

DOI: 10.7667/PSPC171221

# 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热 储能设备综合优化配置

郑国太<sup>1</sup>, 李昊<sup>1</sup>, 赵宝国<sup>2</sup>, 吴邦旭<sup>3</sup>, 霍现旭<sup>2</sup>, 唐巍<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010;  
3. 中国农业大学, 北京 100083)

**摘要:** 针对智慧城市背景下用户侧综合能源系统中电/热储能综合优化配置问题研究不足的现状, 从供需能量平衡角度出发, 考虑电能替代和冷/热/电耦合, 建立了综合能源系统中储能设备的综合优化配置模型。采用 K-means 聚类算法对用户侧的用能需求进行分析并归纳出典型场景。储能配置考虑典型日系统运行优化调度。以综合能源系统年运行费用最低为目标建立电/热储能综合配置优化模型。约束条件考虑了供需平衡、冷/热/电耦合、电能替代、设备安装运行等多种影响因素。优化变量为电/热储能设备的容量以及系统典型场景内设备调度值。算例分析表明所提方法合理可行, 在保障系统运行安全性和可靠性的基础上具有明显的经济性。考虑电能替代不仅有利于环境保护, 而且可以降低储能配置成本。

**关键词:** 综合能源系统; 供需能量平衡; 冷/热/电耦合; 储能配置; 电能替代

## Comprehensive optimization of electrical / thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance

ZHENG Guotai<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, ZHAO Baoguo<sup>2</sup>, WU Bangxu<sup>3</sup>, HUO Xianxu<sup>2</sup>, TANG Wei<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute Ltd., Beijing 100192, China; 2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 3. China Agriculture University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Due to the situation that the integrated optimization configurations of electric and thermal energy storage are not given full consideration in the Integrated Energy System (IES) near user side under the background of smart city, a model which can deploy electric and thermal energy storage equipments synthetically is established based on energy supply and demand balance, considering electric power alternative and combined cooling heating and power. In this paper, some typical scenes are obtained with the researches on the users' energy demand through the K-Means clustering algorithm. The optimization and allocation of energy storage devices are considered along with the optimized dispatch of IES in a typical day. A comprehensive configuration optimization model of electric/thermal energy storage can be established based on the minimum annual operating cost of the IES. The constraints consider the balance of supply and demand, cold/thermal/electric coupling, power substitution, equipment installation and operation, etc. The optimal variables conclude the capacity of the power/thermal energy storage device and the equipment dispatch value in the typical scene of the system. The simulation results indicate that the strategy is reasonable and feasible which has obvious economical efficiency on the basis of ensuring the system's safety and reliability. Considering power substitution is not only beneficial to environmental protection, but also can reduce the cost of energy storage allocation.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. SGTJDKOODWJS1700027).

**Key words:** integrated energy system; energy supply and demand balance; combined cooling heating and power; energy storage configuration; electric power alternative

## 0 引言

21 世纪以来, 环境污染、能源安全和能源效率

等问题为能源领域的发展带来了诸多挑战。传统能源系统随着新能源比重不断扩大, 用户能源需求越来越多元化, 其基本特征正在发生变化, 一方面, 能源供给侧的随机性波动增多, 可控性下降; 另一方面, 能源需求侧的负荷种类更加多样化, 包括家用电器、电动汽车和电动机等, 冷/热/电耦合程度

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (SGTJDKOODWJS 1700027)

日益加深, 导致需求波动也大不相同。如何平抑功率波动并保证供需能量平衡是亟待解决的问题。面向智慧城市的综合能源系统(Integrated Energy System, IES)旨在通过开源和节流来实现能源的可持续发展, 正在成为世界范围内的一大研究热点<sup>[1]</sup>。储能设备作为综合能源系统的重要组成单元, 能够实现能量的跨时段转移, 削峰填谷, 协调网络内的“源-荷”间不平衡, 是平滑新能源出力 and 抑制可再生能源功率波动的有效手段<sup>[2-3]</sup>, 因此, 针对综合能源系统进行储能配置需要合理有效的优化模型。随着我国环境污染和北方雾霾问题的加剧, 国家电网在 2013 年提出并实施了“电能替代”战略: 以电代煤、以电代油、以电代气, 在用户终端用电替代直燃油、煤等化石燃料, 优先消费电能, 减少 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[4]</sup>。实施电能替代战略能够改善环境, 促进我国电气化事业的发展。用户侧综合能源系统中含有大容量燃气设备, 是应用电能替代策略的适宜场景。随着 IES 的飞速发展, 未来的储能配置还需将电能替代政策纳入影响因素中。

在实际工程应用中, 储能的优化配置不仅是制定合理控制策略的前提, 还是系统稳定运行的基础, 并且恰当的选址和定容也有利于储能充分发挥作用。根据不同的应用场景研究储能的优化配置, 挖掘其潜在价值, 具有重要的理论和实践意义<sup>[5]</sup>。目前, 这方面的研究主要集中于微电网, 且更偏向于储电设备的优化配置, 如蓄电池、超级电容器等。文献[6]为了准确分析含多种分布式电源的微网储能优化配置方案, 建立了基于经济调度并计及制热收益的热电联产型微网蓄电池优化配置模型; 文献[7]针对含风力发电机、光伏、储能的并网型微电网, 引入需求侧响应机制, 建立了微网混合储能优化配置模型。该模型中的混合储能采用蓄电池和超级电容器, 但并没有涉及储热设备。储热技术虽然有很长的发展历史, 但是其实际应用局限于低品位热能的储存和利用, 如暖气和热水供应。近年来, 由于可再生能源和分布式能源发展迅猛等原因, 有关高品位储热技术和余热回收利用的研究才逐渐增多, 且研究多基于电力系统与热力系统的结合。文献[8-9]从解耦热电耦合约束角度出发, 提出了基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度的模型。文献[10]提出基于热电联合调度的弃风电储热供热技术方案, 储热体采用相变储热。这些研究多集中于高新储热技术和应用储热后带来的系统整体效益, 忽略了储热设备容量的优化配置问题。随着用户侧的能源需求越来越多元化, 综合能源系统的普及, 以及不同形式的能源之间的耦合日益密切,

