DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2022. 03. 005

含电池储能系统的智能楼宇多阶段能量 管理策略

Multi-stage energy management strategy for smart buildings with BESS

刘静¹,史梦鸽^{2*},胡永锋¹ LIU Jing¹,SHI Mengge^{2*},HU Yongfeng¹

(1.中国华电科工集团有限公司,北京 100070; 2.南方科技大学 电子与电气工程系,广东 深圳 518055)
 (1.China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China; 2.Department of Electric and Electronical Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

摘 要:智能楼宇是新型电力系统中不可或缺的组成部分。面对分布式电源出力与负荷需求的不确定性的问题, 智能楼宇系统的可靠与经济运行更加依赖于内部能量的优化调度。为协调优化智能楼宇的能量管理,为含电池储 能系统以及充电场站的智能楼宇提出了一种多阶段能量管理方法:在日前阶段,设计采用能够应对可再生电源出 力和负荷需求不确定性的鲁棒优化策略,同时考虑了储能系统的时间耦合约束;在日内阶段,基于加权模型预测控 制的方法,以日前优化策略为参考,采用滚动优化和反馈校正的方式,动态调整各可控机组的有功出力、储能系统 的充放电功率、电动汽车的充电策略以及与主网的能量交易,以适应源荷实时波动性。对某智能楼宇利用风电和 光伏能源、采用传统的和本文提出的能源管理策略时的数据进行仿真分析。结果表明,本文所提出多阶段能量管 理方法可有效控制含电池储能系统的智能楼宇的运行成本,同时可降低与主网的联络线功率,减小可再生能源和 负荷的随机性和波动性对系统运行的影响。

关键词:智能楼宇;能量管理;电池储能系统;电动汽车;多阶段模型预测控制;新型电网;碳中和;新型电力系统 中图分类号:TK 02 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2022)03-0029-09

Abstract: Smart building is an indispensable part of new power system. Dealing with the uncertain renewable energy output and load demand, a smart building system has to reasonably schedule the internal energy to realize the reliable and economical operation. To manage the energy optimal scheduling in smart buildings, a multi-stage energy management strategy for smart buildings including battery energy storage system (BESS) and electric vehicle charging stations is proposed. In day-ahead stage, a robust optimization strategy is designed to deal with the uncertainty of renewable power output and load demand, considering the time coupling constraints of the BESS. In intra-day stage, weighted model predictive control method is taken to adjust the optimization strategy in day-ahead stage, and rolling optimization and feedback correction methods are employed to dynamically control the active output of each controllable power supplier, the power charged and discharged from BESS, electric vehicle charging strategy and power transaction with the main power grid in order to adapt to the real-time fluctuation of energy output and load demand. The simulation results show that the proposed multi-stage energy management structure of the smart building embedded BESS can effectively reduce the operation cost of the smart building, lower the tie-line power and reduce the influence of the randomness and volatility brought by renewable energy and load demand on the system operation.

Keywords: smart building; energy management; BESS; electric vehicle; multi-stage model prediction control; new power grid; carbon neutrality; new power system

0 引言

为实现"双碳"战略目标,需"构建以新能源为 主体的新型电力系统"、实现能源网络的脱碳和去

收稿日期:2022-01-07;**修回日期:**2022-03-07 **基金项目:**中国华电集团科技项目(CHDKJ20-01-75) 中心化^[1]。作为一座现代化城市的重要组成部分, 智能楼宇凭借其智能化、信息化、可视化、人性化以 及高度集成化等特点,日益成为智慧城市发展的强 大驱动力^[2]。在这一趋势下,智能楼宇系统作为一 个能够实现自我控制、保护以及管理的自治系统, 可以实现对分布式电源的管理,为应对电力系统中 高比例可再生能源的随机性、波动性以及间歇性提供了一种极具前景的能源优化调度方案^[3-4]。

智能楼宇系统中的分布式电源包括可调度的 本地机组以及不可调度的可再生能源(如风电、光 伏等)。智能楼宇系统运行模式灵活,可以实现联 网运行模式和离网运行模式的无扰切换^[5]。与传统 电网相比可再生能源的不确定性使智能楼宇的能 量管理变得更为复杂。在传统电网中,通过对负荷 进行预测,可提前对可调度的本地发电机组的启停 进行安排。由于在可再生能源高渗透率场景下的 智能楼宇系统规模相对小,因此依赖于预测精度较 高的日前调度策略已不满足智能楼宇运行的要 求^[6]。为了在满足可再生能源出力与负荷需求时变 性的前提下,实现智能楼宇系统的安全、可靠、经济 运行,需要设计适合智能楼宇系统的能量调度策略 来协调内部能源,并且通过与主网进行电能交互, 最终使得系统总运行成本最小化^[7]。

