

基于两阶段信息采集的智能建筑能量控制优化研究

王穆青, 高 飞

(国网山西省电力公司营销服务中心, 山西 太原 030032)

摘要: 提高智能建筑能源利用效率的关键不仅在于发挥能源互联网“云大物智联”的先天技术优势, 更需要深度挖掘不同能源需求间的相互关系。能量管理系统是智能建筑系统能量调控决策的核心, 通过信息流控制能量流, 可以确保系统运行的安全性、高效性和经济性。以提高系统运行经济性与用户舒适度为双重优化目标, 建立了智能建筑微电网能量管理系统优化模型。该模型从两个时间尺度对智能建筑能量系统进行两阶段优化运行, 第一阶段优化计及分时电价并考虑系统运行的经济性, 第二阶段优化在第一阶段优化的基础上综合考虑系统经济性及用户舒适度, 多维综合协同优化系统内各电源、储能及负荷的运行状态, 通过滚动运行的方式制订系统实时运行计划。最后通过优化算例验证了所提出方法的有效性。

关键词: 智能建筑; 能量管理系统; 优化调度; 分布式能源; 需求侧管理; 两阶段优化

Research on energy control optimization of intelligent building based on two-stage information collection

WANG Muqing, GAO Fei

(State Grid Shanxi Electric Power Company Marketing Service Center, Taiyuan 030032, China)

Abstract: The key to improving the energy efficiency of smart buildings is not only to take advantage of the innate technological advantages of the “Cloud Big IoT” of the Energy Internet, but also to deeply explore the interrelationships between different energy needs. Building energy management system is decision-making center of building energy regulation, which balance energy flow through the flow of information to ensure the system operation security, economic and efficient. Considering improve the energy economy and comfort level as the optimization goal, the optimize control model of smart building energy management system is established. This model performs a two-stage optimization operation of the smart building energy system from two time scales. The first stage optimizes the time-of-use electricity price and considers the economics of the system operation. The second stage optimization considers the system comprehensively on the basis of the first stage optimization. It is considered such as economical and user comfort, multi-dimensional comprehensive and collaborative optimization of the operating status of each power supply, energy storage and load in the system, and a real-time operation plan of the system through rolling operation is formulated. Finally, an optimization example has been proposed to verify the validity of this method.

Key words: commercial intelligent building; energy management system; optimal control; distributed generation; demand side management; two stage optimization

0 引言

在当前的电网运行中,能源互联网更多体现在能量流传输交互层面,对信息数据流的交互仍然较少。随着5G技术的成熟与发展,大容量交互式数据通信日益成熟,数据传输“最后一公里”将由海量的测量终端完成,并实时上传至电网控制中心。由于可再生能源的持续接入与电力市场化改革向纵深推进,海量的信息数据将给电网公司运营带来巨大的挑战。如何利用这些海量数据对电网进行发展规划,是当前亟须解决的难题。能源互联网通过广泛互联输-变-配-用-售各个环节的电力设备,实现了电力系统状态全面感知、信息高效处理和应用便捷灵活的功能。随着大型建筑的数量逐步增加,智能建筑系统应运而生,建筑能耗比例越来越大,建筑节能降耗迫在眉睫^[1]。因此,需要通过能量管理系统对信息数据流的分析,进而实现对能量流的调节^[2]。

文献[3]针对空调系统和照明系统研究了影响建筑能耗的主要因素,提出一种综合的建筑能耗优化控制方法。文献[4]建立了包含网络损耗、环境效益和经济指标的可控分布式电源微电网优化运行方法的数学模型,并提出算法对模型进行求解。文献[5-6]的仿真算例表明通过对负荷曲线的改善,能够在削峰填谷的同时提高系统运行的效益。文献[7-8]对源荷储三种微电网资源进行管理,然而模型侧重于对可控分布式电源的出力优化,所提出的模型主观性较强。文献[9]以系统的运行成本最小为目标函数,采用滚动优化的方法制订运行计划。目前大部分文献的研究更多侧重于分别优化微源或需求侧资源,少有针对源荷储进行协调优化,由于可再生能源出力具有随机性,而电力负荷具有波动性,为解决这一矛盾,需要在多时间尺度下,采取滚动优化的方式制订合理的能量管理计划。