电/热混合储能的综合优化配置将成为新的发展趋势。目前已有一些有关综合能源系统中电/热储能综合配置的研究。文献[11]综合分析了电力系统和热力系统的差异性与互补性, 研究了不同场景下两种储能装置的优化设计方法和协调优化控制策略, 但是没有提出综合配置电/热储能的数学模型。文献[12]研究不同能源和多能流的互补规划, 提出一种更加完善的 IES 模型, 加入储电和储热设备, 相比传统供能模式和常规 CCHP 系统更加经济高效。文献[13]研究 IES 中可再生能源的高效利用问题, 通过建立混合整数线性规划模型, 以系统运行的经济成本最低为目标, 对系统内的各类设备进行优化配置, 分析了储电/热设备在系统中的作用。该研究中利用了蒙特卡洛模拟算法进行场景分析, 变量多, 计算量大, 求解有一定的困难。

综上所述, 多能互补和多能流协调优化是综合能源系统的内涵和架构, 在综合能源系统中考虑电/热/冷耦合进行储能综合配置研究, 才能满足智慧城市将来的发展需要<sup>[14]</sup>。在我国加快推进“电能替代”战略的宏观背景下, 用户侧综合能源系统具有巨大的电能替代潜力, 目前针对 IES 考虑电能替代对储能综合配置的影响还没有研究。针对以上问题, 本文面向智慧城市科技园区办公楼, 基于供需能量平衡和电/热/冷/耦合, 研究考虑了电能替代的用户侧综合能源系统储能设备优化配置方法。首先, 分析用户侧综合能源系统的结构, 获取系统设备的数学模型; 其次, 以系统经济成本最小为目标, 建立配置储能设备的 0-1 混合整数线性规划模型; 最后, 采用 Matlab 编程结合数学规划软件 Cplex 求解模型, 得到优化配置结果。

## 1 IES 分析

### 1.1 IES 整体结构

用户侧综合能源系统一般可以划分为 5 个单元, 分别为能量生产单元、能量转换单元、能量存储单元、能量传输单元和用能单元。图 1 为智慧城市用户侧综合能源系统的简单结构图, 系统由上级电网输入电能, 同时从外部获取可再生能源和天然气。

能量生产单元一般包括燃气轮机、燃气锅炉和光伏发电装置等各种分布式发电、产热装置。该单元主要利用天然气、太阳能等一次能源, 生产用户所需的电能和热能。

能量转换单元一般包括热泵、溴化锂吸收式制冷机和电制冷机等。该单元将不同形式的能量进行转换, 使不同能流相互衔接, 满足用户的多元能源

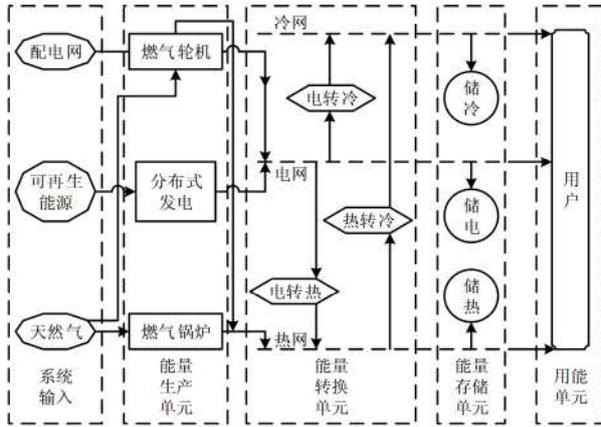


图 1 用户侧综合能源系统的结构

Fig. 1 Structure diagram of IES near user side

需求。能量转换一般遵循从高品质能向低品位能转变的规律，电、热、冷三种能量的品味逐次降低。

所以，能量转换单元的输入一般为电和热，而输出一般为热和冷。能量存储单元一般包括蓄电池和蓄水罐等，分别储电和储热/冷。该单元充分消纳系统产能，实现能量的跨时段转移，平衡负荷，削峰填谷。

能量传输单元通常为电力线路和热网管道等。在综合能源系统中，线路及管道连接各个设备，将具有不同作用的单位有机连结形成一个整体。

用能单元即系统终端的用户。用户的能源需求通常为电、热、冷三种，电能需求即各种办公及家用电器、电动机和电动汽车；热/冷需求即冬季采暖和夏季制冷。

## 1.2 IES 常见设备运行特性

### 1.2.1 能量生产单元

#### 1) 燃气轮机

燃气轮机以天然气为燃料，通过连续流动的气体工质带动叶轮旋转做功发出电力，燃烧时排出的高温余热烟气经换热器回收可进行二次利用，有效地提高能源利用效率。燃气轮机的天然气消耗量和余热回收量的表达式分别为

$$\begin{cases} f_{ti}^{GT} = (a_1 p_{ti}^{GT} + a_2 x_{ti}^{GT}) / v_{LHV} \\ h_{ti}^{GT} = b_1 p_{ti}^{GT} + b_2 x_{ti}^{GT} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $f_{ti}^{GT}$ 、 $h_{ti}^{GT}$ 、 $p_{ti}^{GT}$  分别表示  $t$  时刻用户侧综合能源系统中的第  $i$  个燃气轮机的天然气消耗量、余热回收量和发电功率； $v_{LHV}$  为天然气的低热值； $x_{ti}^{GT}$  为燃气轮机调度因子，因燃气轮机启动时最小负荷率不为 0，所以需要调度因子来表征其是否运行，该因子为 0-1 变量，取值为 0 时表示燃气轮机关机，取值为 1 时表示燃气轮机投入使用； $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$

为系数。

#### 2) 燃气锅炉

燃气锅炉燃料为天然气，将所盛装的液体加热并对外输出热能。因其投资成本低，操作灵活，维修简单，所以是综合能源系统中常用的热源。其简单数学模型可以表示为

$$h_t^{GB} = \frac{f_t^{GB} \eta_B}{v_{LHV}} \quad (2)$$

式中： $h_t^{GB}$  表示  $t$  时刻系统中燃气锅炉的供热量； $\eta_B$  为系数，表示天然气的化学能转化为可利用热能的效率。

#### 3) 光伏发电装置

光伏发电装置利用太阳能进行发电，其出力表达式可以表示为

$$p_t^{PV} = \frac{p_{stc} G_t}{G_{stc}} \quad (3)$$

式中： $p_t^{PV}$  表示  $t$  时刻系统中的光伏发电装置的发电功率； $G_t$  表示  $t$  时刻系统中的光照强度； $p_{stc}$  和  $G_{stc}$  分别表示标准条件下的光伏发电装置出力和光照强度。