通过已有的文献可以看出,含可再生能源系统 的能量管理策略通常包含以下3类。(1)直接应用提 前设计的确定性框架[8-9],这与传统大规模电网的优 化调度类似。这类方法对可再生能源和负荷需求 的预测过于理想,得到的解可能会偏离实际,不具 可行性。(2)采用概率方法来处理电网中普遍存在 的不确定性问题。在这类策略中,可再生能源出力 是由一系列随机情况或概率区间表示,优化问题的 求解通常采用随机规划[10-12]、鲁棒优化[13-17]和模糊 逻辑^[18]等方法。基于场景的随机框架依赖于足够 多有代表性的场景来反映可能存在的状态,随着系 统规模的扩大以及随机变量的不断增加,求解过程 所需要的计算量会越来越大。对于基于鲁棒优化 的方法,通常将不确定性变量限制在一定的集合范 围内,通过该集合得到的解一般可以反映最坏的情 况。需要指出的是,随机优化方法和鲁棒优化方法 都需要对不确定性有一定的先验知识。因此,最终 的调度性能在很大程度上取决于预测精度。(3)采 用在线优化的方法在较短的时间内实现实时能量 调度[19-21]。这类方法在所指定的时间窗口(即从当 前到未来的某一时段)内对不确定性进行管理。常 见的在线能量调度采用模型预测控制法[22-23],它不 仅可以解决含不确定性的优化调度问题,还具有较 好的鲁棒性以及抗干扰性。许多鲁棒模型预测方 法都是基于最坏情况的扰动假设得到最优解,这往 往导致最优解过于保守,降低了模型预测的经济性 能。在本研究中,日前阶段和日内阶段分别采用最 小-最大(min-max)鲁棒优化和加权模型预测控制 方法,使调度策略对不确定性具有较好的鲁棒性,

并在日内阶段可以根据实际信息和预测信息之间 的差异调整其调度计划,以适应源-荷实时波动。

1 智能楼宇系统结构

本文所研究的智能楼宇系统结构如图1所示, 主要由以下成分构成:(1)可再生能源;(2)柴油发 电机组;(3)不可控负荷,如自动扶梯、电表、服务水 泵等;(4)可控负荷,如暖通空调系统(Heating Ventilation and Air Conditioning,HVAC)、照明负荷等; (5)电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS);(6)电动汽车。为了求解智能楼宇系统的能 量管理问题,安装了本地智能楼宇能量管理系统, 该系统由必要的传感器和执行器组成。



1.1 可再生能源和系统净负荷

电力负荷和可再生能源在t时刻的出力分别记 作 $P_{a}(t)$ 和 $P_{w}(t)$ 。系统净负荷定义为

$$P_{\text{load}}(t) = P_{\text{e}}(t) - P_{\text{re}}(t)_{\circ} \tag{1}$$

可再生能源出力(如光伏、风电)的共同之处在 于均无法准确预测,特别是在日前阶段。因此,本 文将可再生能源出力表示为

$$P_{\rm re}(t) = \bar{P}_{\rm re}(t) + \tilde{P}_{\rm re}(t), \qquad (2)$$

$$\tilde{P}_{\rm re}^{\rm min}(t) \le \tilde{P}_{\rm re}(t) \le \tilde{P}_{\rm re}^{\rm max}(t), \qquad (3)$$

式中: $\bar{P}_{re}(t)$ 表示可再生能源出力的预测值; $\tilde{P}_{re}(t)$ 表示可再生能源出力的波动值; $\tilde{P}_{re}^{min}(t)$ 和 $\tilde{P}_{re}^{max}(t)$ 为波动值的上下限。

1.2 柴油发电机

柴油发电机组的运行成本 C_c(t)表示为与输出 功率 P_c(t)相关的二次形式^[24]

$$C_{\rm G}(t) = a + b \times P_{\rm G}(t) + c \times P_{\rm G}^2(t), \qquad (4)$$

式中:*a*,*b*和*c*为发电机组运行成本的参数。

在运行过程中,需要满足以下约束条件。 (1)机组出力上下限约束。

$$P_{\rm G}^{\rm min} \leq P_{\rm G}(t) \leq P_{\rm G}^{\rm max},\tag{5}$$

式中: P^{min}_G和P^{max}分别表示发电机组有功出力的最小 值和最大值。

(2)爬坡率约束。

火力发电机组在连续2个时段内的出力变化量 应受到向上/向下爬坡率(*P*^{up}/*P*^{down})的限制,

$$P_{\rm G}(t+1) - P_{\rm G}(t) \le P_{\rm G}^{\rm up}, \tag{6}$$

$$P_{\rm G}(t) - P_{\rm G}(t-1) \le P_{\rm G}^{\rm down} \tag{7}$$

(3)最小启停时间约束。

因为机组不能频繁启停,只有在运行(或停机) 一段时间后才能再次启停,因此应对机组的启停次 数加以限制,

$$\sum_{\tau=t}^{+t_{G}^{m-1}-1} s(\tau) \ge t_{G}^{on}(s(t) - s(t-1)), \qquad (8)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+t_{\rm G}^{\rm off}-1} s(\tau) \ge t_{\rm G}^{\rm off}(s(t-1)-s(t)), \tag{9}$$

