

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191263

考虑电/热/气耦合需求响应的多能微网多种储能容量综合优化配置

吴勇, 吕林, 许立雄, 石文超, 贺帅佳, 冯智慧

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在多能微网中配置多种储能设备有利于平滑可再生能源波动性, 提升供能可靠性和用能经济性。以含风光发电和电/热/气负荷的多能微网为研究对象, 研究考虑电/热/气耦合需求响应的微能源网多种储能系统优化配置方法。首先, 基于人体对温度的模糊度以及电负荷和气负荷的可转移特性建立耦合需求响应模型。在此基础上, 以经济成本和碳排放量最小为目标, 建立了基于耦合需求响应的多种储能容量综合规划的多目标优化模型。然后, 采用自适应动态权重因子以适应规划场景的灵活多变。最后, 通过算例比较了应用耦合需求响应以及配置储能系统前后多能微网的经济性以及碳排放量, 从而验证了所提方法的有效性。

关键词: 多能微网; 电/热/气耦合需求响应; 储能容量; 自适应权重; 多目标优化

Optimized allocation of various energy storage capacities in a multi-energy micro-grid considering electrical/thermal/gas coupling demand response

WU Yong, LÜ Lin, XU Lixiong, SHI Wenchao, HE Shuaijia, FENG Zhihui

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Optimal configuration of various types of energy storage is beneficial for reducing the fluctuation of renewable energy and for improving the reliability and economy of energy consumption in the multi-energy microgrid. Taking a multi-energy microgrid with wind power, photovoltaic generation and electricity/thermal/gas load as the study object, this paper studies the optimal allocation of multiple energy storage systems in a multi-energy microgrid considering electricity/thermal/gas coupling demand response. First, the coupling demand response model is built based on the ambiguity of body to temperature and the transferable characteristics of electricity and gas load. Based on the coupling demand response, in order to minimize economic cost and carbon emissions, a multi-objective optimization model is proposed where coupling demand response and different energy storage is taken into account. After that, in order to deal with the flexibility of the planning scenario, an adaptive dynamic weight factor is used. Finally, the economic cost and carbon emissions of the multi-energy microgrid before and after the application of coupling demand response and the configuration of the energy storage system are compared through a case study. This verifies the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Sichuan Science and Technology Program (No. 2019YFG0152) and National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905200).

Key words: multi-energy microgrid; electricity/thermal/gas coupling demand response; energy storage; adaptive weight; multi-objective optimization

0 引言

随着传统化石能源的日益枯竭以及自然环境的不断恶化, 如何高效清洁地利用能源逐渐成为诸多

学者关注的焦点。多能微网可实现多种能源间的互相转化, 实现不同能源的优势互补, 有利于降低微网运行经济成本、提升能源利用效率及环境效益等^[1-4]。在多能微网中配置合理容量的储能设备可有效进一步提升多能微网经济性及运行效率^[5-6]。随着计量设施、控制设备的普遍使用, 用户侧参与需求响应对微网规划结果的影响变得不可忽视。因此,

基金项目: 四川省科技厅项目资助(2019YFG0152); 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905200)

研究用户电/热/气需求响应对多能微网储能规划的影响有重要的现实意义。

随着储能技术的逐步发展, 储能设备也在电网中起着越来越重要的作用^[7-9]。在配置储能时, 储能容量不宜过大, 过大的容量会导致投资成本的显著增加; 储能容量的配置也不能过小, 过小的容量无法明显提升系统的运行效率。因此, 如何进行储能设备的合理配置成为当前众多学者关注的焦点。当前, 国内外学者对于微网储能容量的优化配置研究较多, 且取得了一系列研究成果。文献[10]研究了微电网以净现值最优为目标的储能系统优化配置与运行的方法; 文献[11]提出利用傅里叶变换求取风电不平衡功率时变周期分量的方法, 以此求得储能容量的大小; 文献[12]为应对风电的不确定性, 提出一种基于经验概率密度函数的方法来确定电储能最小容量; 文献[13]提出一种利用频谱分析来确定截止频率的方法, 从而确定复合电储能的容量; 文献[14]提出了一种微电网储能优化配置双层模型, 其中决策变量上层为储能规划容量及功率, 下层为电池的充放电功率。此外, 需求响应技术的应用对储能容量的规划也有一定影响。文献[15]针对高渗透率的光伏示范基地, 结合需求响应, 探讨了储能系统的经济配置; 文献[16]将分时电价策略引入到储能规划阶段, 建立了以年利润和光伏利用率最大化为目标的储能规划模型; 文献[17]以全社会综合经济目标最大化建立了储能和需求侧响应的联合优化规划模型, 并分析了储能和需求响应不同运行策略下对目标函数的影响。

上述研究仅考虑规划电储能而忽略了其他形式储能设备的应用, 并且都以经济性最优为目标而没有考虑诸如碳排放量的其他社会效益。此外, 上述对于需求响应在储能规划阶段的研究仅考虑了电负荷参与需求响应, 且没有考虑各类负荷参与需求响应的耦合关系。针对上述问题, 本文提出基于多种负荷耦合需求响应的多种储能设备规划模型, 该模型以经济性和碳排放量为综合目标, 并以自适应方法确定单一目标的权重。通过 LINGO 软件的模拟仿真, 验证了模型的有效性, 同时对比了不同储能模式、考虑自适应权重与否以及是否考虑耦合需求响应的差别, 进一步验证了所提模型的有效性。

1 多能微网系统基本结构

本文以一个包含风机(Wind Turbine, WT)、光伏(Photovoltaic, PV)、热电联产(Combined Heating and Power, CHP)系统、燃气锅炉(Gas Fired Boiler, GFB)、电转气(Power to Gas, P2G)系统、电锅炉

(Electrical Boiler, EB)、储电(Electrical Energy Storage, EES)、储热(Thermal Energy Storage, TES)、储气(Gas Energy Storage, GES)以及电热气负荷的微网系统为研究对象, 其系统基本结构如图 1 所示。