### 1.2.2 能量转换单元

热泵可以通过消耗电能，将从外界获取的低位热能转换成高品质热能供给用户；电制冷机则主要依靠电动机驱动压缩机做功，促使工质完成一系列的热交换达到制冷的目的。不同能量之间的转换存在一定的效率，该效率虽然不为常数，但是通常在设备稳定运行时其变化幅度并不大，参考相关文献可以将其视作常数处理<sup>[15]</sup>，因此可以将能量转换单元的数学模型简单表示为

$$q_{t,s}^{out} = q_{t,s}^{in} \eta_s \quad (4)$$

式中： $q_{t,s}^{out}$ 、 $q_{t,s}^{in}$  分别表示  $t$  时刻系统中的第  $s$  个能量转换设备的输入和输出； $\eta_s$  表示能量的转换效率。

### 1.2.3 能量存储单元

蓄电池和蓄水罐是综合能源系统中较常用的储能装置。考虑到储能设备的能量耗散和使用中的充放电，将能量存储单元的数学模型表示为

$$\begin{cases} E_t = (1 - \tau) E_{t-1} + (p_t^{ch} \eta_{ech} - \frac{p_t^{dis}}{\eta_{edis}}) \Delta t \\ H_t = (1 - \mu) H_{t-1} + (h_t^{ch} \eta_{hch} - \frac{h_t^{dis}}{\eta_{hdis}}) \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中： $E_t$ 、 $H_t$  分别为  $t$  时刻系统中的储能设备存储的电能和热能； $\tau$ 、 $\mu$  分别为电能和热能的耗散率； $p_t^{ch}$ 、 $p_t^{dis}$ 、 $\eta_{ech}$ 、 $\eta_{edis}$  分别为储电设备的充放电功

率和充放电效率;  $h_t^{\text{ch}}$ 、 $h_t^{\text{dis}}$ 、 $\eta_{\text{hch}}$ 、 $\eta_{\text{hdis}}$  分别为储热设备的充放热功率和充放热效率;  $\Delta t$  为充能或放能时长。

#### 1.2.4 能量传输单元

本文考虑了电和热两种能量的传输, 电能通过电力线路进行传输, 热能则通过热网管道输送。输送的过程中伴有能量的损耗。

## 2 IES 中的能量需求和电能替代分析

园区作为智慧城市中能耗的主要聚集地, 其能源需求主要有电、热、冷。园区内多为同种产业的工厂、仓储或办公楼, 需求侧的负荷特性在空间上的差异性较小, 但是时序特性较为明显, 并且这种时序特性既有日内的变化, 也有年内的季节性差异, 因此, 在没有天气突变的几天时间里, 用户的能源需求不会有太大差别; 在没有气候突变的连续几年内, 用户的能源需求数额递增但时序特征不会有较大变化。对于这类负荷, 可以采用聚类分析方法建立园区用户侧用能需求的典型场景。

基于上述考虑, 本文采用 K-means 聚类算法对需求侧进行负荷数据分析处理<sup>[16]</sup>。数据来源为某科技园区 1 年内以小时为跨度的实际用户负荷数据集。对负荷进行异常数据的识别修正、数据归一化等预处理后, 通过 K-means 算法进行聚类, 得到 3 个典型场景, 根据主要负荷特点分别称之为供冷季、供暖季和过渡季。

由于本文在分析需求侧负荷时采用的时间尺度为 1 h, 所以需要考虑供给侧的设备在 1 h 内的响应能力。储能设备中, 蓄电池的响应速度为分钟级<sup>[17]</sup>。燃气轮机启停迅速且爬坡卸荷速度快, 具有很强的变负荷运行能力, 其正常启动时间从 20 s 至 5 min 不等, 出力加载速率可达 40 MW/min<sup>[18]</sup>。总之, 以 1 h 为基本时间尺度时, 系统供给侧设备的响应能力都能满足要求。

智慧城市内用户侧于供暖季存在大量的热能需求, 燃气锅炉作为综合能源系统中主要的供暖设备, 需要消耗大量的燃料, 易对当地环境造成污染。环境问题是能源改革的重要原因之一, 近年来愈发严重。电能替代是当前结合我国国情推出的改善温室气体污染的有效手段。从供给端的清洁能源替代, 到中间环节储能设备的优化配置, 再到需求端的负荷替代, 综合能源系统能够多维度地响应电能替代的战略。

在用户侧综合能源系统供能端, 可减少燃气设备的使用(如燃气锅炉), 改用电能集中制热供暖。

在用户侧综合能源系统用能端, 随着科技的发

展, 各种高效的电采暖装置进入千家万户, 用户的电气化程度不断提高。本文分别在用能端和供能端引入了“电能替代”, 实现热负荷向电负荷的转移, 并分析电能替代对储能设备优化配置的影响。

## 3 IES 电/热储能设备综合配置模型

### 3.1 总体思路

针对智慧城市科技园区用户侧综合能源系统, 在综合了经济、社会、环境和设备运行特性等影响因素的基础上, 以系统年费用最低为目标, 计及供需能量平衡、设备安装运行和电网电力传输等约束条件, 同时充分考虑冷/热/电耦合和电能替代, 建立综合配置电/热储能设备的 0-1 混合整数线性规划模型。所建模型的应用场景为科技园区办公楼, 已安装燃气轮机、燃气锅炉、光伏发电装置、电制冷机和热泵等设备, 需要配置蓄电池和蓄水罐两种储能装置。

### 3.2 目标函数

模型以综合能源系统运行的年费用最低为目标函数, 年费用主要包括储能设备投资成本、燃料成本、运行维护成本、购电成本和碳税成本。另外国家政策对电能替代有相应的补贴, 其表达式为

$$\min F(x) = \xi_{\text{Cap}} + \xi_{\text{Fuel}} + \xi_{\text{Om}} + \xi_{\text{Grid}} + \xi_{\text{Env}} - \xi_{\text{Sub}} \quad (6)$$

式中:  $\xi_{\text{Cap}}$ 、 $\xi_{\text{Fuel}}$ 、 $\xi_{\text{Om}}$ 、 $\xi_{\text{Grid}}$ 、 $\xi_{\text{Env}}$  分别表示投资成本、燃料成本、运行维护成本、购电成本和碳税成本, 其中,  $\xi_{\text{Grid}}$  为负数时表示售电收益;  $\xi_{\text{Sub}}$  表示电能替代的政策补贴, 根据国家发展改革委、能源局等 8 个部门联合印发的《关于推进电能替代的指导意见》, 本文采用免收从电网购电产生的碳税费用作为政策补贴方式。

#### 1) 投资成本

投资成本即蓄电池和蓄水罐的购买和安装成本, 按其使用寿命, 将投资费用化成等年值。考虑其安装容量和单位容量成本, 该项成本为

$$\xi_{\text{cap}} = \sum_s \psi_s C_s \omega_s^{\text{Cap}} \quad (7)$$

式中:  $\psi_s$  为设备的贴现率;  $C_s$ 、 $\omega_s^{\text{Cap}}$  分别为系统中第  $s$  个设备的安装容量和单位容量成本。