式中:s(t)表示发电机组的启停状态(1为开,0为 关);t^{cn}_c和t^{eff}_c分别表示发电机组的最小启停时间。

一般情况下,为满足可再生能源出力和负荷需 求的时变性并且保证发电机组在实时调度过程中 能及时响应,它们通常有较大的向上/向下爬坡率。

1.3 HVAC

HVAC是智能楼宇系统的用能的核心单元^[25-27]。 HVAC应该保持一个可接受的舒适水平,室内温度 通常是一个典型的舒适度指标。

HVAC 机组的功率 $P_{HVAC}(t)$ 与建筑内外温度 有关,

$$\begin{split} T_{\text{in}}(t) = \left(1 - \frac{1}{GR}\right) T_{\text{in}}(t-1) + \frac{1}{GR} T_{\text{out}}(t) - \frac{\eta}{G} P_{\text{HVAC}}(t), (10) \\ \text{式中}: T_{\text{in}}(t) & \Pi T_{\text{out}}(t) & \Omega \\ \text{利. In}(t) & \Pi T_{\text{out}}(t) & \Omega \\ \text{J. In}(t) & \Pi \\ \text{$$

此外,HVAC机组在使用过程中会有一个室内 温度的设定值,HVAC机组尽量维持在这个设定值 附近,任何温度偏离这个设定值都会引起室内人员 的不适,即可接受的室内温度应限定下述范围内,

 $T_{\rm in}^{\rm min} \leqslant T_{\rm in}(t) \leqslant T_{\rm in}^{\rm max}, \qquad (11)$

式中:T_{in},T_{in}为可接受的室内温度最小值与最大值。

1.4 BESS

0时表示制热模式。

本文中,BESS的运行成本主要考虑以下因素一次投资成本以及运行维护成本。BESS在t时段内的运行成本为

$$C_{\text{BESS}}(t) = K_{\text{s}} \left(\eta^{\text{ch}} \times P_{\text{ch}}(t) + \frac{P_{\text{dis}}(t)}{\eta^{\text{dis}}} \right) \Delta t, \quad (12)$$

式中: $P_{ch}(t)$ 和 $P_{ds}(t)$ 分别表示储能系统的充/放电功率; η^{ch} 和 η^{ds} 分别为储能系统的充/放电效率; K_s 为 折算后的储能系统充放电单位成本。

一般来说,BESS在运行过程中需满足的约束 包括

$$0 \le P_{\rm ch}(t) \le P_{\rm ch}^{\rm max} U_{\rm bat}(t), \qquad (13)$$

$$0 \le P_{\rm dis}(t) \le P_{\rm dis}^{\rm max} \left[1 - U_{\rm bat}(t) \right], \tag{14}$$

$$S_{\rm oc}(t) = S_{\rm oc}(t-1) + \frac{\eta^{\rm ch} P_{\rm ch}(t) - P_{\rm dis}(t) / \eta^{\rm dis}}{E_{\rm bat}}, (15)$$

$$S_{\rm OC,\,min} \leqslant S_{\rm OC}(t) \leqslant S_{\rm OC,\,max} , \qquad (16)$$

$$S_{\rm oc}(T) = S_{\rm oc,0}$$
, (17)

式中: P_{ch}^{max} 与 P_{dis}^{max} 分别表示 $P_{ch}(t)$ 和 $P_{dis}(t)$ 的上限; $U_{bat}(t)$ 为BESS的充/放电状态,取0/1,取1时表示充 电状态,取0时表示放电状态; $S_{oc}(t)$ 表示指电池储 能系统的荷电状态(State of Charge, SOC), $S_{oc,min}(t)$ 与 $S_{oc,max}(t)$ 分别为荷电状态的上下限,约束(16)的主要 目的在于防止储能系统过充/过放,延长使用寿命; 约束(17)保证了BESS在调度周期的始末时刻的 SOC,即 $S_{oc,0}$ 与 $S_{oc}(T)$,相等,有利于储能的循环调度。

1.5 电动汽车

电动汽车为智能楼宇中可调控的柔性负载。 电动汽车负荷聚合体(Electric Vehicle Aggregator, EVA)负责整合智能楼宇的电动汽车个体能源需求, 以实现智能楼宇的整体能量管理。建筑内的EVA 可以收集具体的电动汽车信息,如充电需求、到达 和离开时间、最大充电功率、司机偏好等。