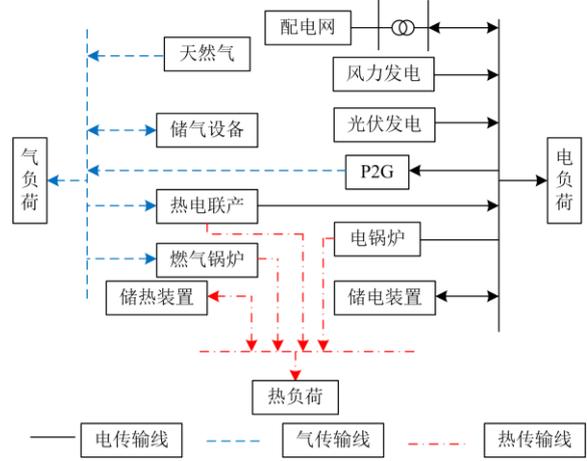


图 1 微网多能系统结构图

Fig. 1 Microgrid multipurpose system architecture

2 电/热/气耦合需求响应模型

需求响应可以通过改变用户用能行为来优化负荷曲线, 提升系统运行效率。在多能微网中, 用户电/气/热负荷均能以各自形式参与需求响应, 以减少自身用能支出。

2.1 电负荷需求响应模型

本文电负荷考虑以可转移负荷的形式参与需求响应, 数学模型为

$$L_p(t) = L_{p,0}(t) + \Delta L_p(t) \quad (1)$$

式中: $L_{p,0}(t)$ 表示原始电负荷; $L_p(t)$ 表示需求响应后电负荷; $\Delta L_p(t)$ 表示 t 时段电负荷改变量, 由本文所提模型优化得到, 大于零时表示负荷转入, 小于零时表示负荷转出。

2.2 气负荷需求响应模型

天然气与电力均为社会重要能源资源, 具有类似的市场商品属性。本文进一步将部分气负荷视为可转移负荷参与需求响应, 类比可转移电负荷, 可转移气负荷数学模型为

$$L_G(t) = L_{G,0}(t) + \Delta L_G(t) \quad (2)$$

式中: $L_{G,0}(t)$ 表示原始气负荷; $L_G(t)$ 表示需求响应后气负荷; $\Delta L_G(t)$ 表示 t 时段气负荷改变量, 由本文所提模型优化得到, 大于零时表示负荷转入, 小于零时表示负荷转出。

2.3 热负荷需求响应模型

由于用户对温度的舒适性具有一定的模糊度, 因此供热负荷可以作为柔性负荷参与需求响应, 本

文供热负荷主要考虑热水负荷。基于此将多能微网中的供热负荷参与到调度中, 数学模型如下所示^[18]。

$$L_{W,0}(t) = \frac{C_w \cdot V(t) \cdot (T_{W,0} - T(t))}{3.6 \times 10^6 \Delta t} \quad (3)$$

$$L_w(t) = \frac{C_w \cdot V(t) \cdot (T_w(t) - T(t))}{3.6 \times 10^6 \Delta t} \quad (4)$$

式中: $L_{W,0}(t)$ 、 $L_w(t)$ 分别表示 t 时段需求响应前、后热负荷功率, kW; C_w 为单位体积水的热容, 取 $4.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{C}$; $V(t)$ 为 t 时段热水用量, m^3 ; $T_{W,0}$ 表示需求响应前热水设定温度, 本文取 $50 \text{ }^\circ\text{C}$; $T(t)$ 为 t 时段冷水温度, $^\circ\text{C}$; $T_w(t)$ 表示需求响应后 t 时段的热热水温度, $^\circ\text{C}$ 。按照式(1)的格式, 将式(4)改写为

$$L_w(t) = L_{w,0}(t) + \Delta L_w(t) \quad (5)$$

$\Delta L_w(t)$ 表示 t 时段热负荷改变量, 其中

$$\Delta L_w(t) = \frac{C_w \cdot V(t) \cdot (T_w(t) - T_{W,0})}{3.6 \times 10^6 \Delta t} \quad (6)$$

2.4 电/热/气负荷耦合需求响应

多能系统中, 除常见的固定电负荷、可调节电负荷、固定气负荷、可调节气负荷、固定热负荷、可调节热负荷外, 还存在电/热/气耦合负荷, 即用户可以通过改变电负荷实现热负荷、气负荷的变化, 类似的也可通过改变热负荷或气负荷来实现另外两种负荷的变化。当用户某时段电负荷转出而导致供电降低时, 可以通过能源的替代作用增加热、气消耗来弥补电量的短缺。考虑电/热/气负荷耦合的需求响应关系式可由式(7)表示, 其中 L 表示需求响应后负荷; ΔL 表示电/热/气负荷自身改变量; 矩阵 C 表示 L 和 ΔL 具体转换关系的耦合矩阵; L_0 表示初始负荷。

$$L = C \Delta L + L_0 \quad (7)$$

在考虑电/热/气负荷耦合之后, 根据文献[19-20]式(1)、式(2)、式(5)改写为式(8)一式(10)。

$$L_p(t) = \Delta L_p(t) + \alpha_{H,P} \zeta_{H,P} \Delta L_w(t) + \alpha_{G,P} \zeta_{G,P} \Delta L_G(t) + L_{p,0}(t) \quad (8)$$

$$L_G(t) = \Delta L_G(t) + \alpha_{P,G} \zeta_{P,G} \Delta L_p(t) + \alpha_{H,G} \zeta_{H,G} \Delta L_w(t) + L_{G,0}(t) \quad (9)$$

$$L_w(t) = \Delta L_w(t) + \alpha_{P,H} \zeta_{P,H} \Delta L_p(t) + \alpha_{G,H} \zeta_{G,H} \Delta L_G(t) + L_{w,0}(t) \quad (10)$$