#### 2) 燃料成本

综合能源系统中运行时所需燃料为天然气, 该项成本为

$$\xi_{\text{Fuel}} = \zeta_F \sum_{t,s} f_{t,s} \quad (8)$$

式中,  $\zeta_F$  为天然气的价格。

#### 3) 运行维护成本

运行维护成本除了新配置的储能设备, 还包括

已经安装的设备。考虑到设备的运行维护与其工作时长和输出功率有关系, 可得该项成本为

$$\xi_{\text{Om}} = \sum_{t,s} (P_{t,s}^{\text{out}} \omega_s^{\text{OM}}) \quad (9)$$

式中:  $P_{t,s}^{\text{out}}$  表示  $t$  时刻系统中第  $s$  个设备的输出功率;  $\omega_s^{\text{OM}}$  表示该设备的单位输出运行维护成本。

#### 4) 购电成本

当分布式能源系统产电不足以供给区域消耗时, 需要向电网买电, 反之, 当其发电量充裕, 且有剩余时, 可以卖给电网以获取收益, 降低系统成本, 该项成本为

$$\xi_{\text{Grid}} = \sum_t (p_t^{\text{buy}} \omega_t^{\text{buy}} - p_t^{\text{sel}} \omega_t^{\text{sel}}) \quad (10)$$

式中:  $p_t^{\text{buy}}$ 、 $p_t^{\text{sel}}$  分别表示  $t$  时刻系统向电网买卖的功率;  $\omega_t^{\text{buy}}$ 、 $\omega_t^{\text{sel}}$  分别表示买卖电时的单位电价。

#### 5) 碳税成本

由于全球变暖的影响, 国家制定政策对  $\text{CO}_2$  的排放进行征税, 希望削减碳排放量来保护环境。该项成本为

$$\xi_{\text{Env}} = \omega^{\text{Ctax}} (E_f \nu_{\text{LHV}} \sum_{t,s} f_{t,s} + E_{\text{Grid}} \frac{\sum_t p_t^{\text{buy}}}{\eta_{\text{Grid}}}) \quad (11)$$

式中:  $E_f$ 、 $E_{\text{Grid}}$  分别为天然气和电厂单位产能的二氧化碳排放量;  $\eta_{\text{Grid}}$  为电网的传输效率;  $\omega^{\text{Ctax}}$  为碳税。

### 3.3 约束条件

智慧城市科技园区综合能源系统中储能设备在实际规划运行中受多种因素的制约, 如社会环境、设备运行特性、经济成本等, 在本文所建模型中表现为一系列的约束条件。

#### 1) 供需能量平衡约束

根据第 2 节的需求侧分析, 能量供需平衡约束需考虑三种用能需求和三个典型场景。

$$p_t + x_{\text{Seal}} \mu \Delta p_t = \sum_m P_{t,m}^{\text{OUT}} - \sum_n p_{t,n}^{\text{in}} + \quad (12)$$

$$(p_t^{\text{buy}} - p_t^{\text{sel}}) + (p_t^{\text{dis}} - p_t^{\text{ch}})$$

$$p_t = \sum_m P_{t,m}^{\text{OUT}} - \sum_n p_{t,n}^{\text{in}} + (p_t^{\text{buy}} - p_t^{\text{sel}}) + (p_t^{\text{dis}} - p_t^{\text{ch}}) \quad (13)$$

$$x_{\text{Seal}} (h_t - x_{\text{Seal}} \Delta p_t) = x_{\text{Seal}} (\sum_m h_{t,m}^{\text{OUT}} - \sum_n h_{t,n}^{\text{in}} + (h_t^{\text{dis}} - h_t^{\text{ch}})) \quad (14)$$

$$(1 - x_{\text{Seal}}) c_t = (1 - x_{\text{Seal}}) (\sum_m c_{t,m}^{\text{OUT}} + (c_t^{\text{dis}} - c_t^{\text{ch}})) \quad (15)$$

式(12)为考虑用能端电能替代方式下的电能平衡关系; 式(13)为考虑供能端电能替代方式下的电能平衡关系。

以上式中,  $x_{\text{Seal}}$  是场景因子, 为 0-1 变量, 取 1 时表示供暖季, 取 0 时表示供冷季, 非过渡季时只

计电功率平衡约束;  $p_t$  为用户侧的纯用电负荷;  $\Delta p_t$  为  $t$  时刻用户侧热负荷中被替代的量;  $\mu$  表示电/热负荷之间的替代系数;  $P_{t,m}^{\text{OUT}}$  表示  $t$  时刻系统中的第  $m$  个产电单元的输出功率;  $p_{t,n}^{\text{in}}$  表示  $t$  时刻系统中的第  $n$  个能量转换设备的输入电功率。热功率、冷功率分别用  $h$ 、 $c$  表示, 其上下标含义与电功率相似。

#### 2) 供能端电能替代量约束

本文考虑两种方式的电能替代, 一是在用户侧综合能源系统的供能端, 通过对燃气设备的电力化改造, 提高电能的使用率。另一种是在用能端, 通过政府补贴电力设备更换的费用, 推进末端的负荷替代。

本文所建模型考虑了电能替代对综合能源系统储能配置的影响, 其中, 在供能端, 替代量的约束为

$$0 \leq \Delta p_t < h_t^{\text{Win}} \quad (16)$$

式中:  $\Delta p_t$  为  $t$  时刻用户侧热负荷中用电能替代的量;  $h_t^{\text{Win}}$  为供暖季用户侧的热负荷。电能替代量的上限与地区发展状况有关, 依赖特定的用户能源需求, 没有统一确定的值, 本文暂以最大可替代的热负荷值为上限处理。

#### 3) 设备安装和运行约束

首先, 对于 IES 系统内已安装好的能量生产单元和能量转换单元, 其设备运行出力约束为

$$x_{t,s} (C_s \chi_s^{\text{min}}) \leq Q_{t,s}^{\text{out}} \leq x_{t,s} (C_s \chi_s^{\text{max}}) \quad (17)$$

式中:  $\chi_s^{\text{min}}$ 、 $\chi_s^{\text{max}}$  分别表示系统中第  $s$  个设备的最小和最大负荷率。

另外, 燃气轮机的爬坡约束为

$$\begin{cases} P_t^{\text{GT}} - P_{t-1}^{\text{GT}} \leq P^{\text{UP}} \\ P_{t-1}^{\text{GT}} - P_t^{\text{GT}} \leq P^{\text{DOWN}} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $P_t^{\text{GT}}$ 、 $P_{t-1}^{\text{GT}}$  分别表示燃气轮机  $t$  时刻和  $t-1$  时刻的出力功率;  $P^{\text{UP}}$  表示燃气轮机在 1 h 内的最大功率增幅;  $P^{\text{DOWN}}$  表示燃气轮机在 1 h 小时内的最大功率降幅。