首先,EVA在每个时段评估新到达电动汽车的 调度能力,根据每辆车最大充电功率计算充电需求 所需的时间

$$t_m^{\rm r} = \frac{d_m}{\min\left\{\bar{P}_m^{\rm EV,\,r},\,\bar{P}^{\rm charge}\right\}}\,,\tag{18}$$

式中: t_m^r 为第m辆电动汽车最短的充电需求时间; d_m 为第m辆电动汽车充电需求; $\bar{P}_m^{\text{EV,r}}$ 为第m辆电动汽 车额定充电功率; \bar{P}^{charge} 为充电桩的额定功率。当 t_m^r 小于电动汽车停留时间时,立即以最大功率给电动 汽车进行充电;当 t_m^r 大于电动汽车停留时间时,可 以采取智能充电策略,只需保证电动汽车在离开前 达到车主设定好的SOC。

在本文中,仅考虑电动汽车电池充电模式,而 不考虑放电的情况,电动汽车电池需满足的约束条 件与储能系统类似,第*m*辆电动汽车需满足以下 约束

$$0 \le P_m(t) \le P_m^{\max} , \qquad (19)$$

$$S_{\text{OC, m}}(t) = S_{\text{OC, m}}(t-1) + \frac{\eta_m P_m(t)}{E_m} , \qquad (20)$$

$$S_{\text{OC},m}^{\min} \leqslant S_{\text{OC},m}(t) \leqslant S_{\text{OC},m}^{\max}, \qquad (21)$$

$$S_{\text{OC, I, m}} + \frac{\eta_m}{E_m} \sum_{t} P_m(t) = \bar{S}_{\text{oc, m}},$$
 (22)

式中: $P_m(t)$, P_m^{max} 为第m量电动汽车的充电功率和最 大充电功率; η_m 为第m辆电动汽车的充电效率; E_m 为第m辆电动汽车的电池容量; $S_{oc,m}^{min}$ 为第m辆电动 汽车的SOC, $S_{oc,m}^{min}$, $S_{oc,m}^{max}$ 为其最小值和最大值; $S_{oc,1,m}$ 表示第m辆电动汽车初始SOC; $\bar{S}_{oc,m}$ 为第m辆电动 汽车车主所设定的离开时的SOC。

2 日前阶段能量管理策略

本文中的智能楼宇系统与主网相连,当智能楼 宇内部无法满足功率平衡时,可通过与主网进行购 售电而达到功率平衡。具体而言,当智能楼宇内各 发电单元无法满足负荷需求时,需要从主网购电; 反之,智能楼宇可将富余的电出售给主网,获得收 益。智能楼宇系统的运行需要满足功率平衡约束,

$$P_{\rm G}(t) + P_{\rm dis}(t) + P_{\rm grid}^{\rm DA, \, buy}(t) - P_{\rm grid}^{\rm DA, \, sell}(t) = P_{\rm load}(t) + P_{\rm HVAC}(t) + P_{\rm ch}(t) + \sum_{m} P_{m}(t), \quad (23)$$

式中: $P_{\text{grid}}^{\text{DA,buy}}(t)$ 和 $P_{\text{grid}}^{\text{DA,sell}}(t)$ 分别为t时段智能楼宇系统从主网购买和出售的功率。

智能楼宇系统与主网的交互功率需满足以下 约束

$$0 \leq P_{\text{grid}}^{\text{DA, buy}}(t) \leq U_{\text{grid}}(t)P_{\text{grid}}^{\text{max}}, \qquad (24)$$

$$0 \leq P_{\text{grid}}^{\text{DA, sell}}(t) \leq \left[1 - U_{\text{grid}}(t)\right] P_{\text{grid}}^{\text{max}}, \qquad (25)$$

式中:P_{grid}表示智能楼宇系统与主网交换功率的最 大值,取值需要考虑主网和智能楼宇连接处变压器 的容量等因素;U_{grid}(t)为智能楼宇系统与主网的购 售电状态,取值为1时表示从主网购电,取值为0时 表示向主网售电。约束(24)和(25)表示从电网购 电和售电不能同时发生。

日前阶段能量管理问题的目标函数为日前市场发电成本(C^{DA})最小化。 C^{DA} 包含了(C_{c})、电池储能系统运行成本(C_{BESS})、HVAC机组的舒适度惩罚成本以及与主网的电能交易成本,

式中: β 为舒适度惩罚成本系数; $T_{set}^{in}(t)$ 为设定的建筑物室内温度; $\lambda_{grid}^{DA}(t)$ 为日前阶段与主网的交易电价。

3 日内阶段能量管理策略

经典的模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)算法可用于求解电力系统的日内滚动优化问题。该算法的基本原理是:将整个调度层按时间顺 序划分为若干耦合的部分,在时间段t中,在一个预 设的时间范围H内利用未来的预测信息求解日内调 度问题,从而得到一个最优决策,但仅执行当前时 刻的调度命令;然后将水平窗口向前滚动,在下一 个时间周期t+1中,利用新的状态数据和预测信息 重复优化过程。