式中: $\alpha_{i,j}$ 表示 i 类负荷与 j 类负荷耦合系数, 且 $\alpha_{H,P} = \alpha_{P,H}$ 、 $\alpha_{H,G} = \alpha_{G,H}$ 、 $\alpha_{G,P} = \alpha_{P,G}$; $\zeta_{i,j}$ 表示 i 类负荷与 j 类负荷单位换算系数, 且 $\zeta_{P,H}$ 与 $\zeta_{H,P}$ 、 $\zeta_{H,G}$ 与 $\zeta_{G,H}$ 、 $\zeta_{G,P}$ 与 $\zeta_{P,G}$ 互为倒数。 $\alpha_{H,P} \zeta_{H,P} \Delta L_w(t)$ 表示用户热负荷改变 $\Delta L_w(t)$ 时所对应的电负荷的改变量, $\alpha_{G,P} \zeta_{G,P} \Delta L_G(t)$ 表

示用户气负荷改变 $\Delta L_G(t)$ 时所对应的电负荷的改变量, 因此, 电负荷的大小与电负荷改变量、热负荷改变量、气负荷改变量以及原始电负荷有关, 由此可类推气负荷和热负荷的大小。

将电/热/气耦合需求响应关系式整理为如下形式:

$$\begin{bmatrix} L_p(t) \\ L_G(t) \\ L_w(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{G,P} \zeta_{G,P} & \alpha_{H,P} \zeta_{H,P} \\ \alpha_{P,G} \zeta_{P,G} & 1 & \alpha_{H,G} \zeta_{H,G} \\ \alpha_{P,H} \zeta_{P,H} & \alpha_{G,H} \zeta_{G,H} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L_p(t) \\ \Delta L_G(t) \\ \Delta L_w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{p,0}(t) \\ L_{G,0}(t) \\ L_{w,0}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 计及耦合需求响应的微网多目标储能配置模型

本文以多能微网的经济成本和碳排放量最优为目标, 综合考虑电/热/气耦合需求响应, 多能微网中各出力单元运行约束、各类储能运行约束、各类能源的功率平衡约束等, 配置多能微网中电/热/气三类储能装置的最优容量。

3.1 目标函数

多能微网中规划储能目标函数包含经济成本和碳排放量两个方面。其中, 经济成本包含微网系统购气成本、购电成本、维护成本以及投资成本, 碳排放量包含 CHP 机组、GFB 锅炉以及主网发电的碳排放量。

3.1.1 微网经济成本最小化

多能微网中储能规划经济成本包含投资成本、购气成本、购电成本以及维护成本, 决策变量为电、热、气储能设备的安装容量, 总成本为

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T [C_{in} + C_{GAS}(t) + C_{GEX}(t) + C_{MC}(t)] \quad (12)$$

其中,

$$C_{in} = \sum_s P_{Ns} C_s \frac{r(1+r)^{n_s}}{(1+r)^{n_s} - 1} \quad (13)$$

$$C_{GAS}(t) = R \cdot e_{gas} Q_{source}(t) \quad (14)$$

$$C_{GEX}(t) = R(e_b L_b(t) - e_s L_s(t)) \quad (15)$$

$$C_{MC}(t) = R\{C_{PV} P_{PV}(t) + C_{WT} P_{WT}(t) + C_{CHP} P_{CHP}(t) +$$

$$C_{GFB} G_{GFB}(t) + C_{P2G} P_{P2G}(t) + C_{EB} P_{EB}(t) +$$

$$C_{EES} [P_{EES,c}(t) + P_{EES,dc}(t)] +$$

$$C_{TES} [P_{TES,c}(t) + P_{TES,dc}(t)] +$$

$$C_{GES} [P_{GES,c}(t) + P_{GES,dc}(t)]\}$$

(16)

式中: T 为总时段数; R 为年相似日天数; C_{in} 、 $C_{GAS}(t)$ 、 $C_{GEX}(t)$ 、 $C_{MC}(t)$ 分别表示 t 时段 R 个相似日下微网的设备投资成本、购气成本、购电成本和设备维护成本; e_{gas} 、 e_b 、 e_s 分别为微网购气单价、购电单价、售电单价; $Q_{source}(t)$ 、 $L_b(t)$ 、 $L_s(t)$ 分别表示微网 t 时段购气量、购电量、售电量; C_{PV} 、 C_{WT} 、 C_{CHP} 、 C_{GFB} 、 C_{P2G} 、 C_{EB} 、 C_{EES} 、 C_{TES} 、 C_{GES} 分别表示光伏、风机、热电联产机组、燃气锅炉、电转气设备、电锅炉、储电设备、储热设备、储气设备单位维护成本; $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 分别表示 t 时段光伏、风机出力; $P_{CHP}(t)$ 、 $G_{GFB}(t)$ 、 $P_{P2G}(t)$ 以及 $P_{EB}(t)$ 分别代表 t 时段 CHP 机组的输出电功率、GFB 机组消耗的天然气功率、P2G 机组的输入电功率以及 EB 机组的消耗电功率; $P_{EES,c}(t)$ 、 $P_{EES,dc}(t)$ 分别代表储电系统 t 时段电储能充、放电功率; $P_{TES,c}(t)$ 、 $P_{TES,dc}(t)$ 分别代表储热系统 t 时段吸、放热功率; $P_{GES,c}(t)$ 、 $P_{GES,dc}(t)$ 分别代表储气系统 t 时段充、放气功率; P_{N_s} 、 C_s 、 n_s 分别表示设备 s 的安装容量、单位容量安装成本以及平均寿命; r 表示折现率。

3.1.2 微网碳排放量最小化

微网碳排放量包含 CHP 机组碳排放量、GFB 锅炉碳排放量以及与主网交互电能对应的碳排放量减去 P2G 设备所减少的碳排放量, 因此碳排放量最小化目标函数为

$$\min f_2 = R \sum_{t=1}^T \left\{ m_{CHP} G_{CHP}(t) + m_{GFB} G_{GFB}(t) + m_{grid} [L_b(t) - L_s(t)] - m_{P2G} G_{P2G}(t) \right\} \quad (17)$$