其次, 对于需要配置的能量存储单元, 其设备安装和运行存在多种约束。

安装容量约束为

$$0 \leq C_s \leq C_s^{\text{max}} \quad (19)$$

式中,  $C_s^{\text{max}}$  表示该储能设备的安装容量上限。

储能设备输入输出约束为

$$\begin{cases} x_t^{\text{ch}} (C_s \delta_s^{\text{min}}) \leq Q_{t,s}^{\text{ch}} \leq x_t^{\text{ch}} (C_s \delta_s^{\text{max}}) \\ x_t^{\text{dis}} (C_s \delta_s^{\text{min}}) \leq Q_{t,s}^{\text{dis}} \leq x_t^{\text{dis}} (C_s \delta_s^{\text{max}}) \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $\delta_s^{\text{min}}$ 、 $\delta_s^{\text{max}}$  分别表示系统中第  $s$  个储能设备

的最小和最大 SOC 值;  $x_t^{\text{ch}}$ 、 $x_t^{\text{dis}}$  分别为储能设备的充放因子, 为 0-1 变量, 取 0 时表示设备没有进行充能或放能, 取 1 时表示设备在充能或放能;  $Q_{t,s}^{\text{ch}}$ 、 $Q_{t,s}^{\text{dis}}$  分别为储能设备的输入和输出功率。

对于储能单元, 当要求以 1 天为 1 个周期时, 每个周期的结束时刻  $t_N$ , 储能单元的储能量等于该周期开始时刻  $t_0$  的储能量。

$$\begin{cases} E_{t_0} = E_{t_N} \\ H_{t_0} = H_{t_N} \\ C_{t_0} = C_{t_N} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $E_{t_0}$ 、 $H_{t_0}$ 、 $C_{t_0}$  分别表示周期初始时刻的储电、储热和储冷量;  $E_{t_N}$ 、 $H_{t_N}$ 、 $C_{t_N}$  分别表示周期结束时刻的储电、储热和储冷量。另外, 同一时间储能单元不能既充能又放能, 所以还有如下约束:

$$x_t^{\text{dis}} + x_t^{\text{ch}} \leq 1 \quad (22)$$

4) 与上级电网的传输电力约束

综合能源系统视自身电能盈亏, 可以与上级电网进行交易。交易时单位时间内的购电售电量受电力线路等原因限制, 有一定的上限。

$$\begin{cases} 0 \leq p_t^{\text{buy}} \leq p^{\text{b-MAX}} \\ 0 \leq p_t^{\text{sell}} \leq p^{\text{s-MAX}} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $p^{\text{b-MAX}}$ 、 $p^{\text{s-MAX}}$  分别为单位时间内购买电量和销售电量上限。

### 3.4 求解算法

本文研究的储能设备优化配置问题是一个 0-1 混合整数线性规划问题, 该线性规划的模型标准形式为

$$\begin{cases} \min F(x) \\ \text{s. t. } h_i(x) = 0, i = 1, \dots, m \\ g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, n \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ x_k \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $x$  为待优化的变量;  $\min F(x)$  表示目标函数;  $h_i(x) = 0$  表示等式约束条件;  $g_j(x) \leq 0$  表示不等式约束条件;  $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$  分别表示变量下限和上限;  $x_k \in \{0, 1\}$  表示部分变量为 0-1 变量。

在式(21)中, 由于存在两个待求变量的乘积, 导致了上述模型的非线性, 因此需要对其进行处理, 将式(21)转化为

$$\begin{cases} -Q_{t,s}^{\text{out}} + Mx_{t,s} \leq N \\ Q_{t,s}^{\text{out}} - Mx_{t,s} \leq 0 \\ 0 \leq Q_{t,s}^{\text{out}} \leq C_s \chi_s^{\text{max}} \\ M - N = C_s \chi_s^{\text{min}} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $M$ 、 $N$  都为很大的正数;  $x_{t,s}$  为 0-1 变量。

目前, 对于混合整数线性规划模型有多种软件可以求解, 例如 Cplex、GLPK、LPSolve 和 Yalmip。本文采用 Matlab 编程结合 Cplex 进行求解。

## 4 算例分析

### 4.1 算例介绍

本文算例以北方某科技园区办公楼为对象, 能源需求为冷、热、电。园区综合能源系统中已安装的能量生产单元有燃气轮机、光伏发电装置和燃气锅炉, 能量转换单元有电制冷机和热泵, 设备安装容量及其相关参数见表 1<sup>[12,19-20]</sup>, 算例系统的实际结构如图 2 所示。

表 1 园区综合能源系统已有设备参数

Table 1 Parameters of existing devices in the IES

设备	投资/ (元/kW)	维护/ (元/kW)	寿命/ 年	效率	安装 容量/kW
燃气轮机	7 900	0.025	25	—	65
燃气锅炉	340	0.02	20	0.91	350
光伏发电	10 000	0.01	25	—	200
电制冷机	1 100	0.01	20	3.1	1 200
热泵	3 000	0.009 7	20	4.4(热)/ 5(冷)	100

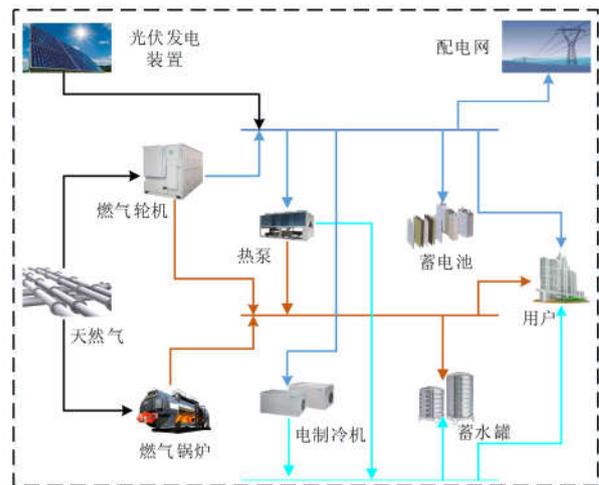


图 2 算例系统的实际结构图

Fig. 2 Actual configuration diagram of the system operator

燃气轮机拟选 Capstone C200 型, 根据其技术手册获取相关数据, 在 Matlab 中进行拟合可以得到

其数学模型式(1)中的系数为： $a_1=2.6428$ 、 $a_2=66.2049$ 、 $b_1=1.5245$ 、 $b_2=34.1968$ 。另外，燃气轮机的负荷率最小取 0.3，最大取 1；其余设备的负荷率最小为 0，最大为 1。