在本文的日内阶段中,采用加权模型预测控制 的方法来求解滚动时域优化问题,优化时间尺度为 1 h,时间分辨率为15 min。对于每个时间段 t 内的 成本对应不同的权重,日内阶段能量管理策略的目 标函数是最小化加权总成本min $\sum_{i=1}^{t+H-1} \omega^{t'-i} C^{\text{ID}}$,其中 $C^{\rm ID} = \sum_{t \in T^{\rm BT}} C_{\rm G}(t) + C_{\rm BESS}(t) + \beta \left(T^{\rm in}(t) - T^{\rm in}_{\rm set}(t)\right)^2 + \beta \left(T^{$ $\lambda_{\text{grid}}^{\text{ID, buy}}(t) \times P_{\text{grid}}^{\text{ID, buy}}(t) - \lambda_{\text{grid}}^{\text{ID, sell}}(t) \times P_{\text{grid}}^{\text{ID, sell}}(t) +$ $\rho\left(S_{\rm OC}^{\rm ID}(t)-S_{\rm OC}^{\rm DA}(t)\right)^2$, (式(2)—(3)可再生能源出力不确定性约束 式(5)-(7)柴油发电机组约束 s. t.{式(10)—(11)HVAC机组约束 ,(27) 式(13)—(16)电池储能系统约束 式(19)—(22)电动汽车充电约束 $P_{\rm G}(t) + P_{\rm dis}(t) + P_{\rm grid}^{\rm ID,\,buy}(t) + P_{\rm grid}^{\rm DA,\,buy}(t) P_{\text{grid}}^{\text{ID, sell}}(t) - P_{\text{grid}}^{\text{DA, sell}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{HVAC}}(t) +$ $P_{\rm ch}(t) + \sum P_m(t),$ (28)

$$0 \leq P_{\text{grid}}^{\text{ID, buy}}(t) + P_{\text{grid}}^{\text{DA, buy}}(t) \leq U_{\text{grid}}(t)P_{\text{grid}}^{\text{max}}, \quad (29)$$

 $0 \leq P_{\text{grid}}^{\text{ID, sell}}(t) + P_{\text{grid}}^{\text{DA, sell}}(t) \leq \left[1 - U_{\text{grid}}(t)\right] P_{\text{grid}}^{\text{max}}, (30)$ 式中: $P_{\text{grid}}^{\text{ID, buy}}(t)$ 和 $P_{\text{grid}}^{\text{ID, sell}}(t)$ 是在日内阶段与主网的交 互功率; $\lambda_{\text{grid}}^{\text{ID, buy}}(t)$ 和 $\lambda_{\text{grid}}^{\text{ID, sell}}(t)$ 分别是日内阶段与主网 的购售电电价; ρ 是惩罚因子; t'=t+H-1。

为了使能量管理策略对可再生能源出力的不确定性具有鲁棒性,利用min-max鲁棒优化技术将 原始约束转化为鲁棒对应约束。首先,可再生能源 出力可以由不确定性集进行描述

 $P_{\rm re}(t) \in \left[\bar{P}_{\rm re}(t) + \tilde{P}_{\rm re}^{\rm min}(t), \bar{P}_{\rm re}(t) + \tilde{P}_{\rm re}^{\rm max}(t)\right]_{\circ} (31)$

在此,引入弹性调整系数γ^{Re}(*t*) ∈ [0,1],将不确 定性集改写为如下形式

$$P_{\rm re}(t) \in \left[\bar{P}_{\rm re}(t) + \gamma^{\rm Re}(t)\tilde{P}_{\rm re}^{\rm min}(t), \bar{P}_{\rm re}(t) + \right]$$

$$\gamma^{\text{Re}}(t)\tilde{P}_{\text{re}}^{\text{max}}(t)\Big]_{\circ}$$
(32)

显然, $\gamma^{\text{Re}}(t)$ 的取值不仅可以确定可再生能源 出力的可行域,而且可以控制能量管理策略的鲁棒 性和收益之间的权衡。当 $\gamma^{\text{Re}}(t)$ 为0时,表示只考虑 可再生能源出力的预测值,而不考虑可再生能源出 力的不确定性,此时能量管理策略的鲁棒性较差。 随着 $\gamma^{\text{Re}}(t)$ 的增大,即预测误差允许范围扩大,会使 得能量管理策略更加保守。由于本文所建立的能 量管理模型是关于 $P_{\text{re}}(t)$ 的凸优化模型,且可再生 能源出力对于目标函数而言是一个非递增的函数, 所以最优解必须达到不确定性集(32)的边界。因 此约束(2)和约束(3)可以用柔性鲁棒公式(33)所 替代,

$$P_{\rm re}(t) = \bar{P}_{\rm re}(t) + \gamma^{\rm Re}(t)\tilde{P}_{\rm re}^{\rm min}(t)_{\circ}$$
(33)