针对上述研究的不足,本文从第一阶段和第二阶段两个角度出发,考虑源荷储的协调优化,针对智能建筑分别对系统各电源、负荷及储能设备的运行状态进行建模,在计及分时电价^[10]的基

础上,建立了两阶段多目标优化模型,在满足系统各运行约束的条件下,提高系统整体的经济性及用户的舒适度。

1 建筑能量系统

典型的智能建筑能量系统结构如图1所示,供能设备涵盖光伏发电、微燃机和锅炉。储能设备有电储能和电储能,此外还有一定容量的负荷并网,系统运行于并网状态。

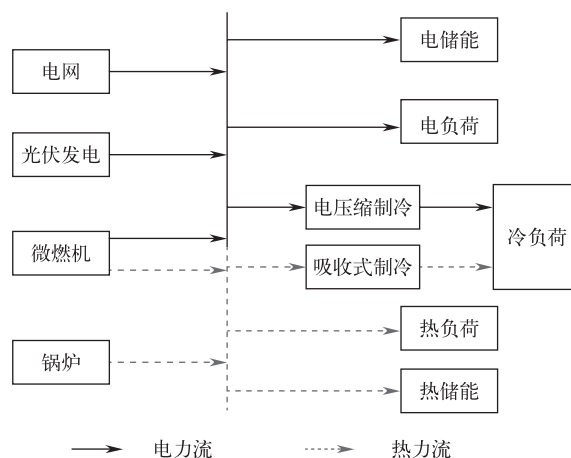


图1 商业智能建筑能量系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of commercial intelligent building energy system

系统中的燃气锅炉和微型燃气轮机的数学模型来源于文献[11]。电储能系统和热储能系统的数学模型来源于文献[12-13]。系统的负荷部分容量为可平移负荷^[14-15],主要指建筑内可以调控运行时间的负荷。

2 两阶段协调优化策略

根据优化模型决策的控制变量的不同,本文所提优化策略分为两个阶段,分别为第一阶段优化和第二阶段优化,优化原理结构如图2所示。其中,第一阶段优化为日前优化,第二阶段优化为实时优化。整个能量优化过程体现出一种多时间尺度特性。

本文制定的智能建筑能量控制多时间尺度滚动优化的步骤如下:

1) 以一天为调度周期,将周期内分为 T 个

日前调度时段,对次日光伏出力和负荷水平进行短期预测,采用第一阶段优化模型制定系统日前运行方案。

2) 在当前实时调度时段,以10个实时调度时段为滚动窗口,对该窗口内的系统光伏出力和负荷水平进行超短期预测,调用第二阶段优化模型制订当前窗口内的系统优化运行计划。

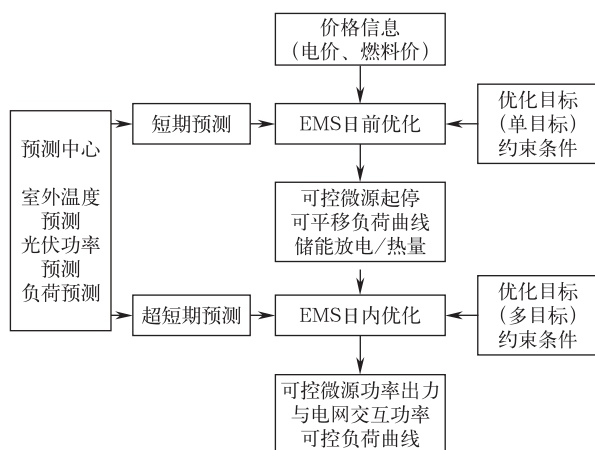


图2 两阶段优化结构图

Fig. 2 Dual-phase optimization chart

3 智能建筑微电网能量管理系统优化模型

3.1 第一阶段优化模型

3.1.1 目标函数

$$\min C = \sum_{t=1}^{24} [C_F(t) + C_{OM}(t) + C_{SC}(t) + C_{EX}(t) + C_{EN}(t)] \quad (1)$$

