl,n}) = U_{n,\,\rm HVAC} + U_{n,\,\rm SEA} + U_{n,\,\rm FCS}$$
 (27)

4.2 约束条件

1)智能楼宇功率平衡约束。

在调度过程中要保证楼宇n内的功率平衡,在 忽略网络损耗的情况下要满足以下约束:

$$P_{\text{PV,}n}^{t} + P_{\text{d,}n}^{t} + P_{\text{IES,}n,\text{d}}^{t} / \kappa_{\text{r},n} + P_{\text{b,}n}^{t} + \sum_{m \in Y \setminus n} P_{n,m}^{\text{b},t} = P_{\text{ch,}n}^{t} + P_{\text{S},n}^{t} + P_{\text{F},n}^{t} + P_{\text{c},n}^{t} + P_{\text{IES,}n,\text{c}}^{t} + P_{1,n}^{t} + P_{\text{s},n}^{t} + \sum_{m \in Y \setminus n} P_{n,m}^{\text{s},t}$$
(28)

式中: $\kappa_{r,n}$ 为楼宇n内HVAC负荷提供冷却的性能系数; $P_{1,n}^{t}$ 为t时段楼宇n的基本电力需求(照明等)。

2)与REP电能交互约束。

楼宇n与REP电能交互功率应满足以下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\mathbf{b},n}^{t} \leq P_{\mathbf{b},n}^{\max} \\ 0 \leq P_{\mathbf{s},n}^{t} \leq P_{\mathbf{s},n}^{\max} \end{cases}$$
(29)

式中: *P*^{max}_{b,n} 与 *P*^{max}_{s,n} 分别为楼宇 *n* 与 REP 进行电能交易 购电和售电功率的上限。

3)CL功耗约束。

为确保楼宇内CL正常运行,应保证满足如下运 行约束:

$$\begin{cases} P_{\text{ch},n}^{\min} \leq P_{\text{ch},n}^{t} \leq P_{\text{ch},n}^{\max} \\ P_{\text{F},n}^{\min} \leq P_{\text{F},n}^{t} \leq P_{\text{F},n}^{\max} \\ P_{\text{S},n}^{\min} \leq P_{\text{S},n}^{t} \leq P_{\text{S},n}^{\max} \\ p_{\text{S},n}^{\min} \leq P_{\text{S},n}^{t} \leq P_{\text{S},n}^{\max} \end{cases}$$
(30)

式中: $P_{ch,n}^{max}$ 和 $P_{F,n}^{min}$ 分别为楼宇n内HVAC负荷用能的 上限和下限; $P_{F,n}^{max}$ 和 $P_{F,n}^{min}$ 分别为楼宇n内FCS保持正 常运行所能消耗功率的上限和下限; $P_{S,n}^{max}$ 和 $P_{S,n}^{min}$ 分别 为楼宇n内SEA消耗功率的上限和下限; D_n 为楼宇n在调度周期内必须满足的SEA负荷电能需求。

4)室内温度约束。

下限。

为了保证调度周期内用户的舒适性,楼宇室内 温度必须保持在可接受范围内,应满足如下约束:

$$T_{\text{in},n}^{\min} \leq T_{\text{in},n}^{t} \leq T_{\text{in},n}^{\max}$$
(31)
式中: $T_{\text{in},n}^{\max}$ 和 $T_{\text{in},n}^{\min}$ 分别为楼宇 n 室内温度的上限和

4.3 基于快速 ADMM 的分布式调度模型和求解

快速 ADMM 是利用加速梯度法对 ADMM 进行 改进^[17],通过将问题分解为多个子问题进行分布式 迭代求解,其只需交互少量信息即可实现系统全局 最优的目标。根据标准 ADMM 基本原理^[18],可将本 文的优化问题写为:

$$\begin{cases} \min \sum_{n=1}^{N} F_{n}^{1} \\ \text{s.t.} \quad \boldsymbol{A} [\boldsymbol{x}_{1}, \cdots, \boldsymbol{x}_{n}, \cdots, \boldsymbol{x}_{N}] = \boldsymbol{B} \quad n \in \boldsymbol{Y} \\ \boldsymbol{x}_{n} \in \boldsymbol{\chi}_{n} \quad n \in \boldsymbol{Y} \end{cases}$$
(32)