式中: m_{CHP} 、 m_{GFB} 分别代表 CHP 机组、GFB 锅炉消耗天然气的 CO_2 排放系数; m_{grid} 代表电网发电的 CO_2 排放系数; m_{P2G} 代表 P2G 设备产出天然气的 CO_2 吸收系数; $G_{CHP}(t)$ 、 $G_{P2G}(t)$ 分别代表 t 时段 CHP 机组消耗天然气功率、P2G 机组输出气功率。

3.1.3 综合目标

基于以上经济成本和碳排放量的目标, 微网多目标规划的综合目标函数为

$$\min f = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 \quad (18)$$

式中, ω_1 、 ω_2 为权重因子, 体现各目标的重要程度。

3.1.4 自适应动态权重因子优化模型

由于上述各目标间存在冲突, 并不存在一种使两个目标都达到最优的优化规划方案。多目标优化多采用多目标算法^[20]以及固定权重因子的方法^[21], 多目标算法未能直观体现出各目标的重要程度, 而固定权重因子的方法难以适应新能源接入下的微网规划复杂场景灵活多变, 权重因子的合理确定是求解多目标问题的关键挑战。为解决上述问题, 本文

提出自适应动态权重因子优化模型, 依据单一目标的数值来动态确定权重因子, 这一方法既能体现人工对于重要目标及次要目标的选择性又赋予模型状态对于权重系数一定的影响能力。

首先对各目标函数进行标么化处理, 如式(19)所示。

$$\begin{cases} F_{1,i} = f_{1,i} / f_{1,max} \\ F_{2,i} = f_{2,i} / f_{2,max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $F_{1,i}$ 、 $F_{2,i}$ 分别表示成本目标和碳排放目标在 i 时段的标么值; $f_{1,i}$ 、 $f_{2,i}$ 分别表示成本目标和碳排放目标在 i 时段的数值; $f_{1,max}$ 、 $f_{2,max}$ 分别表示成本目标和碳排放目标的最大值。

为适应多能微网规划的灵活多变性, 需自动平衡微网规划的成本目标及碳排放目标。因此, 建立总目标函数为

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i=1}^T [\beta_i f_{1,i} + (1 - \beta_i) f_{2,i}] \\ \beta_i = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 F_{1,i} \end{cases} \quad (20)$$

式中: β_i 为自适应权重因子, 与成本目标线性相关; ε_1 、 ε_2 为线性相关系数。最终, 多能微网规划的成本目标和碳排放目标通过式(20)所提自适应权重因子决定。具体来说, 当系统经济性较好, 即 $f_{1,i}$ 值较小时, 其权重 β_i 将相应降低, 碳排放权重将上升, 碳排放目标将得到进一步优化; 当系统经济性较差, 即 $f_{1,i}$ 值较大时, 其权重 β_i 将相应上升, 系统经济性将得到进一步优化。

3.2 约束条件

为了保证混合储能系统规划的合理性, 本文考虑各单元的出力约束、储能约束、三种形式能源的功率平衡约束、需求响应约束以及主网交互功率约束。

3.2.1 多能微网系统设备运行约束

本文考虑了 CHP 机组、燃气锅炉、电锅炉、电转气等设备的运行约束, 考虑各设备出力上下限以及爬坡约束。

1) CHP 机组运行约束

$$\begin{cases} H_{CHP}(t) = G_{CHP}(t) \eta_{H,CHP} \\ P_{CHP}(t) = G_{CHP}(t) \eta_{P,CHP} \\ P_{CHP,min} \leq P_{CHP}(t) \leq P_{CHP,max} \\ -R_{CHP,down} \Delta t \leq P_{CHP}(t) - P_{CHP}(t-1) \leq R_{CHP,up} \Delta t \end{cases} \quad (21)$$

式中: $H_{CHP}(t)$ 为 t 时段 CHP 的输出热功率; $\eta_{H,CHP}$ 和 $\eta_{P,CHP}$ 分别表示 CHP 机组产热、产电效率; $P_{CHP,max}$ 、 $P_{CHP,min}$ 分别表示热电联产设备出力上下限; $R_{CHP,up}$ 、

$R_{\text{CHP,down}}$ 分别表示 CHP 机组上下爬坡速率。

2) 燃气锅炉

$$\begin{cases} H_{\text{GFB}}(t) = G_{\text{GFB}}(t)\eta_{\text{GFB}} \\ H_{\text{GFB,min}} \leq H_{\text{GFB}}(t) \leq H_{\text{GFB,max}} \\ -R_{\text{GFB,down}}\Delta t \leq H_{\text{GFB}}(t) - H_{\text{GFB}}(t-1) \leq R_{\text{GFB,up}}\Delta t \end{cases} \quad (22)$$

式中: $H_{\text{GFB}}(t)$ 为 t 时段燃气锅炉产热功率; η_{GFB} 为燃气锅炉产热效率; $H_{\text{GFB,max}}$ 、 $H_{\text{GFB,min}}$ 分别表示燃气锅炉出力上下限; $R_{\text{GFB,up}}$ 、 $R_{\text{GFB,down}}$ 分别表示燃气锅炉上下爬坡速率。

3) 电转气设备

$$\begin{cases} G_{\text{P2G}}(t) = P_{\text{P2G}}(t)\eta_{\text{P2G}} \\ G_{\text{P2G,min}} \leq G_{\text{P2G}}(t) \leq G_{\text{P2G,max}} \\ -R_{\text{P2G,down}}\Delta t \leq G_{\text{P2G}}(t) - G_{\text{P2G}}(t-1) \leq R_{\text{P2G,up}}\Delta t \end{cases} \quad (23)$$

式中: η_{P2G} 为电转气设备产气效率; $G_{\text{P2G,max}}$ 、 $G_{\text{P2G,min}}$ 分别表示电转气设备出力上下限; $R_{\text{P2G,up}}$ 、 $R_{\text{P2G,down}}$ 分别表示电转气设备上下爬坡速率。