式中, C 为综合经济成本; $C_F(t)$ 、 $C_{OM}(t)$ 、 $C_{SC}(t)$ 、 $C_{EX}(t)$ 和 $C_{EN}(t)$ 分别为 t 时段的燃料、运行维护、机组起停、与电网交互功率和环保折算成本。

以上各项成本的计算方法可具体参考文献[16-18]。

3.1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_L(t) = P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{ES}(t) + P_{EX}(t) \quad (2)$$

$$Q_L(t) = Q_{MT}(t) + Q_{GB}(t) + Q_{HS}(t) \quad (3)$$

$$R_L(t) = R_H(t) + R_E(t) \quad (4)$$

式中, $P_L(t)$ 、 $Q_L(t)$ 和 $R_L(t)$ 分别为 t 时段的电、

热、冷负荷; $P_{PV}(t)$ 为 t 时段光伏发电功率; $P_{EX}(t)$ 为 t 时段电网交互功率; $R_H(t)$ 、 $R_E(t)$ 分别为 t 时段吸收式制冷以及压缩式制冷量。

2) 可控机组输出功率约束

$$P_{imin} \leq P_i(t) \leq P_{imax} \quad (5)$$

式中, $P_i(t)$ 为 t 时段可控机组 i 的出力; P_{imin} 为可控机组 i 的最小出力, P_{imax} 为可控机组 i 的最大出力。

3) 可控机组爬坡约束^[13]:

$$r_i^{down} \Delta t \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq r_i^{up} \Delta t \quad (6)$$

式中, r_i^{up} 、 r_i^{down} 分别为爬坡的上限和下限; Δt 为第一阶段优化调度时段的时长。

4) 与外网交互功率约束

$$P_{EXmin} \leq P_{EX}(t) \leq P_{EXmax} \quad (7)$$

式中, P_{EXmin} 为与外网交互功率下限; P_{EXmax} 为与外网交互功率上限。

5) 储能设备运行约束

$$P_{ESmin} \leq P_{ES}(t) \leq P_{ESmax} \quad (8)$$

$$Q_{HSmin} \leq Q_{HS}(t) \leq Q_{HSmax} \quad (9)$$

$$E_{ESmin} \leq E_{ES}(t) \leq E_{ESmax} \quad (10)$$

$$H_{HSmin} \leq H_{HS}(t) \leq H_{HSmax} \quad (11)$$

式中, $P_{ES}(t)$ 为 t 时段电储能充放电功率, 当大于零时表示放电; P_{ESmax} 和 P_{ESmin} 分别为电储能充放电功率的上下限; Q_{HSmin} 和 Q_{HSmax} 分别表示热储能的最小储热容量和最大储热容量; $E_{ES}(t)$ 为 t 时段电储能剩余电量; E_{ESmax} 和 E_{ESmin} 分别为储能剩余电量的上下限; $H_{HS}(t)$ 为 t 时段热储能的吸收热量, 小于零表示吸热; H_{HSmin} 和 H_{HSmax} 分别为热储能最小和最大吸热功率。

此外, 微电网还需要满足电储能电量与储能充放电关系约束, 在求解中电储能剩余电量以及储能运行计划均作为控制变量。该约束为

$$E_{ES}(t) = E_{ES}(t-1) + \mu_{ch} P_{ES}(t) \eta_{ch} \Delta t - \mu_{dis} \frac{P_{ES}(t)}{\eta_{dis}} \Delta t \quad (12)$$