式中: $x_n = [x_n^{bs}, P_{b,n}^t, P_{s,n}^t, P_{d,n}^t, P_{d,n}^t, P_{S,n}^t, P_{F,n}^t, P_{PV,n}^t,$ $P_{PV,n,ab}^t, P_{IES,n,c}^t, P_{IES,n,d}^t]^T$ 为楼宇 n 的决策变量, $x_n^{bs} = [P_{n,m}^{b,t}, P_{n,m}^{s,t}]^T$ 为楼宇 n 与其他楼宇的 P2P 共享电能; A 为系数矩阵; B 为参数矩阵; χ_n 为由约束式(2)、(4)、 (6)、(18)、(28)—(30)构成的楼宇 n 的策略可行域。 式(32)约束条件中第1个公式为所有等式约束, 第2 个公式为楼宇 n 内部约束。采用标准 ADMM 进行分 布式求解,引入辅助变量 z_n :

 $\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}} - \boldsymbol{z}_{n} = 0 \quad n \in Y$ (33)

则其增广拉格朗日函数为:

$$L_{\rho}(\boldsymbol{x}_{n}, \boldsymbol{z}_{n}, \boldsymbol{\sigma}_{n}) = \sum_{n \in Y} \left\{ F_{n}^{1}(\boldsymbol{x}_{n}) + g(\boldsymbol{z}_{n}) + \sum_{t \in \Gamma} \left[\boldsymbol{\sigma}_{n}^{T}(\boldsymbol{x}_{n}^{\text{bs}} - \boldsymbol{z}_{n}) + \frac{\boldsymbol{\rho}}{2} \left\| \boldsymbol{x}_{n}^{\text{bs}} - \boldsymbol{z}_{n} \right\|_{2}^{2} \right\}$$
(34)

式中: σ_n 为与约束式(33)对应的对偶变量; $g(z_n)$ 为指示函数,变量 z_n 满足可行域时 $g(z_n)$ =0,不满足可行域时 $g(z_n)$ =∞; ρ 为惩罚参数。

由此,将原问题分解为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{n}^{k+1} = \operatorname*{argmin}_{\boldsymbol{x}} \left\{ F_{n}^{1}(\boldsymbol{x}_{n}) + \sum_{i \in \Gamma} \left[(\boldsymbol{\sigma}_{n}^{k})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}} - \boldsymbol{z}_{n}^{k}) + \frac{\boldsymbol{\rho}}{2} \| \boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}} - \boldsymbol{z}_{n}^{k} \|_{2}^{2} \right] \right\} \\ z_{n}^{k+1} = \operatorname*{argmin}_{\boldsymbol{z}} \left\{ g(\boldsymbol{z}_{n}) + \sum_{i \in \Gamma} \left[(\boldsymbol{\sigma}_{n}^{k})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs},k+1} - \boldsymbol{z}_{n}) + \frac{\boldsymbol{\rho}}{2} \| \boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs},k+1} - \boldsymbol{z}_{n} \|_{2}^{2} \right] \right\} \\ \boldsymbol{\sigma}_{n}^{k+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n}^{k} + \boldsymbol{\rho}(\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs},k+1} - \boldsymbol{z}_{n}^{k+1}) \end{cases}$$
(35)

式中:带上标"k"的变量表示相应第 k 次迭代的变量; argmin 表示使目标函数达到最小值时变量的取值。

标准 ADMM 的计算速度有限,不利于分布式优 化求解的应用,因此,本文采用加速梯度法对标准 ADMM 进行改进,以进一步提高收敛速度。

首先,对式(35)中第1个公式等号右边的一次 项和二次项进行完全公式处理得到:

$$(\boldsymbol{\sigma}_{n}^{k})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}}-\boldsymbol{z}_{n}^{k})+\frac{\rho}{2}\left\|\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}}-\boldsymbol{z}_{n}^{k}\right\|_{2}^{2}=\frac{\rho}{2}\left\|\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}}-\boldsymbol{z}_{n}^{k}+\frac{1}{\rho}\boldsymbol{\sigma}_{n}^{k}\right\|_{2}^{2}-\frac{1}{2\rho}\left\|\boldsymbol{\sigma}_{n}^{k}\right\|_{2}^{2}$$
(36)