4) 电锅炉

$$\begin{cases} H_{\text{EB}}(t) = P_{\text{EB}}(t)\eta_{\text{EB}} \\ H_{\text{EB,min}} \leq H_{\text{EB}}(t) \leq H_{\text{EB,max}} \\ -R_{\text{EB,down}}\Delta t \leq H_{\text{EB}}(t) - H_{\text{EB}}(t-1) \leq R_{\text{EB,up}}\Delta t \end{cases} \quad (24)$$

式中: η_{EB} 为电锅炉产气效率; $H_{\text{EB}}(t)$ 为 t 时段电锅炉产热功率; $H_{\text{EB,max}}$ 、 $H_{\text{EB,min}}$ 分别表示电锅炉出力上下限; $R_{\text{EB,up}}$ 、 $R_{\text{EB,down}}$ 分别表示电锅炉上下爬坡速率。

3.2.2 储能约束

储能系统在运作时会受到储能容量以及充放功率上限约束, 具体数学模型如下。

1) 储电约束

$$\begin{cases} E_{\text{EES}}(t + \Delta t) = E_{\text{EES}}(t) + P_{\text{EES,c}}(t)\Delta t\eta_{\text{EES,c}} - \\ \quad P_{\text{EES,dc}}(t)\Delta t/\eta_{\text{EES,dc}} \\ \gamma_{\text{EES,min}}P_{\text{N1}} \leq E_{\text{EES}}(t) \leq \gamma_{\text{EES,max}}P_{\text{N1}} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{EES,c}}(t) \leq \alpha_{\text{EES}}(t)P_{\text{EES,c}}^0P_{\text{N1}} \\ 0 \leq P_{\text{EES,dc}}(t) \leq \beta_{\text{EES}}(t)P_{\text{EES,dc}}^0P_{\text{N1}} \\ 0 \leq \alpha_{\text{EES}}(t) + \beta_{\text{EES}}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $E_{\text{EES}}(t)$ 代表 t 时段电储能容量; $\eta_{\text{EES,c}}$ 、 $\eta_{\text{EES,dc}}$ 分别表示充、放电效率; $\gamma_{\text{EES,max}}$ 、 $\gamma_{\text{EES,min}}$ 分别代表单位容量的电储能设备储能容量的上下限; P_{N1} 表示电储能规划量; $P_{\text{EES,c}}^0$ 、 $P_{\text{EES,dc}}^0$ 分别代表单位电储能充、放电上限; $\alpha_{\text{EES}}(t)$ 、 $\beta_{\text{EES}}(t)$ 分别表示储电系统充放状态, 为 0、1 变量, 1 表示处于工作状态, 0 表示不处于工作状态。

2) 储热约束

$$\begin{cases} H_{\text{TES}}(t + \Delta t) = H_{\text{TES}}(t) + P_{\text{TES,c}}(t)\Delta t\eta_{\text{TES,c}} - \\ \quad P_{\text{TES,dc}}(t)\Delta t/\eta_{\text{TES,dc}} \\ \gamma_{\text{TES,min}}P_{\text{N2}} \leq H_{\text{TES}}(t) \leq \gamma_{\text{TES,max}}P_{\text{N2}} \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{TES,c}}(t) \leq \alpha_{\text{TES}}(t)P_{\text{TES,c}}^0P_{\text{N2}} \\ 0 \leq P_{\text{TES,dc}}(t) \leq \beta_{\text{TES}}(t)P_{\text{TES,dc}}^0P_{\text{N2}} \\ 0 \leq \alpha_{\text{TES}}(t) + \beta_{\text{TES}}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $H_{\text{TES}}(t)$ 代表 t 时段储热容量; $\eta_{\text{TES,c}}$ 、 $\eta_{\text{TES,dc}}$ 分别表示吸、放热效率; $\gamma_{\text{TES,min}}$ 、 $\gamma_{\text{TES,max}}$ 分别代表单位容量的储热设备储能容量的下限以及上限; P_{N2} 表示储热规划量; $P_{\text{TES,c}}^0$ 、 $P_{\text{TES,dc}}^0$ 分别代表单位热储能充、放热上限; $\alpha_{\text{TES}}(t)$ 、 $\beta_{\text{TES}}(t)$ 分别表示储热系统充放状态, 为 0、1 变量, 1 表示处于工作状态, 0 表示不处于工作状态。

3) 储气约束

$$\begin{cases} Q_{\text{GES}}(t + \Delta t) = Q_{\text{GES}}(t) + P_{\text{GES,c}}(t)\Delta t\eta_{\text{GES,c}} - \\ \quad P_{\text{GES,dc}}(t)\Delta t/\eta_{\text{GES,dc}} \\ \gamma_{\text{GES,min}}P_{\text{N3}} \leq Q_{\text{GES}}(t) \leq \gamma_{\text{GES,max}}P_{\text{N3}} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{GES,c}}(t) \leq \alpha_{\text{GES}}(t)P_{\text{GES,c}}^0P_{\text{N3}} \\ 0 \leq P_{\text{GES,dc}}(t) \leq \beta_{\text{GES}}(t)P_{\text{GES,dc}}^0P_{\text{N3}} \\ 0 \leq \alpha_{\text{GES}}(t) + \beta_{\text{GES}}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (30)$$

式中: $Q_{\text{GES}}(t)$ 代表 t 时段储气容量; $\eta_{\text{GES,c}}$ 、 $\eta_{\text{GES,dc}}$ 分别表示充、放气效率; $\gamma_{\text{GES,max}}$ 、 $\gamma_{\text{GES,min}}$ 分别代表单位容量的储气设备储能容量的上下限; P_{N3} 表示储气设备规划量; $P_{\text{GES,c}}^0$ 、 $P_{\text{GES,dc}}^0$ 分别代表单位容量储气设备充、放气上限; $\alpha_{\text{GES}}(t)$ 、 $\beta_{\text{GES}}(t)$ 分别表示储热系统充放状态, 为 0、1 变量, 1 表示处于工作状态, 0 表示不处于工作状态。