式中, $E_{ES}(t)$ 为 t 时段储能的剩余电量; μ_{ch} 和 μ_{dis} 为储能的充电状态和放电状态, 充电时 $\mu_{ch}=1$ 、 $\mu_{dis}=0$, 放电时 $\mu_{ch}=0$ 、 $\mu_{dis}=1$; η_{ch} 为储能的充电效率; η_{dis} 为储能的放电效率。

同理，热储能运行满足以下的条件

$$Q_{HS}(t) = Q_{HS}(t-1) + \mu_{ab} H_{HS}(t) \eta_{ab} \Delta t - \mu_{re} \frac{H_{HS}(t)}{\eta_{re}} \Delta t \quad (13)$$

式中， μ_{ab} 和 μ_{re} 表示热储能的充放电状态，当热储能吸热时 $\mu_{ab}=1$ 且 $\mu_{re}=0$ ，放热时 $\mu_{ab}=0$ 且 $\mu_{re}=1$ ； η_{ab} 为热储能的吸热效率； η_{re} 为热储能的放热效率。

6) 可平移负荷的平移时长

$$t_{d\min} \leq t_d \leq t_{d\max} \quad (14)$$

式中， t_d 为第 d 类可平移负荷的启动时间； $t_{d\min}$ 为第 d 类可平移负荷的最小平移时长； $t_{d\max}$ 为第 d 类可平移负荷的最大平移时长。

7) 可平移负荷平移量约束^[6]

$$x_{t \rightarrow t'} \geq 0 \quad (15)$$

$$\sum_{t'=1}^T x_{t \rightarrow t'} = x_t \quad (16)$$

式中， x_t 为优化前 t 时刻可平移用电器数量； $x_{t \rightarrow t'}$ 为由 t 时刻平移到 t' 时刻的可平移用电器数量。

3.2 第二阶段优化模型

3.2.1 目标函数

1) 经济性优化目标

$$\min C = \sum_{t=1}^{10} [C_F(t) + C_{OM}(t) + C_{EX}(t) + C_{EN}(t)] \quad (17)$$

2) 舒适度优化目标

$$D_1(t) = 1 - \left(\frac{E(t) - E_{SET}}{E_{SET}} \right)^2 \quad (18)$$

式中， $D_1(t)$ 为 t 时段的照明舒适度； E_{SET} 为标准照度； $E(t)$ 为 t 时段照度值。

$$D_2(t) = 1 - \left(\frac{T_{room}(t) - T_{SET}}{T_{SET}} \right)^2 \quad (19)$$

式中， $D_2(t)$ 为 t 时段的温度舒适度； T_{SET} 为标准温度； $T_{room}(t)$ 为 t 时段温度值。

$$D_3(t) = 1 - \left(\frac{N(t) - N_{SET}}{N_{SET}} \right)^2 \quad (20)$$

式中， $D_3(t)$ 为 t 时段的空气质量舒适度； N_{SET} 为标准 CO_2 浓度； $N(t)$ 为 t 时段 CO_2 浓度值。

$$D(t) = \alpha D_1(t) + \beta D_2(t) + \gamma D_3(t) \quad (21)$$

式中， $D(t)$ 为 t 时段用户的舒适度； α 、 β 和 γ 根据用户的偏好设定，且满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ，本文中取 $\alpha = \beta = \gamma$ 。

$$D = \frac{1}{10} \sum_{t=1}^{10} D(t) \quad (22)$$

式中， D 为用户总体舒适度。

采用加权聚合法把目标归一化^[19]，具体如下

$$\min F = \mu C + \lambda(1 - \mu)(1 - D) \quad (23)$$

式中， μ 为多目标系数权重； λ 为量纲平衡系数。

3.2.2 约束条件

1) 室内照度约束

$$E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \quad (24)$$

式中， $E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别为照度的允许下限和允许上限。

2) 室内温度约束

$$T_{room\min} \leq T_{room}(t) \leq T_{room\max} \quad (25)$$

式中， $T_{room\min}$ 和 $T_{room\max}$ 分别为室内温度值的允许下限和允许上限。

3) 室内 CO_2 浓度约束

$$N_{\min} \leq N(t) \leq N_{\max} \quad (26)$$

式中， $N_{\min}$ 和 $N_{\max}$ 分别为室内 CO_2 浓度值的允许下限和允许上限。

第二阶段优化采用滚动优化形式，滚动窗口为10个调度时段，微电网能量管理中心随时更新滚动窗口内的超短期光伏预测数据以及超短期负荷水平数据，并依据第二阶段优化更新当前系统需要遵循的下一时段优化运行计划。