4 算例分析

4.1 算例模型

本节研究了一个典型的智能楼宇系统,包含可 再生能源(风电、光伏)、柴油发电机组、HVAC机组、 电池储能系统以及电动汽车。柴油发电机组的参 数见表1,HVAC机组的参数见表2,BESS的参数 见表3。

算例中采用的峰谷分时电价如图2所示,可再 生能源出力的预测值和真实值如图3所示(选取自 美国PJM公司的真实数据,每个时段为15 min,1 d 为96个时段),图4为智能楼宇室外的温度为2021 年4月11日美国亚拉巴马州塞尔马市的真实数据, 图5为电动汽车到达时间及Soc.1(每个时段为15 min)。算例仿真过程是在Matlab2021a上使用 Yalmip^[28]以及Gurobi求解器完成的。

表1 柴油发电机组参数 Table 1 Parameters of the generator

项目	参数	项目	参数
$P_{\rm G}^{\rm max}$	100 kW	$P_{\rm G}^{ m up}$	40 kW/min
${P}_{ m G}^{ m min}$	20 kW	$P_{ m G}^{ m down}$	30 kW/min
a	0.15 美元/h	t_{G}^{on}	2 h
b	0.06 美元/(kW・h)	$t_{\rm G}^{\rm off}$	2 h
с	0.000 2 美元/(kW ² ·h)		

表 2 HVAC 机组参数 Table 2 Parameters of the HVAC unit

项目	参数	项目	参数
G	1.5 kW∙h/℃	室温设定值	24 °C
R	0.95 °C/(kW•h)	室温最小值	22 °C
η	0.15	室温最大值	27 °C





Fig. 3 Predicted and measured values of renewable energy

resources



4.2 不同场景下仿真结果分析

对2种可再生能源出力场景(场景1为风电;场 景2为光伏)下的含储能系统的智能楼宇的多阶段 能量管理策略进行研究。图6为在有、风电、光伏出 力的情况下,柴油发电机组的出力。图7为2种场 景下的系统与主网的交互功率。从图2和图7可以 看出,系统与电网的交互功率与电价的变化有关, 智能楼宇系统在低电价时(如0~6h,21~24h)从电 网购电,在电价较高时向电网售电,以达到更优的 经济性。

图8表示2种场景下,电动汽车充电、储能充放 电以及HVAC机组的功率情况(每个时段为15 min)。图8中电池储能功率为正值时表示充电,为 负值时表示放电,当可再生能源出力有富余时,将 多余的电量储存到电池储能系统中;反之,即当可 再生能源无法满足负荷需求时,将电池储能系统中 储存的电量释放出来,若仍无法满足负荷需求,再 从电网购电。从图8可以看出,电池储能系统优先 选择在高电价时放电,从而降低系统的运行成本。

图 8a 中,电动汽车充电时间主要集中于 0~40 时段以及 85~96 时段,一方面是因为在这 2个时段 电价相对较低,另一方面是因为在夜间风电出力较 高,降低了系统从主网购电的成本。对于场景 2,电 动汽车充电时间主要集中在光伏出力较高的时段



(如44~64时段)以及电价较低的时段(如85~96



为了进一步说明 BESS 对智能楼宇系统运行成本以及与电网交互功率的影响,对比了在不同场景下包含和不包 BESS 的系统运行成本,见表4。

由表4可知,对于场景1,BESS使得系统运行成本降低2.23%,使系统与主网的交互功率降低6.00%;对于场景2,BESS使得系统运行成本降低3.14%,使系统与主网的交互功率降低3.82%。无论是采用风电还是光伏,BESS都可以通过在可再生能源出力富裕时储电,在负荷需求较大且成本较高时放电,一定程度上降低系统的运行成本。

4.3 不同策略下仿真结果分析

为了进一步说明本文所提出来调度策略的性能,将本文所提出的调度策略与传统的鲁棒优化策略在相同的场景下进行对比,2个场景中使用不同 调度策略的系统运行成本见表5。其中,"理想调



度"是指当所有不确定信息均为已知的情况下产生的结果。在实际情况中由于预测信息有偏差,因此"理想调度"是不存在的。本节将"理想调度"作为参考量,2种场景下与"理想调度"的偏差分别为13.77%与8.65%,传统鲁棒优化策略在2种场景下与理想调度的偏差分别为27.56%与16.08%。传统鲁棒优化策略是基于最坏的场景对系统运行内部进行调度安排以及与外部进行购售电,因此在经济性上与"理想调度"之间存在较大的偏差。本文所提的两阶段策略在很大程度上可以削弱源荷波动性对系统运行成本产生的影响。