由于式(36)中等号右边 $\frac{1}{2\rho} \|\boldsymbol{\sigma}_{n}^{k}\|_{2}^{2}$ 为定值,在优 化过程中可忽略。同理,对式(35)中第2个公式等 号右边的一次项和二次项进行处理,并令 $\boldsymbol{v}_{n}^{k} = \frac{1}{\rho}\boldsymbol{\sigma}_{n}^{k}$,则式(35)可转化为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{n}^{k+1} = \operatorname*{argmin}_{\boldsymbol{x}} \left(F_{n}^{1}(\boldsymbol{x}_{n}) + \sum_{i \in I} \frac{\rho}{2} \left\| \boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}} - \boldsymbol{z}_{n}^{k} + \boldsymbol{v}_{n}^{k} \right\|_{2}^{2} \right) \\ \boldsymbol{z}_{n}^{k+1} = \operatorname*{argmin}_{\boldsymbol{z}} \left(g(\boldsymbol{z}_{n}) + \sum_{i \in I} \frac{\rho}{2} \left\| \boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}, k+1} - \boldsymbol{z}_{n} + \boldsymbol{v}_{n}^{k} \right\|_{2}^{2} \right) \\ \boldsymbol{v}_{n}^{k+1} = \boldsymbol{v}_{n}^{k} + (\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{bs}, k+1} - \boldsymbol{z}_{n}^{k+1}) \end{cases}$$
(37)

用加速梯度法更新对偶向量与下一次迭代的参考值:

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{n}^{k} = \hat{\boldsymbol{v}}_{n}^{k} + (\boldsymbol{x}_{n}^{\text{bs},k+1} - \boldsymbol{z}_{n}^{k+1}) \\ \boldsymbol{\theta}_{n}^{k+1} = \frac{1 + \sqrt{1 + (\boldsymbol{\theta}_{n}^{k})^{2}}}{2} \\ \hat{\boldsymbol{v}}_{n}^{k+1} = \boldsymbol{v}_{n}^{k} + \frac{\boldsymbol{\theta}_{n}^{k} - 1}{\boldsymbol{\theta}_{n}^{k+1}} (\boldsymbol{v}_{n}^{k} - \boldsymbol{v}_{n}^{k-1}) \\ \hat{\boldsymbol{z}}_{n}^{k+1} = \boldsymbol{z}_{n}^{k} + \frac{\boldsymbol{\theta}_{n}^{k} - 1}{\boldsymbol{\theta}_{n}^{k+1}} (\boldsymbol{z}_{n}^{k} - \boldsymbol{z}_{n}^{k-1}) \end{cases}$$
(38)

式中:带符号" ^ "的变量表示将原变量通过加速梯 度法更新后得到的对应新变量。

由此,式(37)的第1和第2个公式变为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{n}^{k+1} = \operatorname*{argmin}_{\mathbf{x}} \left(F_{n}^{1}(\mathbf{x}_{n}) + \sum_{i \in \Gamma} \frac{\rho}{2} \left\| \mathbf{x}_{n}^{\mathrm{bs}} - \hat{\mathbf{z}}_{n}^{k+1} + \hat{\mathbf{v}}_{n}^{k} \right\|_{2}^{2} \right) \\ z_{n}^{k+1} = \operatorname*{argmin}_{\mathbf{z}} \left(g(\mathbf{z}_{n}) + \sum_{i \in \Gamma} \frac{\rho}{2} \left\| \mathbf{x}_{n}^{\mathrm{bs},k+1} - \mathbf{z}_{n} + \hat{\mathbf{v}}_{n}^{k} \right\|_{2}^{2} \right) \end{cases}$$
(39)