4 算例分析

本文以某并网型光伏智能建筑为研究对象，系统内包含光伏发电、电储能、燃气锅炉、热电联产和热储能等装置。各单元的运行参数如表1所示。通过能源优化控制，既可以提高能源的利用效率，又可以提高系统的经济性^[11]。

分时电价及各变量第一阶段、第二阶段预测值如图3所示。系统中可平移负荷工作连续时间为2 h，功率分别为0.4 kW和0.25 kW^[6]，设定的允许启动时间范围为8:00~16:00。

知量参与第二阶段优化,其值不随着第二阶段优化而改变。

4.2 第二阶段优化结果

方式2中,当权重系数 μ 为0.5时,第二阶段优化优化运行结果如图6~图9所示。

方式1及方式2下的系统经济性及舒适度结果如图10~图12所示。

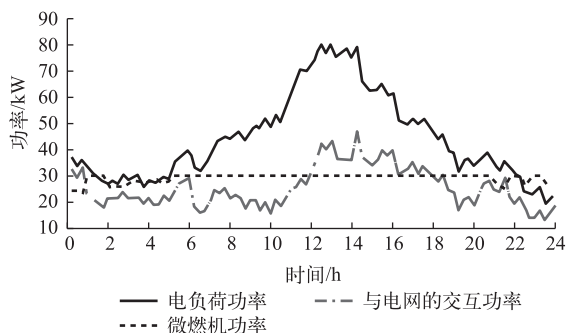


图6 电负荷平衡曲线优化结果

Fig. 6 The optimization results for power load balance

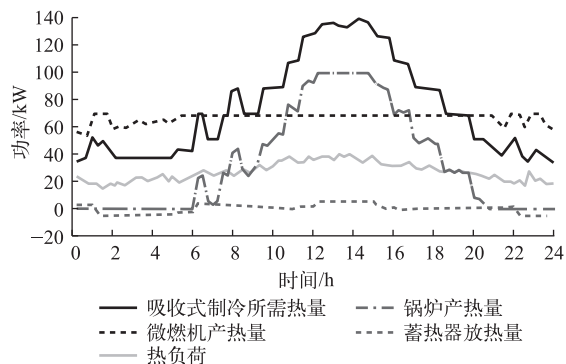


图7 热负荷平衡曲线优化结果

Fig. 7 The optimization results for heat load balance

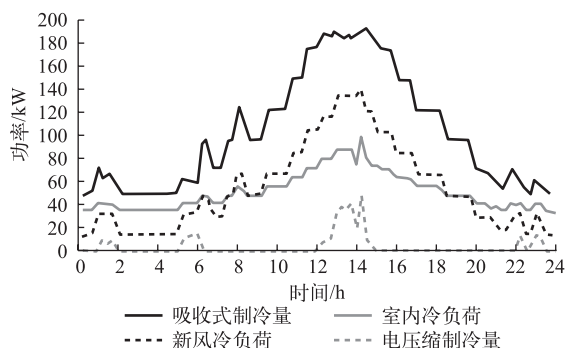


图8 冷负荷平衡曲线优化结果

Fig. 8 The optimization results for cooling load balance

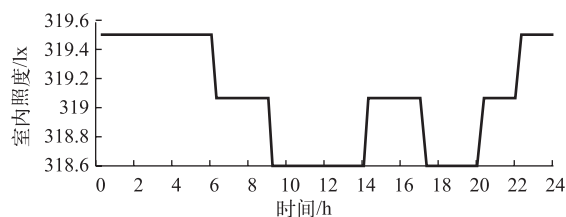
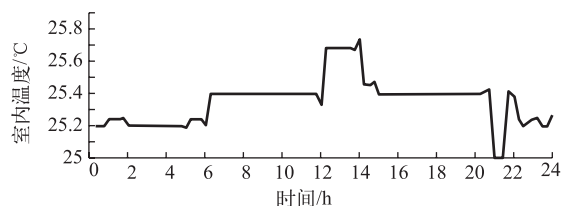
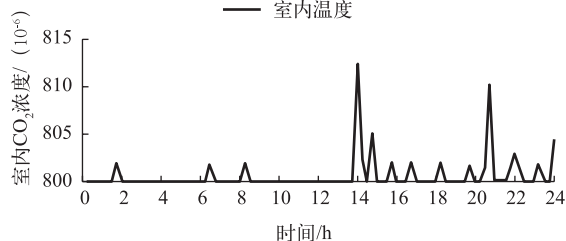


图9 室内环境参数优化结果