表6为本文所提出的多阶段能量管理策略与单 一日前阶段能量管理策略下的系统运行成本以及 交互功率的对比。

可以看出,2个场景下多阶段能量管理策略运 行成本以及交互功率均优于单一日前阶段的能量 管理策略。本文所提出的多阶段能量管理策略,在 日内阶段所采用加权模型预测控制,通过短期的预



Fig. 8 Energy management results

表4 不同场景下系统的运行成本

 Table 4
 Operation cost under different scenarios

场景	项目	运行成本/美元	交互功率/kW
1	含 BESS	556.04	3 815.55
1	不含 BESS	568.72	4 059.26
2	含 BESS	1 254.92	5 165.86
2	不含BESS	1 295.61	5 370.91

表5 不同策略下系统的运行成本

 Table 6
 Operation cost under different strategies

公 在 田夕	成本/美元		偏差/%	
水町	场景1	场景2	场景1	场景2
本文所提策略	556.04	1 254.92	13.77	8.65
传统鲁棒优化策略	623.43	1 340.73	27.56	16.08
理想调度	488.73	1 155.04	_	_

表 6 不同调度策略下系统的运行成本 Table 6 Operation cost under different dispatch strategies

场景	能量管理策略	运行成本/美元	交互功率/kW
1	单一阶段	652.36	4 673.23
1	多阶段	556.04	3 815.55
2	单一阶段	1 402.75	5 837.49
2	多阶段	1 254.92	5 165.86

测信息对机组以及储能体统的调度安排进行修正, 能够更好地应对、削弱不确定性信息的随机性与波 动性。

5 结论

本文提出了含 BESS 和充电场站的智能楼宇多 阶段能量管理方法,包含日前阶段和日内滚动优化 阶段。本文的能量管理策略采用min-max 鲁棒优化 和加权模型预测控制方法,使调度方案对不确定性 具有较好的鲁棒性,并在日内阶段根据实际信息对 调度策略进行调整以适应源荷实时波动性。仿真 结果表明,本文所提出的含电池储能系统的智能楼 宇多阶段能量管理方法在不同场景中在一定程度 上可以降低智能楼宇的运行成本以及与主网的联 络线功率,为智能楼宇的稳定、可靠、经济运行提供 支撑。

参考文献:

- [1]喻小宝,郑丹丹,杨康,等."双碳"目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术,2021,43(6):21-32.
 YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak
 [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 21-32.
- [2]APANAVICIENE R, VANAGAS A, FOKAIDES P A. Smart building integration into a smart city (SBISC) : Development of a new evaluation framework [J]. Energies, 2020, 13(9): 2190.
- [3]李欣璇,刘丽丽,陈曈,等.综合能源智能楼宇能量优化管 理技术发展趋势研究[J].能源与节能,2021(7):56-57,64.

LI Xinxuan, LIU Lili, CHEN Tong, et al. Study on development trend of energy optimization management technology of integrated energy intelligent buildings [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(7),56–57,64.

- [4]张金平,周强,王定美,等."双碳"目标下新型电力系统 发展路径研究[J].华电技术,2021,43(12):46-51.
 ZHANG Jinping, ZHOU Qiang, WANG Dingmei, et al. Research on the development path of new power system to achieve carbon peaking and carbon neutrality[J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 46-51.
- [5]杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
 YANG Xinfa, SU Jian,LYU Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1):57-70.
- [6]MARIANO-HERNÁNDEZ D, HERNÁNDEZ-CALLEJO

L, ZORITA-LAMADRID A, et al. A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis [J]. Journal of Building Engineering, 2021,33:101692.

[7]刘畅,卓建坤,赵东明,等.利用储能系统实现可再生能源 微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学 报,2020,40(1):1-18.

LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1):1-18.

[8]FARZAN F, JAFARI M A, MASIELLO R, et al. Toward optimal day-ahead scheduling and operation control of microgrids under uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(2): 499–507.

- [9]KONG X, BAI L, HU Q, et al. Day-ahead optimal scheduling method for grid-connected microgrid based on energy storage control strategy [J]. Journal of Modern Power Systems Clean Energy, 2016, 4(4): 648-658.
- [10]黄森, 陈鑫, 文旭, 等. 计及市场风险的含电动汽车风 光互补微电网随机规划调度模型 [J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2883-2890.

HUANG Miao, CHEN Xin, WEN Xu, et al. Stochastic programming dispatching model for wind and photovoltaic microgrid integrated with electric vehicles considering market risk [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2883–2890.