3.2.3 需求响应约束

1) 电负荷需求响应约束

本文电负荷考虑以可转移负荷的形式参与需求响应, 为满足用户正常用电需求, 除了设置转入转出上限值以外, 微网一个周期内转入转出负荷总量应相等, 约束如下所示。

$$\begin{cases} -P_{\text{out,max}} \leq \Delta L_{\text{p}}(t)\Delta t \leq P_{\text{in,max}} \\ \sum_{t=1}^T \Delta L_{\text{p}}(t)\Delta t = 0 \end{cases} \quad (31)$$

式中, $P_{\text{in,max}}$ 、 $P_{\text{out,max}}$ 分别表示电负荷转入转出上限值。

2) 气负荷需求响应约束

气负荷需求响应约束与电负荷类似, 约束转入转出上限以及一个周期内转入气负荷与转出气负荷

相等, 约束如下所示。

$$\begin{cases} -G_{\text{out,max}} \leq \Delta L_G(t) \Delta t \leq G_{\text{in,max}} \\ \sum_{t=1}^T \Delta L_G(t) \Delta t = 0 \end{cases} \quad (32)$$

式中, $G_{\text{in,max}}$ 、 $G_{\text{out,max}}$ 分别表示电负荷转入转出上限值。

3) 热负荷需求响应约束

热负荷参与需求响应由调整热水温度来实现, 为保证用户舒适度, 约束一个周期内需求响应前后供应热量相等, 并将热水温度限定在一个合理的范围内, 其数学模型为

$$\sum_{t=1}^T L_{W,0}(t) \Delta t = \sum_{t=1}^T L_W(t) \Delta t \quad (33)$$

$$|T_W(t) - T_{W,0}| \leq \Delta T \quad (34)$$

式中, ΔT 为允许的热水温度偏差最大值, 取 5°C 。

3.2.4 系统功率平衡约束

系统功率平衡包含了系统电热气功率的分别平衡。

$$L_b(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{CHP}}(t) + P_{\text{EES,dc}}(t) = \quad (35)$$

$$L_s(t) + L_p(t) + P_{\text{P2G}}(t) + P_{\text{EES,c}}(t) + P_{\text{EB}}(t)$$

$$H_{\text{CHP}}(t) + H_{\text{GFB}}(t) + H_{\text{EB}}(t) + P_{\text{TES,dc}}(t) = \quad (36)$$

$$P_{\text{TES,c}}(t) + L_W(t)$$

$$Q_{\text{source}}(t) + P_{\text{GES,dc}}(t) + G_{\text{P2G}}(t) = \quad (37)$$

$$P_{\text{GES,c}}(t) + L_G(t) + G_{\text{CHP}}(t) + G_{\text{GFB}}(t)$$

式(35)一式(37)分别代表电、热、气功率平衡。

3.2.5 主网交互功率约束

$$\begin{cases} L_{b,\min} \leq L_b(t) \leq L_{b,\max} \\ L_{s,\min} \leq L_s(t) \leq L_{s,\max} \end{cases} \quad (38)$$

$$Q_{\text{source,min}} \leq Q_{\text{source}}(t) \leq Q_{\text{source,max}} \quad (39)$$

式中: $L_{b,\max}$ 、 $L_{b,\min}$ 、 $L_{s,\max}$ 、 $L_{s,\min}$ 、 $Q_{\text{source,max}}$ 、 $Q_{\text{source,min}}$ 分别表示从主网购电、售电、购气功率上下限。

3.3 模型求解

本文所提模型约束中仅式(26)、式(28)、式(30)存在非线性项, 为提升求解速度, 可将其线性化, 由于这三式形式相同, 可统一线性化为

$$\begin{cases} 0 \leq P_c(t) \leq P_{c,\max} \\ 0 \leq P_{dc}(t) \leq P_{dc,\max} \\ 0 \leq P_c(t) \leq \alpha(t) P_c^{\max} \\ 0 \leq P_{dc}(t) \leq \beta(t) P_{dc}^{\max} \end{cases} \quad (40)$$

式中: $P_c(t)$ 、 $P_{dc}(t)$ 分别表示 t 时段储能系统充放功率; $P_{c,\max}$ 、 $P_{dc,\max}$ 分别表示当前规划容量下储能系统充放功率上限; $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 分别表示储能系统充放状态, 为 0、1 变量; P_c^{\max} 、 P_{dc}^{\max} 分别表示储能系统

安装上限所对应的充、放电功率最大值。

通过上述处理, 本文模型为混合整数规划模型, 适用于 LINGO 求解。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文在文献[6,19,22]的数据基础上作一定的改进, 其中耦合矩阵系数的确定基于文献[17], 考虑微网内电、气以及热负荷需求, 在微网内已有热电联产、燃气锅炉、电锅炉、电转气、光伏电池、风力发电机等单元的基础上配置混合储能。调度总时间为 24 h, 单位时间为 1 h。

微网内运行参数如表 1 所示。主网采用分时电价, 购售电电价及时段划分如表 2 所示。本文取 η_{GFB} 为 0.9^[23], η_{EB} 为 0.95^[24], m_{CHP} 、 m_{GFB} 以及 m_{P2G} 取 0.196 kg/kW h, m_{grid} 取 0.968 kg/kW h^[25], 天然气价格取 2.5 元/m³, 折合成单位热值价格取 0.25 元/kW h (天然气热值取 35.56 MJ/m³)。自适应动态权重因子中 ε_1 、 ε_2 分别取 0.6、0.2, 此权重因子仅为示范性设置, 实际情况下可根据经济和环保的相对重要性以及灵敏性的需要调整其权重分配。