系统中需要配置的储能设备为蓄电池和蓄水罐，其相关参数如表 2 所示<sup>[21]</sup>。

表 2 储能设备参数

Table 2 Parameters of energy storage devices

项目	蓄电池	蓄水罐
投资/(元/kW)	1 000	35
维护/(元/kW)	0.001 8	0.001 6
寿命/年	10	20
效率	0.9	0.9
耗散率	0.001	0.01
充放功率上限	0.25	0.25
初始储能	0.2	0.2
储能上限	0.8	0.8
储能下限	0.2	0.1

天然气的低热值为 9.73 kWh/m<sup>3</sup>，购买费用为 3.15 元/m<sup>3</sup>，其 CO<sub>2</sub> 排放量为 0.19 kg/kWh；电网的网损取 7%，其 CO<sub>2</sub> 排放量为 0.8 kg/kWh；碳税为 0.3 元/kg<sup>[22]</sup>。

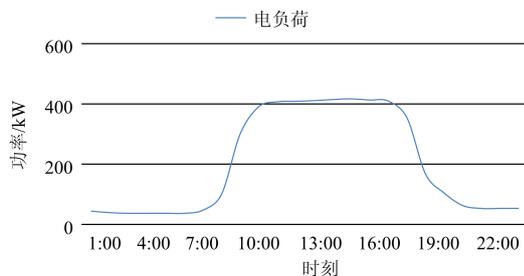
系统与上级电网买卖电采用分时电价，具体价格见表 3<sup>[23]</sup>，售电价格取购电价格的一半。单位时间内与上级电网的电力传输上限取 500 kW。

表 3 分时电价表

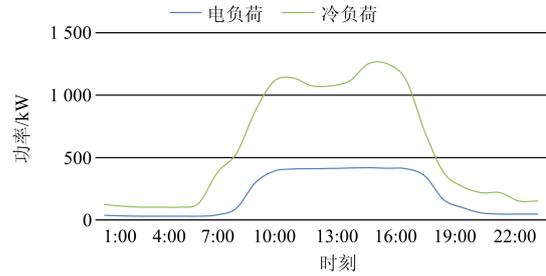
Table 3 Time-of-use price

时段	购电价格/(元/kW·h)	售电价格/(元/kW·h)	时间
峰	1.345 8	0.672 9	8:00—11:00
			18:00—23:00
平	0.900 3	0.450 15	7:00—8:00
			11:00—18:00
谷	0.474 8	0.237 4	23:00—7:00

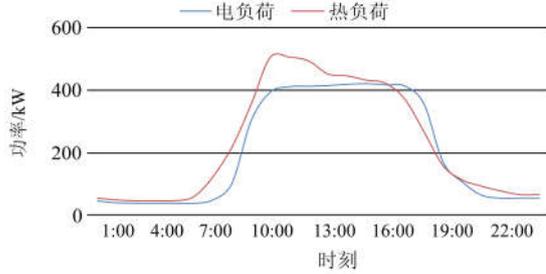
在采用 K-means 聚类算法对负荷数据进行分析时，全年 365 条日负荷特性曲线经聚类后得到三个典型场景，分别以这三类场景的聚类中心曲线作为典型日负荷曲线，图 3 中分别给出了三类典型场景的日负荷曲线。



(a) 过渡季日负荷曲线



(b) 供冷季日负荷曲线



(c) 供暖季日负荷曲线

图 3 科技园区办公楼典型日负荷曲线

Fig. 3 Typical daily load curve of office building in science and technology park

#### 4.2 配置结果

本文将比较以下三种情形的储能配置结果。

1) 未考虑电能替代的电/热储能综合配置。

2) 考虑用能端电能替代的电/热储能综合配置。该方案利用末端电气设备(如冷暖空调)，实现热负荷向电负荷的转移。

3) 考虑供能端电能替代的电/热储能综合配置。该方案利用电热锅炉替换系统中原有的燃气锅炉，并将电热锅炉视作电热转换设备处理，同时对燃气轮机的使用加以限制。

算例中暂不计后两种方案中的设备置换费用。三种情形下的储能配置结果和 IES 系统最小年费用分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 不同情形下的储能配置容量

Table 4 Planning results of energy storage devices in different situations

容量/kW·h	蓄电池	蓄水罐
Case1	1 725.01	8 402.63
Case2	2 205.49	8 568.01
Case3	1 300.01	8 551.94

表 5 不同情形下的储能配置成本

Table 5 Cost of energy storage allocation in different situations

费用/万元	投资	运行	燃料	购电	碳税	总计
Case 1	20.23	4.01	33.97	143.86	55.63	257.69
Case 2	25.09	2.92	6.98	166.4	1.23	202.62
Case 3	15.23	4.17	0	225.33	0	244.73

由于储热设备容量取决于供冷季的储冷需求, 因此 Case1、Case2 和 Case3 的储热设备容量配置差异不大。图 4 为供冷季的 IES 冷能量供需平衡图。

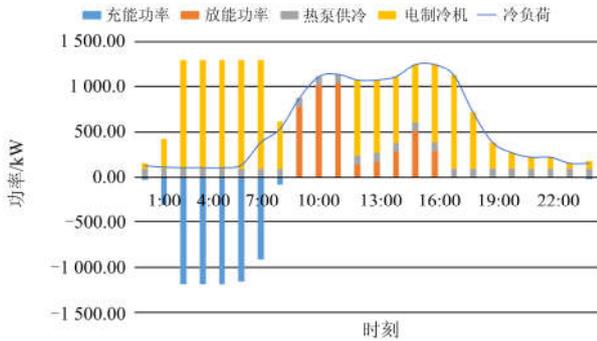


图 4 供冷季冷能供需平衡图

Fig. 4 Cooling balance in summer

而在供暖季, 比较 Case1 和 Case2, 在用能端采用电能替代后, 储电设备配置容量增加 480 kW·h, 导致投资增加近 5 万元, 储热设备在供暖季的利用率变化不大。虽然投资增加, 但在拥有碳税政策补贴的情况下, 其总的年费用节约了约 55 万元, 近 21%。