因此,利用加速梯度法对标准 ADMM 进行改进 得到的快速 ADMM 的求解公式为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{n}^{k+1} = \operatorname*{argmin}_{\boldsymbol{x}} \left(F_{n}^{1}(\boldsymbol{x}_{n}) + \sum_{i \in I^{*}} \frac{\rho}{2} \left\| \boldsymbol{x}_{n}^{bs} - \hat{\boldsymbol{z}}_{n}^{k+1} + \hat{\boldsymbol{v}}_{n}^{k} \right\|_{2}^{2} \right) \\ z_{n}^{k+1} = \operatorname*{argmin}_{\boldsymbol{z}} \left(g(\boldsymbol{z}_{n}) + \sum_{i \in I^{*}} \frac{\rho}{2} \left\| \boldsymbol{x}_{n}^{bs,k+1} - \boldsymbol{z}_{n} + \hat{\boldsymbol{v}}_{n}^{k} \right\|_{2}^{2} \right) \\ \boldsymbol{v}_{n}^{k} = \hat{\boldsymbol{v}}_{n}^{k} + (\boldsymbol{x}_{n}^{bs,k+1} - \boldsymbol{z}_{n}^{k+1}) \\ \theta_{n}^{k+1} = \frac{1 + \sqrt{1 + (\theta_{n}^{k})^{2}}}{2} \\ \hat{\boldsymbol{v}}_{n}^{k+1} = \boldsymbol{v}_{n}^{k} + \frac{\theta_{n}^{k} - 1}{\theta_{n}^{k+1}} (\boldsymbol{v}_{n}^{k} - \boldsymbol{v}_{n}^{k-1}) \\ \hat{\boldsymbol{z}}_{n}^{k+1} = \boldsymbol{z}_{n}^{k} + \frac{\theta_{n}^{k} - 1}{\theta_{n}^{k+1}} (\boldsymbol{z}_{n}^{k} - \boldsymbol{z}_{n}^{k-1}) \end{cases}$$
(40)

以原始残差 r^* 作为收敛判据,取收敛精度为 ε ,

当式(41)所示约束成立时,算法收敛并输出最优解。

$$\left|\boldsymbol{r}^{k}\right|_{2}^{2} = \sum_{n \in Y} \sum_{i \in \Gamma} \left\|\boldsymbol{x}_{n}^{\text{bs},k+1} - \boldsymbol{z}_{n}^{k+1}\right\|_{2}^{2} \leq \varepsilon$$
(41)

采用快速 ADMM 求解智能楼宇群日前分布式 优化调度的计算步骤为:

1)在日前阶段 REP 发布日前电价后,各楼宇初 始化参数,将自身的电能共享信息 x^{1,6,1}分享给其他 楼宇;

2)各楼宇通过式(40)更新 x_n^{k+1} ,并将更新后的 $x_n^{bs,k+1}$ 分享给其他楼宇;

3)各楼宇接收到其他楼宇更新后的电能共享信息后,通过式(40)更新 z_n^{k+1} ,直至所有楼宇完成一次 z_n^{k+1} 的更新;

4)各楼宇通过式(40)更新 \hat{v}_{n}^{k+1} ;

5)重复步骤2)--4)直至满足式(41)。

在上述过程中,各楼宇只需与其他楼宇交换电 能共享信息,而无需分享PV、储能设备和负荷的相 关数据,因此可以对各楼宇进行独立优化,保护其隐 私信息安全。

5 算例分析

5.1 参数设置

本文考虑的楼宇群包含4栋智能楼宇,即N=4; 调度周期为08:00—18:00;调度步长为1h。4栋楼 宇均配备PV,楼宇1、楼宇2和楼宇4装设HVAC,楼 宇3含有SEA,楼宇4存在FCS负荷。IES系统、EES 系统以及PV的设备单位运维成本分别为0.0031、 0.01、0.0036\$/kW;弃光惩罚成本为0.2607\$/kW; 碳排放附加税为0.02\$/(kW·h)。电价数据参考文 献[19]。各楼宇日负荷曲线如附录A图A1所示^[20]。 PV出力数据来源于我国南方电网示范工程的实际 数据,PV出力曲线如附录A图A2所示。各楼宇CL 用能效用的相关参数见附录A表A1,效用函数中 M_n =12。IES系统和EES系统参数见附录A表A2。 算法参数 ρ =0.03, ε =0.02,模型在MATLAB仿真平台 上运行,楼宇群优化子模型采用CPLEX进行求解。

为验证所提模型的可行性与有效性,设置以下 3个算例进行验证:算例1,楼宇间不考虑P2P电能 共享,楼宇4内配备有EES系统;算例2,楼宇间考虑 P2P电能共享,楼宇4内配备有EES系统;算例3,楼 宇间考虑P2P电能共享,楼宇4内配备有IES系统。