- [11]AFRASIABI M, MOHAMMADI M, RASTEGAR M, et al. Stochastic distributed microgrid energy management based on over-relaxed alternative direction method of multipliers
 [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14 (14); 2639-2648.
- [12]RASHIDIZADEH-KERMANI H, VAHEDIPOUR-DAHRAIE M, SHAFIE-KHAH M, et al. Stochastic programming model for scheduling demand response aggregators considering uncertain market prices and demands [J]. International Journal of Electrical Power Energy Systems, 2019, 113: 528-538.
- [13]GOLPÎRA H. Smart energy-aware manufacturing plant scheduling under uncertainty: A risk-based multiobjective robust optimization approach [J]. Energy, 2020, 209: 118385.
- [14]LUO Z, GU W, WU Z, et al. A robust optimization method for energy management of CCHP microgrid [J]. Journal of Modern Power Systems Clean Energy, 2018, 6 (1) : 132-144.
- [15]HOSSEINI S M, CARLI R, DOTOLI M. Robust optimal energy management of a residential microgrid under uncertainties on demand and renewable power generation

• 37 •

[J]. IEEE Transactions on Automation Science Engineering, 2020, 18(2): 618-637.

- [16]ARIAS N B, TABARES A, FRANCO J F, et al. Robust Joint expansion planning of electrical distribution systems and EV charging stations [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 884–894.
- [17]刘一欣,郭力,王成山.微电网两阶段鲁棒优化经济调度 方法[J].中国电机工程学报,2018,38(14):4013-4022.
 LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (14): 4013-4022.
- [18]李翔宇,赵冬梅.基于模糊-概率策略实时反馈的虚拟 电厂多时间尺度优化调度[J].电工技术学报,2021, 36(7):1446-1455.

LI Xiangyu, ZHAO Dongmei. Research on multi-time scale optimal scheduling of virtual power plant based on real-time feedback of fuzzy-probability strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (7): 1446-1455.

- [19]DU Y, PEI W, CHEN N, et al. Real-time microgrid economic dispatch based on model predictive control strategy [J]. Journal of Modern Power Systems Clean Energy, 2017, 5(5): 787-796.
- [20]JIA Y, LYU X, XIE P, et al. A novel retrospect-inspired regime for microgrid real-time energy scheduling with heterogeneous sources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020(11):4614-4625.
- [21]SCHERER H F, PASAMONTES M, GUZMÁN J L, et al. Efficient building energy management using distributed model predictive control [J]. Journal of Process Control, 2014, 24(6): 740-749.
- [22]张伟亮,张辉,支娜,等.考虑网络损耗的基于模型预测直流微电网群能量优化策略[J].电力系统自动化,2021,45(13):49-56.
 ZHANG Weiliang, ZHANG Hui, ZHI Na, et al. Energy

optimization strategy for DC microgrid cluster based on model prediction considering network loss [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 49–56.

[23]王旭东,吴莉萍,戚艳,等.基于模型预测控制的智能 楼宇暖通空调能量管理策略[J].电力系统及其自动化 学报,2019,31(6):98-106.

WANG Xudong, WU Liping, QI Yan, et al. Energy management strategy for heating, ventilation and air conditioning in smart building based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 98-106.

[24]李咸善,陈敏睿,程杉,等.基于双重激励协同博弈的 含电动汽车微电网优化调度策略[J].高电压技术, 2020,46(7):2286-2296.

LI Xianshan, CHEN Minrui, CHENG Shan, et al. Research on optimal scheduling strategy of microgrid with electric vehicles based on dual incentive cooperative game [J].High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2286–2296.

[25]李卓阳,靳小龙,贾宏杰,等.考虑建筑物热动态特性的暖通空调模型预测控制方法[J].中国电机工程学报, 2020,40(12):3928-3940.

LI Zhuoyang, JIN Xiaolong, JIA Hongjie, et al. Model predictive control method for the HVAC system of buildings considering the thermal dynamic characteristics of the envelope [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (12):3928-3940.

- [26]胡雪,杨俊红,刘德朝,等.基于人工智能与热力系统融合的综合节能[J].华电技术,2020,42(11):21-33.
 HU Xue, YANG Junhong, LIU Dechao, et al. Research on comprehensive energy-saving technology based on integration of artificial intelligence into thermal systems [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11):21-33.
- [27]郑刚,李金刚,刘依婷.基于建筑综合物性系数的换热站运行调节策略分析[J]. 华电技术, 2021, 43(12): 72-78..

ZHENG Gang, LI Jingang, LIU Yiting. Analysis on operation regulation strategy for heat exchange stations based on building comprehensive physical property coefficients [J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 72–78.

[28]LOFBERG J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB [C]//IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design. IEEE, 2005.

(本文责编:陆华)

作者简介:

刘静(1979),女,高级工程师,从事综合智慧能源系统的 设计与研究工作,liu-jing@chec.com.cn;

史梦鸽*(1996), 女, 在读硕士研究生, 从事智能微电网运行及能量管理、综合能源系统优化调度、电动汽车智能充电策略等方面的研究, shimg2019@mail.sustech.edu.cn;

胡永锋(1975),男,正高级工程师,工学硕士,从事综合 智慧能源系统的设计与研究工作,huyf@chec.com.cn。

*为通信作者。