比较 Case1 和 Case3, 后者配置的蓄电池容量减少了 425 kW·h, 大幅度降低了投资费用, 同时储热设备在供暖季的利用率也大幅度提高。考虑园区内部燃气锅炉的替换和对燃气轮机使用的限制, Case3 可以不消耗燃气, 本地内可以无碳排放, 具有极佳的环境效益。尽管电能替代带来了大幅上涨的购电费用, 但是在拥有碳税政策补贴的情况下, 该方案依然在经济上优于常规的电热储能综合配置, 其总的年费用节约了 13 万元, 近 5%。因此, 污染少和成本低这两项优势使得 Case3 对于园区内的用户层和能源管理层都具有吸引力。

分析对比两种考虑电能替代的储能配置方案 Case2 和 Case3, 前者配置了更大容量的储能设备, 但总成本要比后者低 42 万, 约 17.2%, 主要的费用差距来自于购电费用, Case3 需要更多的电能。究其原因, 两者的实质区别在于电能替代的设备。用能端考虑的是用户通过购置冷暖空调等设备采暖, 制热效率在 3 左右; 供能端则是利用电锅炉集中供暖, 制热效率较高的也仅为 0.99。因此供能端替代方案耗电更多, 购电费用也随之增长。

图 5—图 7 分别为三种情形下供暖季的 IES 热能供需平衡图。由图可以看出, 在电/热储能综合配置情形下, 储能设备充能大多在 7:00 前一段时间, 各类负荷都不高, 电价也最低。在用能高峰时段, 储能装置参与供需平衡调节, 缓解其他设备的供能

压力。由于热泵、电制冷机和燃气轮机等电/热/冷耦合设备的存在, 供暖季和供冷季低负荷低电价时段不仅可以储电, 还可利用低价电储热/冷, 实现多种能量跨时段转移, 加深冷/热/电在长时间尺度上的耦合关系。这种多能流协调优化运行使得 IES 在保证供需平衡的同时更加经济高效。对比三种情形下的供暖季热能平衡图可以发现, 考虑了用能端电能替代的方案储热设备储能的时段更多, 而供能端替代的方案储热功率更大, 明显提高了储热设备的利用率。

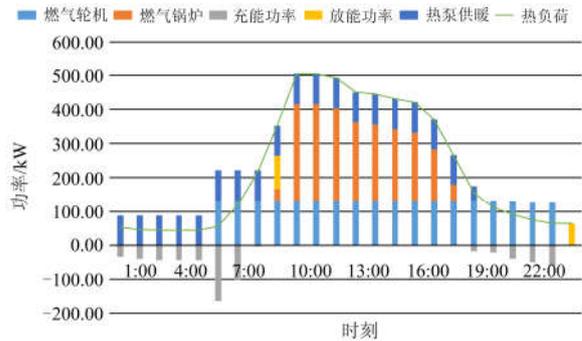


图 5 Case1 供暖季热能供需平衡图

Fig. 5 Thermal balance of Case 1 in winter

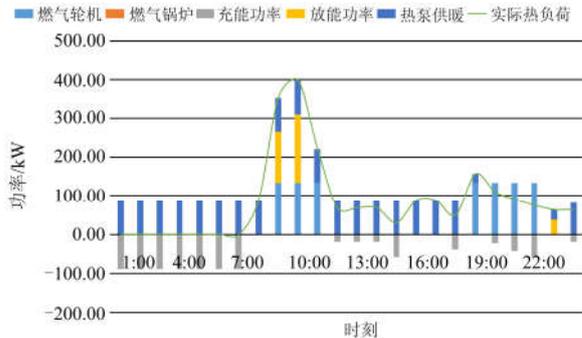


图 6 Case2 供暖季热能供需平衡图

Fig. 6 Thermal balance of Case 2 in winter

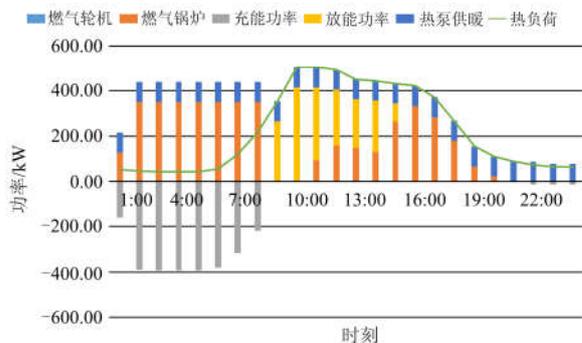


图 7 Case3 供暖季热能供需平衡图

Fig. 7 Thermal balance of Case 3 in winter

图 8 和图 9 分别为 Case2 用能端电能替代情形

下的电/热负荷对比结果。

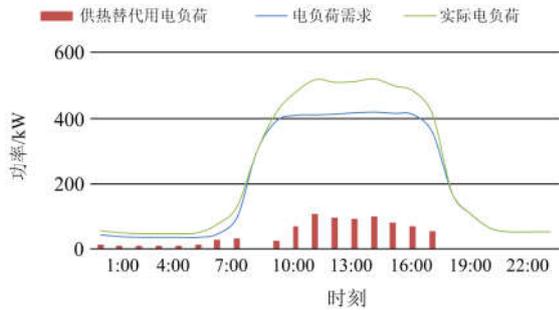


图 8 Case2 供暖季电负荷比较

Fig. 8 Comparison of electrical load in winter of Case 2

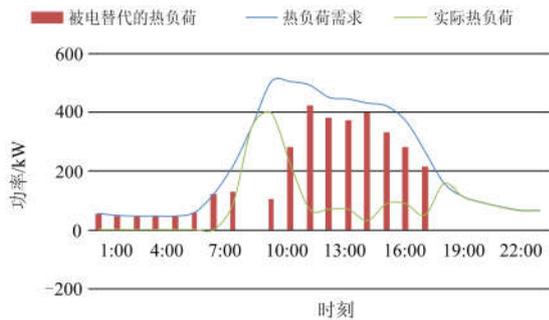


图 9 Case2 供暖季热负荷比较

Fig. 9 Comparison of thermal load in winter of Case 2

由图 8 和图 9 可以看出，对于考虑用能端电能替代的储能配置方案来说，在 1:00—8:00 这一时段办公楼人员较少，电/热负荷处于全天最低水平，能量供应充足，电能作为清洁能源且价格正处于低谷时段，因此热负荷全部被替代较经济；10:00—18:00 时为工作时间，负荷逐渐增长并达到峰值，电能替代量大致随热负荷曲线波动，并受电负荷和供电能力影响。这一时间段电能替代量数值上升而占比却有所下降，替代后的实际电负荷峰值达到了 500 kW 左右，约等于上级电网的输电功率，再加上系统内分布式能源的产电/热，可以实现电能替代情形下的电/热供需能量平衡。可见，考虑用能端电能替代的配置策略并不是盲目地将所有热负荷替换为电负荷，完全消耗电能，而是在保证系统供需平衡的基础上，视自身产能盈亏和负荷水平得出具备最优经济效益的替代量。