表 1 微网系统运行参数

类型	最小出力/kW	最大出力/kW	下坡爬坡率/kW h	上坡爬坡率/kW h	单位维护成本/(元/kW)
CHP	15	115	5	15	0.025
GFB	0	80	11	11	0.012
EB	0	80	12	12	0.016
P2G	0	80	—	—	0.021
PV	0	120	—	—	0.023 5
WT	0	120	—	—	0.019 6
电网	-150	150	—	—	—
气网	0	80	—	—	—

表 2 主网分时电价

时段	购电/(元/kW h)	售电/(元/kW h)
峰时段 (10—14&&18—20)	0.83	0.65
平时段 (7—9&&15—17&&21—22)	0.49	0.38
谷时段 (1—6&&23—24)	0.17	0.13

为平衡各设备的安装成本, 本文将各设备的成本分摊至每天。在本文中, 除储能外其他设备容量均为定值, 投资成本在各方案中都相同, 故不影响对比结果, 所以为简化计算, 本文建设成本仅考虑

储能设备投资成本。储能系统单位容量均为 1 kW h, 单位储能容量上下限均为 0.9 与 0.1, 各储能系统参数如表 3 所示, 贴现率取 8%。

表 3 储能系统参数

Table 3 Energy storage system parameters

类型	单位初始容量/kW	单位最大充放功率/kW	单位投资成本/(元/kW h)	单位维护成本/(元/kW h)	充放效率	寿命/年
储电	0.5	0.325	600	0.001 8	0.9	10
储热	0.5	0.325	50	0.001 6	0.9	10
储气	0.5	0.325	130	0.001 7	0.95	20

典型日用户电/热/气负荷以及风光发电出力预测值如图 2 所示。

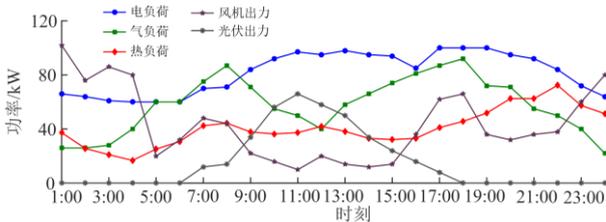


图 2 冬季典型日电气负荷、风光出力以及室外温度

Fig. 2 Typical daily electrical load, wind photovoltaic output and outdoor temperature in winter

4.2 多能微网储能规划结果与分析

4.2.1 规划结果

优化前后的电/热/气负荷曲线对比如图 3 所示。结果表明, 在电价高峰时段, 电/热/气负荷均有不同程度的下降, 而在电价低谷时段电/热/气负荷均有一定的增加。可见: 随着耦合需求响应的引入, 为减少用能成本, 各类负荷都将电价高峰期的负荷转移一部分至电价低谷期, 较耦合需求响应前, 各类负荷曲线更加平缓。

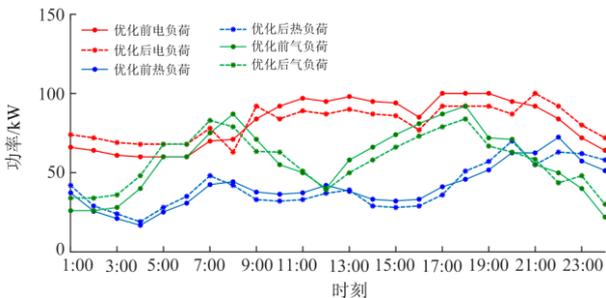


图 3 优化前后电、热、气负荷曲线

Fig. 3 Electric, thermal and gas load curves before and after optimization

为分析耦合需求响应对多能微网多种储能设备配置的影响, 本文将不考虑需求响应的储能配置模

型设置为方案 1, 将考虑耦合需求响应的储能配置模型设置为方案 2, 两个方案下储电、储气、储热设备配置情况如表 4 所示。结果表明, 与方案 1 相比, 方案 2 各类储能设备配置量都呈下降状态。可见: 电/热/气负荷参与耦合需求响应后能一定程度上转移各类负荷需求从而降低系统对储能设备的需求量。

表 4 储能设备配置情况

Table 4 Energy storage equipment configuration

方案	储电/kW h	储气/kW h	储热/kW h
方案 1	731	357	697
方案 2	660	251	586

图 4 直观地给出了两种方案下各项成本的比较, 其中碳排放量单位为 kg, 综合目标无单位, 其余目标单位为元。从图 4 可以看出, 当在微网储能规划中实施耦合需求响应后, 可改变微网负荷结构, 可大幅降低微网购电成本及投资成本, 从而导致总成本的明显降低。并且在成本降低的同时, 需求响应的加入也一定程度上降低了微网的碳排放量。

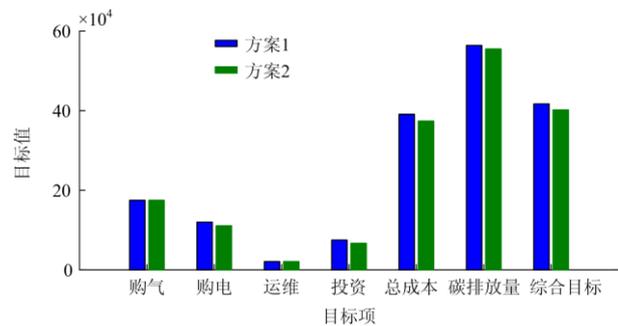


图 4 两种方案下各项成本对比

Fig. 4 Cost comparisons in two schemes

4.2.2 主网电交互功率分析

为分析需求响应及配置储能对购、售电量的影响, 将既不考虑储能也不考虑需求响应的原始系统设置为方案 3, 图 5 给出了各方案下各时段购、售电量的对比效果。由图 5 可知, 引入需求响应及配置储能系统后, 在 10:00—14:00 以及 18:00—20:00, 即电价高峰时段主网交互功率较优化前明显降低, 在 1:00—6:00 以及 23:00—24:00, 即电价低谷时段主网交互功率较优化前明显升高, 而在电价平时段优化后的主网交互功率变化不明显。由此可见, 微能源系统在电价低谷期大量购买电能、在电价高峰期购买少量或出售电能, 以此降低多能微网系统购电成本。