5.2 仿真结果及讨论

5.2.1 P2P电能共享结果

附录A图A3(a)—(c)分别给出了算例1—3中 各楼宇与REP的电能交易情况。由图A3(a)可知, 楼宇2在调度时段内共向REP售电698.14 kW·h,而 楼宇4共从REP购电1206.78 kW·h,由于楼宇间不 考虑P2P电能共享,因此各楼宇与REP电能交易差 别较大,楼宇群的总净负荷需求波动较大。由图 A3 (b)、(c)可知:楼宇群内部各主体之间进行 P2P 电能 交易,在08:00—10:00楼宇群需从 REP 购买电能以 满足电能需求,而在10:00—18:00楼宇群内部实现 了电能供需平衡,无需与外部进行电能交易,可见, 本文所提出的 P2P 电能共享策略可有效降低楼宇 群对外部能源的依赖;相较于算例2,算例3 中楼宇4 在 08:00—10:00 从 REP 处购电减少了 29.48 kW·h, 这说明针对楼宇供冷特性,用 IES 系统满足楼宇内 冷却需求可进一步降低楼宇群的电能需求。

算例2和算例3中智能楼宇群楼宇间的P2P电 能共享情况如图2所示,图中两楼宇间的共享电能 为正值表示前者从后者购电,为负值表示前者向后 者售电。由图2(a)可知,在算例2中楼宇间的电能 交易主要发生在楼宇4与其他楼宇之间,楼宇1-3 分别向楼宇4售电236.71、612.89、183.57 kW·h,这 是由于楼宇4本身电能需求较高,且配置了EES系



图 2 算例 2 和算例 3 中智能楼宇群楼宇间 P2P 电能共享情况



统,其会在楼宇群总能源富余时段从其他楼宇购电 并进行储存,并在后续楼宇群能源不足时,通过EES 系统为楼宇群提供能源。由图2(b)可知:算例3中 虽然采用设备运维成本较低的IES系统取代EES系 统,但并未改变各楼宇间的电能供需关系,因此结果 与算例2大致相同,这说明楼宇间电能交易情况取 决于供需关系;算例3中楼宇4购置富余电能后以冷 能形式存储在IES系统中,在楼宇群能源不足时, IES系统通过融冰供冷满足楼宇4自身冷却需求,降 低楼宇群的电能需求。

5.2.2 经济性分析

各算例中智能楼宇群的运行成本如表1所示, 表中负值表示获取的收益。可以看出:算例2和 算例3中的楼宇群运行成本较算例1分别降低了 \$81.12和\$91.91,P2P电能共享策略优先考虑在楼 宇群内部进行电能交易,减少了楼宇群与REP的电 能交易,这在很大程度上降低了楼宇群与REP的电 能交易成本,且通过P2P电能共享提高了楼宇群的 CL总用能效用,降低了楼宇群运行成本,提高了楼 宇群内用户的总体用电满意度;每栋楼宇的运行成 本也均有所降低,这说明P2P电能共享策略在提高 楼宇群整体经济性的同时,也保证了单栋楼宇的经 济效益;与算例2相比,算例3中采用设备运维成本 较低的 IES系统满足楼宇4自身的冷却需求,使楼 宇群的运行成本降低了\$10.79,进一步提高了楼宇 群运行经济性。

表1 各算例中智能楼宇群运行成本

Table 1 Operation cost of smart building clusters under each case

算例	楼宇	与REP的电能	楼宇间 P2P 电能	CL用能	运行成
		交易成本 / \$	共享成本 / \$	效用 / \$	本/\$
1	1	-5.64	—	11.56	-6.95
	2	-60.69	—	11.95	-49.62
	3	13.96	—	11.87	14.47
	4	146.37	—	69.64	98.83
	楼宇群	94.00	—	105.02	56.73
2	1	7.62	-17.50	11.58	-16.86
	2	5.33	-71.28	11.95	-65.95
	3	8.13	-1.30	6.01	7.05
	4	23.08	90.08	82.32	51.37
	楼宇群	44.16	0	111.86	-24.39
3	1	7.62	-17.50	11.58	-16.86
	2	5.33	-71.28	11.95	-65.95
	3	8.13	-1.30	6.01	7.05
	4	20.24	90.08	82.76	40.58
	楼宇群	41.32	0	112.30	-35.18