Fig. 9 The optimization results for indoor environmental parameters

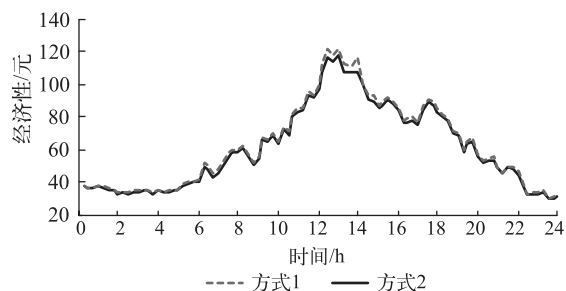


图10 两种方式下系统经济调度结果比较

Fig. 10 Comparison of the economic optimization results of the system under two modes of operation

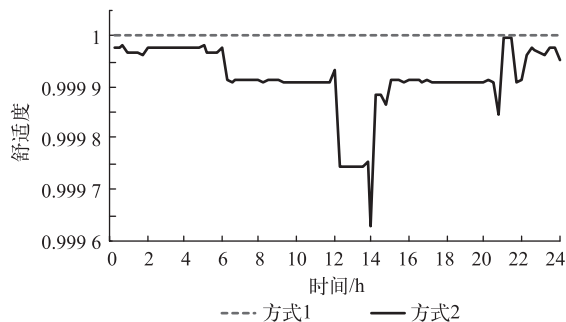


图11 两种运行方式下优化后系统舒适度比较

Fig. 11 Comparison of comfort optimization results of the system under two modes of operation

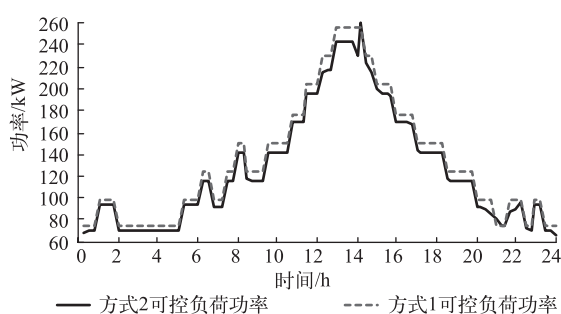


图12 两种运行方式下可控负荷功率曲线比较

Fig. 12 Comparison of controlled load power curves under two modes of operation

4.3 优化结果分析

1) 微燃机热电联产系统效率高, 系统经济性好, 始终处于开启状态, 在负荷逐渐增大时, 能量管理系统依序再启动锅炉系统, 优化能源运行。

2) 可平移负荷通过将负荷在时间上进行再分配可以优化负荷曲线, 改善经济性。

3) 光伏功率及负荷超短期预测相对于短期预测其准确度显著提高, 使优化更具实际意义。第一阶段优化从经济性的角度确定可控负荷起停状态、可平移负荷与储能装置充放, 第二阶段优化在第一阶段优化的基础上, 优化可控负荷的功率, 双阶段优化相互联系, 保证系统稳定经济运行。