图 10 为 Case3 供能端电能替代情形下的电能供需平衡图。

由图 7 和图 10 可以看出，供能端电能替代的储能配置方案采用了将低谷电转换为热能存储的储能方式。

综上，考虑电能替代的储能综合配置策略有利于社会环境的保护，同时亦可提高 IES 的经济效益。

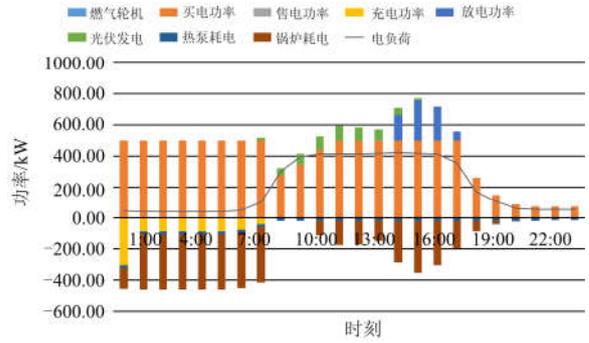


图 10 Case3 供暖季电能供需平衡图

Fig. 10 Power balance of Case 3 in winter

### 5 结论

本文从供需能量平衡角度出发，基于冷/热/电耦合，考虑了电能替代，建立了电/热储能综合优化配置模型，从一个新的角度提出了智慧城市用户侧综合能源系统中的储能配置方法。

1) 本文提出的在冷/热/电耦合的基础上对典型日进行优化调度的储能综合配置方法，能够满足不同季节、不同时期的能量供需平衡。典型日抽取方法简单可靠，供需平衡及耦合关系的处理合理有效，储能优化配置结果不仅更加经济，而且能够保障系统运行的安全性和可靠性；

2) 本文考虑了在用户侧综合能源系统供能端和用能端分别进行电能替代，将电/热耦合关系纳入储能综合优化配置模型，实现了在综合能源系统中电能替代对运行控制影响的定量分析。电能替代不仅可以为综合能源系统带来必要的环境效益，而且有益于提高经济效益；

3) 本文建立的电/热储能综合优化配置模型，涉及了能量供需平衡、冷/热/电耦合、系统运行调度及电能替代，考虑了设备、网络、环境及经济约束，模型具有较强的适用性，通过 Matlab 编程结合 Cplex 求解，实用有效。

本文所建模型的最小时间尺度为 1 h，而储能设备的响应能力可至分钟级或秒级，在更短的时间尺度内，考虑到新能源的功率波动，如何在保证供需能量平衡的基础上综合配置电/热储能将作为下一步的研究问题。

### 参考文献

[1] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报, 2016, 32(1): 1-13.  
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,

- 32(1): 1-13.
- [2] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 88-94.  
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 88-94.
- [3] 章竹耀, 郭晓丽, 张新松, 等. 储能电池平抑风功率波动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 62-68.  
ZHANG Zhuyao, GUO Xiaoli, ZHANG Xinsong, et al. Strategy of smoothing wind power fluctuation based on storage battery[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 62-68.
- [4] 白学祥, 曾鸣, 李源非, 等. 区域能源供给网络热电协同规划模型与算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 65-72.  
BAI Xuexiang, ZENG Ming, LI Yuanfei, et al. The model and algorithm of thermoelectric collaborative planning of regional energy supply network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 65-72.
- [5] 李丹丹, 苏小林, 阎晓霞, 等. 储能优化配置关键问题分析[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 70-78.  
LI Dandan, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. Principal problems of energy storage optimization allocation[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 70-78.
- [6] 杨秀, 陈洁, 朱兰, 等. 基于经济调度的微网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 53-60.  
YANG Xiu, CHEN Jie, ZHU Lan, et al. Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 53-60.
- [7] 刘银丽, 林中鹏, 谭聚文. 考虑需求侧响应的微网混合储能优化配置[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 200-203, 216.  
LIU Yinli, LIN Zhongpeng, TAN Juwen. Hybrid energy storage optimization allocation in microgrid based on demand response[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(5): 200-203, 216.
- [8] 李佳佳, 胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3286-3291.  
LI Jijia, HU Xianlin. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3286-3291.
- [9] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4080.  
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4072-4080.
- [10] 葛延峰, 礼晓飞, 戈阳阳, 等. 基于热电联合调度的弃风电储热供热技术方案[J]. 智能电网, 2015, 3(10): 901-905.  
GE Yanfeng, LI Xiaofei, GE Yangyang, et al. Technical plan for electric heat storage and heating by wind energy curtailment based on joint dispatching of heat and electricity[J]. Smart Grid, 2015, 3(10): 901-905.
- [11] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.  
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [12] ZHOU Z, LIU P, LI Z, et al. An engineering approach to the optimal design of distributed energy systems in China[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(2): 387-396.
- [13] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 80: 219-239.
- [14] LI H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [15] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33, 3.  
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33, 3.
- [16] 程祥. 基于负荷量测数据的电力负荷聚类方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
CHENG Xiang. The study of clustering method for power load based on measured data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [17] 周林, 黄勇, 郭珂. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力

- 系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.
- ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke. Asurvey of energy storage technology formicrogrid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [18] 季鹏飞. 燃气轮机在风光电站中调峰特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- JI Pengfei. The research of apply gas turbines to manage wind farm and photovoltaic power variability[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [19] 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, 35(14): 3569-3576.
- LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [20] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.
- ZHAO Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three-stage collaborative global optimization design method of combined cooling heating and power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [21] 冯帅. 分布式能源系统蓄能方案优化分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- FENG Shuai. Optimization and analysis of distributed energy system with energy storage[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [22] 王惠, 赵军, 安青松, 等. 不同建筑负荷下分布式能源系统优化与政策激励研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3734-3740.
- WANG Hui, ZHAO Jun, AN Qingsong, et al. Study on optimization and policy incentives of distributed energy system under different building loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3734-3740.
- [23] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.
- WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.

收稿日期: 2017-08-14; 修回日期: 2017-09-26

作者简介:

郑国太(1980—), 男, 本科, 研究方向为多能源综合利用; E-mail: zhengguotai@sohu.com

唐巍(1971—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网规划与评估、配电网经济安全运行、分布式发电与微电网技术。E-mail: wei\_tang@cau.edu.cn

(编辑 姜新丽)