5.2.3 PV 功率利用情况

各算例中PV功率的利用情况如图3所示。算例1中PV功率只能通过楼宇内部使用以及出售给 REP这2种方式进行消纳,但是由于与REP电能交 易存在限制,因此存在一定的弃光量;而算例2和算例3中P2P电能共享为楼宇PV功率提供了新的消纳途径,因此这2个算例中的PV功率利用率高于算例1。



Fig.3 Utilization condition of PV power

5.2.4 热舒适性分析

图 4 为需要考虑热舒适性的智能楼宇室内温 度情况。在多数时段,由于楼宇1与楼宇2的PV发 电量充足,楼宇室内实际温度接近参考温度,保证 了室内热舒适性;而在PV发电量不足的少数时段 (08:00—12:00),则需要适当牺牲舒适性来节能,这 导致楼宇室内实际温度高出参考温度0.1~0.5℃。 算例2和算例3中楼宇4的室内实际温度明显低于 算例1,这是由于算例1中楼宇4对外部的能源需 求较大,不得不通过升高室内温度来节能,尤其在 08:00—14:00时段更为明显,而算例2和算例3中 P2P电能共享机制使得楼宇4中ESS可以充分发挥作 用,灵活调节室温,使室内实际温度更接近参考温度。



图4 装有HVAC的楼宇室内温度

Fig.4 Indoor temperature of buildings with HVAC

5.2.5 CL用能情况

附录A图A4—A8给出了3个算例中各楼宇CL

的用能情况。由图可知:3个算例中楼宇1和楼宇2 的电能需求以及室内温度基本相同,因此HVAC电 能消耗基本相同;在P2P电能共享机制下,楼宇4配 备的ESS可以满足部分冷负荷需求,有效降低了 HVAC电能消耗;在算例2和3中,部分SEA负荷从 PV发电量不足时段转移到PV发电量充足时段,在 一定程度上平滑了负荷曲线;由于算例2和3中楼宇 4对外部的电能需求较低,这导致FCS负荷电能消耗 增加,从而获取更高的经济效益。

5.2.6 算法性能分析

为验证本文所提算法的优越性,将快速 ADMM 与标准 ADMM 的计算结果进行对比,如表2 所示。

表2 快速 ADMM 与标准 ADMM 的计算结果

Table 2 Calculation results of fast ADMM and

standard ADMM						
算法	迭代精度	迭代次数	迭代时间 / s			
快速 ADMM	И 0.02	46	169.48			
标准ADMM	A 0.02	85	457.73			

由表2可看出,当迭代精度相同时,快速ADMM 迭代次数更少,计算时间更短,其计算时间仅约为标 准ADMM的37.03%,这说明本文的快速ADMM具 有较好的收敛性能。

6 结论

本文以兼具电能生产和消费能力的智能楼宇群 为研究对象,构建一种以P2P电能共享为核心的智 能楼宇群运行框架,建立以含IES系统的智能楼宇 群整体运行成本最小为目标的分布式优化调度模 型,通过算例仿真得到以下结论:

1)智能楼宇群内采取 P2P 电能共享的运行方式,减少了对外部能源的依赖,在保证楼宇室内舒适性的情况下,降低了楼宇群以及每栋楼宇的运行成本,提高了楼宇群整体运行的灵活性以及对分布式PV 的消纳水平;

2)针对智能楼宇的供冷特性,采用运维成本较低的 IES 系统满足楼宇冷却需求,降低了楼宇群的能源需求以及运行成本,具有良好的经济效益;

3)采用快速 ADMM 对模型进行求解,在保证用 户隐私信息安全的同时,提高了求解效率和收敛 性能。

本文所提模型可以量化多种资源灵活性,有一定的拓展价值,可以进一步应用于配电网中。后续 笔者将针对不同需求侧资源节点,对考虑潮流、安全 等系统运行条件约束的优化调度问题展开研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1]张显,史连军.中国电力市场未来研究方向及关键技术[J].

电力系统自动化,2020,44(16):1-11.