4) 由图6~图9可知, 在高峰电价时段为了保证系统的经济性, 优化后的可控负荷值明显降低, 从而导致了室内环境参数的变化, 室内照度相对较低, 温度和CO₂浓度值相对较高。在处于低谷电价时, 照度相对较高, 温度和CO₂值较低, 保持了相对良好的室内环境舒适度。

5) 由图10~图12可知, 在电价高峰期, 方式2中第二阶段优化通过适当改变室内环境参数, 提升了优化指标。从表4可知, 在几乎不影响室内舒适度的情况下, 经济性得到了较大的提高。

6) 通过第一阶段优化和第二阶段优化双阶段优化相结合, 实现了源荷储的综合协同优化, 同时平衡了系统经济性和优化舒适度之间的关系, 使系统内各单元的运行状态达到最优, 能耗

及舒适度各项指标达到最优。

表4 两种运行方式下的优化结果对比

Tab. 4 Comparison of the optimization results under two operating modes

优化结果	方式1	方式2
能耗成本 / 元	1 312.69	1 277.98
运行维护成本 / 元	39.16	38.18
环保折算成本 / 元	153.42	149.72
总成本 / 元	1 505.26	1 465.88
舒适度指标	1	0.998 0

5 结束语

本文采用两阶段优化理论建立了商业智能建筑能量系统优化运行模型, 其中第一阶段优化计及分时电价, 并考虑系统运行的经济性; 而第二阶段优化在第一阶段优化的基础上, 考虑各项指标舒适度, 综合优化系统内各电源、储能及负荷的运行状态, 通过滚动运行的方式实现了系统实时运行计划。

参考文献

- [1] RIM MISSAOU, HUSSEIN JOUMAA, STEPHANE PLOIX, et al. Managing energy smart homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System[J]. Energy and Buildings, 2014, 71(3): 155-167.
- [2] 孙宏斌, 张伯明, 吴文传, 等. 自律协同的智能电网能量管理系统家族: 概念、体系架构和示例[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 1-6.
- [3] 楚晓华. 智能公共建筑能量管理系统控制优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [4] 李鹏, 徐伟娜, 周泽远, 等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3073-3079.
- [5] 江岳春, 王志刚, 杨春月, 等. 微网中可控负荷的多目标优化策略[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2875-2880.
- [6] 符杨, 蒋一镒, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的微网经济优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2612-2620.
- [7] 何舜, 郑毅, 蔡旭, 等. 微网能源系统的滚动优

- 化管理[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2349-2355.
- [8] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12, 133.
- [9] JOM K. GRUBER, F. HUERTA, P. MATATAGUI, et al. Advanced building energy management based on a two-stage receding horizon optimization[J]. Applied Energy, 2015, 16(15): 194-205.
- [10] DI ZHANG, NILAY SHAH, LAZAROS G. PAPPAGEORGIOU. Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74期: 209-222.
- [11] 廖名洋. 含CCHP的微网经济运行优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [12] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 122-129.
- [13] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015(14): 3569-3576.
- [14] 于雷, 汤庆峰, 张建华. 基于负荷资源分类建模和启发式策略的家居型微电网优化运行[J]. 电网技术, 2015(8): 2180-2187.
- [15] 周磊, 李扬. 分时电价环境下基于家居能量管理系统的家居负荷建模与优化运行[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 367-374.
- [16] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-66.
- [17] 魏小曼, 余昆, 陈星莺, 等. 基于Affinity propagation和K-means算法的电力大用户细分方法分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 15-19, 35.
- [18] 周磊, 吴辉, 嵇文路, 等. 微电网脆弱性预评估方法[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 20-24.
- [19] YANG Rui, Wang Lingfeng. Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control[J]. Sustainable Cities and Society, 2012, 2(1): 1-7.

作者简介

王穆青(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为能源互联网、微电网和电力市场。

(收稿日期: 2021-04-13)