ZHANG Xian, SHI Lianjun. Future research areas and key technologies of electricity market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16):1-11.

- [2] 蔡紫婷,彭敏放,沈美娥.考虑需求侧资源的智能小区综合能源日前优化调度[J].电力自动化设备,2021,41(3):18-24,32.
 CAI Ziting, PENG Minfang, SHEN Mei'e. Day-ahead optimal scheduling of smart integrated energy communities considering demand-side resources[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(3):18-24,32.
- [3] 杨景旭,周来,张勇军,等."专变共享"模式下考虑时变电价和 转移概率的 EV 有序充电[J].电力自动化设备,2020,40(10): 173-180,193.

YANG Jingxu, ZHOU Lai, ZHANG Yongjun, et al. Ordered charging of EVs considering time-varying electricity price and transition probability under "dedicated transformer sharing" mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 173-180, 193.

- [4]任文诗,高红均,刘友波,等.智能建筑群电能日前优化共享
 [J].电网技术,2019,43(7):2568-2577.
 REN Wenshi, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. Optimal dayahead electricity scheduling and sharing for smart building cluster[J]. Power System Technology,2019,43(7):2568-2577.
- [5] 吴界辰,艾欣,张艳,等.配售分离环境下高比例分布式能源园 区电能日前优化调度[J].电网技术,2018,42(6):1709-1719.
 WU Jiechen, AI Xin, ZHANG Yan, et al. Day-ahead optimal scheduling for high penetration of distributed energy resources in community under separated distribution and retail operational environment[J]. Power System Technology,2018,42(6): 1709-1719.
- [6] 胡鹏,艾欣,杨昭,等.考虑电能共享的综合能源楼宇群日前协同优化调度[J].电力自动化设备,2019,39(8):239-245.
 HU Peng,AI Xin,YANG Zhao, et al. Day-ahead optimal scheduling for cluster building with integrated energy system considering power sharing[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):239-245.
- [7] 陈冠廷,张利,刘宁宁,等. 基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):9-17.
 CHEN Guanting, ZHANG Li, LIU Ningning, et al. Blockchainbased transaction mechanism for residential users demand response[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(8): 9-17.
- [8] CHIŞ A, LUNDÉN J, KOIVUNEN V. Coalitional game theoretic optimization of electricity cost for communities of smart households[C]//2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP). New Orleans, LA, USA: IEEE, 2017:4726-4729.
- [9] KAYO G, ALA H S, KAI S R. Energy sharing and matching in different combinations of buildings, CHP capacities and operation strategy[J]. Energy and Buildings, 2014, 82:685-695.
- [10] KOPANOS G M, GEORGIADIS M C, PISTIKOPOULOS E N. Energy production planning of a network of micro combined heat and power generators[J]. Applied Energy, 2013, 102:1522-1534.
- [11] 吴界辰,艾欣,胡俊杰,等. 面向智能园区多产消者能量管理的 对等模型(P2P)建模与优化运行[J]. 电网技术,2020,44(1): 52-61.
 WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Peer-to-peer modeling and optimal operation for prosumer energy management in in-

and optimal operation for prosumer energy management in intelligent community[J]. Power System Technology,2020,44(1): 52-61.

[12] YAN W, WEN L L, LI W, et al. Decomposition-coordination interior point method and its application to multi-area optimal reactive power flow[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(1): 55-60.

- [13] MORSTYN T, MCCULLOCH M D. Multiclass energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 4005-4014.
- [14] DU Y F, JIANG L, DUAN C, et al. Energy consumption scheduling of HVAC considering weather forecast error through the distributionally robust approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(3);846-857.
- [15] JIANG L B, LOW S. Multi-period optimal energy procurement and demand response in smart grid with uncertain supply [C] //2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2011:4348-4353.
- [16] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, et al. Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2487-2498.
- [17] GOLDSTEIN T,O'DONOGHUE B,SETZER S, et al. Fast alternating direction optimization methods[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2014,7(3):1588-1623.
- [18] 乐健,周谦,赵联港,等.基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J].电力自动化设备,2020,40(3):44-54. LE Jian,ZHOU Qian,ZHAO Liangang, et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):44-54.
- [19] 徐建军, 王保娥, 闫丽梅, 等. 混合能源协同控制的智能家庭能

源优化控制策略[J]. 电工技术学报,2017,32(12):214-223.

XU Jianjun, WANG Bao'e, YAN Limei, et al. The strategy of the smart home energy optimization control of the hybrid energy coordinated control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12):214-223.

[20] JIN X L, MU Y F, JIA H J, et al. Dynamic economic dispatch of a hybrid energy microgrid considering building based virtual energy storage system[J]. Applied Energy, 2017, 194: 386-398.

作者简介:

周



周 军(1967—), 男, 吉林吉林人, 教授, 主要研究方向为新能源并网发电技术、 电力系统稳定与控制等(E-mail: jlzhoujun@ 126.com);

李佳旺(1998—),男,辽宁锦州人,硕 士研究生,主要研究方向为新能源并网发 电技术、分布式发电系统运行优化调度 (**E-mail**:2726097311@qq.com);

军 (E-mail:27260

马鸿君(1997—),男,河南南阳人,硕 士研究生,主要研究方向为新能源并网发电技术、分布式发 电系统运行优化调度(E-mail:2099757948@qq.com);

姜德龙(1972—), 男, 吉林松原人, 教授, 博士, 主要研究 方向为电力系统优化调度(**E-mail**; jiangdelong@126.com);

张 虹(1973—), 女, 吉林吉林人, 副教授, 博士, 主要研 究方向为新能源并网发电技术、电力系统稳定与控制(E-mail: jdlzh2000@126.com)。

(编辑 王锦秀)

Distributed optimal scheduling for smart building clusters considering peer-to-peer electric energy sharing

ZHOU Jun¹, LI Jiawang¹, MA Hongjun², JIANG Delong³, ZHANG Hong¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Nanyang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Nanyang 473000, China;

3. School of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

Abstract: Aiming at smart buildings with both electric energy production and consumption capability, an energy management framework of smart building clusters with P2P(Peer-to-Peer) electric energy sharing as the core is proposed based on the bidirectional flow characteristic of energy and information. The internal resources of smart buildings are quantitatively modeled. At the same time, according to the internal cooling characteristics of the buildings, the ice energy storage system is considered to meet the cooling demand of the buildings. The P2P electric energy sharing mechanism is used to improve the flexibility and economy of system operation, and an optimal day-ahead economic scheduling model of smart building clusters is built. The fast alternating direction method of multipliers is used to solve the model in a distributed way, and the optimal strategy for P2P electric energy sharing of smart building clusters is obtained. Case results show that the proposed model can effectively reduce the dependence of building clusters on external energy, and improve the overall economic benefit of the system and the consumption level of renewable energy while ensuring the comfort of users in the buildings.

Key words: smart building clusters; peer-to-peer electric energy sharing; ice energy storage; distributed optimal scheduling; fast alternating direction method of multipliers

附录 A:



Fig.A2 PV forecasting output of each building in smart building clusters

表 A1 CL 参数							
Table A1 Parameters of CL							
参数	数值	参数	数值				
С	3,3	$\kappa_{\rm r}$, $\kappa_{\rm ice}$	3.6,3.5				
R	1.35	arphi	0.1				
$\omega_1, \omega_2, \omega_4$	0.5,0.3,0.1	D	200				
γ	1	δ	1.8				

表 A2 ESS 参数

Table A2 Parameters of ESS

IES	系统	EES 系统		
参数	数值	参数	数值	
最大存储容量	2 100 kW·h	最大存储容量	650 kW · h	
最大制冰功率	300 kW	最小存储容量	$40 \text{ kW} \cdot \text{h}$	
最大融冰功率	500 kW	初始存储容量	60 kW · h	
冰存储效率	0.98	最大充放电功率	240 kW	
热交换效率	0.98	充放电效率	0.9	



Fig.A3 Electric energy transaction condition between smart building clusters and REP









图 A5 各算例中楼宇 2 的 HVAC 电能消耗

Fig.A5 HVAC electric energy consumption of Building 2 in each case





Fig.A6 HVAC electric energy consumption of Building 4 in each case



图 A7 各算例中楼宇 3 的 SEA 电能消耗





Fig.A8 FCS electric energy consumption of Building 4 in each case