4.2.3 储能模式分析

若不考虑配置电/热/气混合储能设备, 各储能

设备之间互补功能将不足以体现。为进行对比分析，

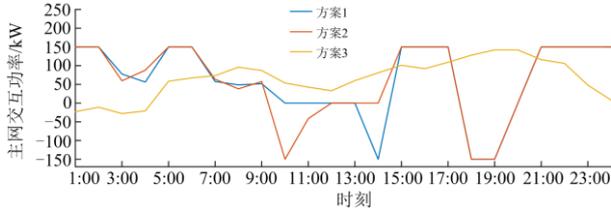


图 5 微网与主网交互电功率对比图

Fig. 5 Interactive power comparison of microgrid to main network

设置单储能设备方案以及双储能设备规划方案，其中单储能设备方案包含单电、单气以及单热储能方案，双储能设备方案包含电/热、电/气、气/热储能方案。成本目标及碳排放目标如图 6 所示。由图 6 可知，在不同的储能模式下，经济成本以及碳排放量呈现出不同的数值。整体而言，经济成本随着储能类型的增加而减少，而碳排放量随着储能类型的增加呈现出波动状态，并在单气储能时达到最低。

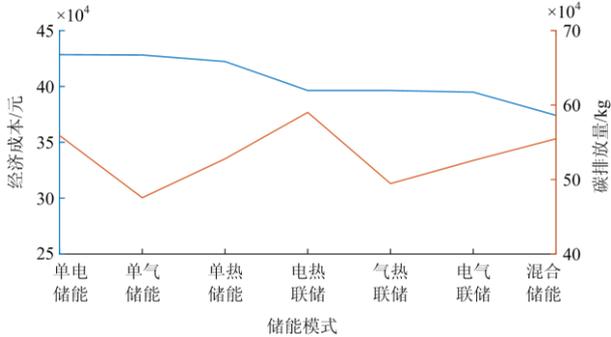


图 6 不同储能模式下成本对比图

Fig. 6 Cost comparison for different energy storage modes

4.2.4 耦合需求响应分析

若在规划阶段不考虑需求响应间的耦合关系，就会造成储能的浪费或短缺。为进行对比分析，在原模型中去掉需求响应耦合部分，并将规划结果带入具有耦合需求响应的模型进行运行优化，所得结果对比如表 5 所示。

表 5 考虑耦合需求响应与否的各目标项对比分析

Table 5 Contrastive analysis of target items considering the response of coupling demand response

类别	考虑耦合	不考虑耦合
天然气成本/万元	17.5	17.5
主网交互成本/万元	11.1	10.9
运维成本/万元	2.1	2.1
投资成本/万元	6.7	7.6
总经济成本/万元	37.4	38.1
碳排放量/10 ⁴ kg	55.5	56.8

综合目标/10 ⁴	40.2	41.0
----------------------	------	------

由表 5 可知，不考虑耦合与考虑耦合相比较，虽然在主网交互成本上有一定的下降，但却是在增加大量投资成本的基础上造成的，并进一步造成了总经济成本的上升。此外，在不考虑耦合时，多能微网碳排放量也有一定的增加。因此考虑耦合的模型能为多能微网系统配置更佳的储能容量，以达到提升经济性和环保性的效果。

4.2.5 自适应权重分析

在多目标优化中使用自适应权重系数可动态确定各时段的目标权重，赋予当前时段表现较差目标以更大的权重，使其能得到进一步的优化。方案 2 自适应权重调整情况如图 7 所示，在分布式发电高峰期的 11:00 以及 18:00 左右，多能微网经济目标 f_1 较小，自适应权重将会自动产生一个较大的权重 $1-\beta$ 给碳排放目标 f_2 以限制多能微网系统碳排放量。相反，在分布式发电较少且系统负荷较大的 16:00 左右，自适应权重系数将会产生一个较大的 β 用以主要优化多能微网系统经济支出。固定权重与动态权重各时段经济成本对比如图 8 所示，图 8 将 β 取为固定的 0.7，可以看出，当动态权重低于 0.7 时，系统对经济成本优化较少，相较于固定权重，动态权重经济成本较高。而当动态权重高于 0.7 时，系统对经济成本优化较多，相较于固定权重，动态权重经济成本较低。

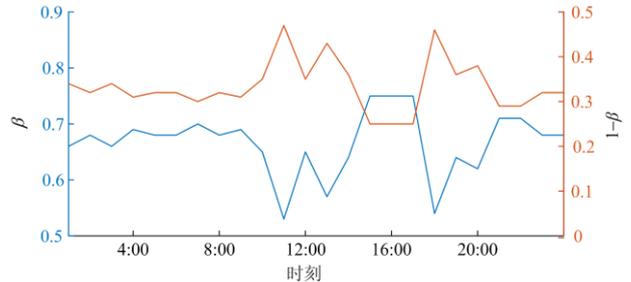


图 7 方案 2 自适应权重系数调整情况

Fig. 7 Adaptive weighting coefficient adjustment for scheme 2

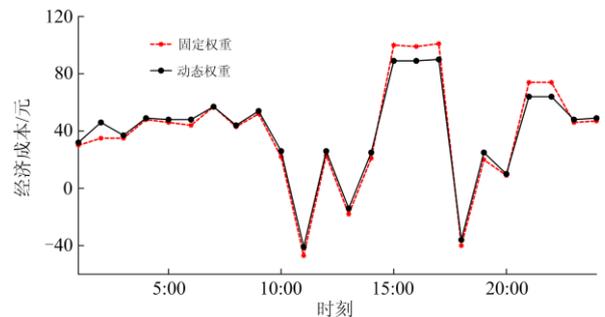


图 8 固定权重与动态权重经济成本对比

Fig. 8 Economic cost comparison of fixed weight

and dynamic weight

由于自适应权重因子 β 与线性相关系数 ε_1 、 ε_2 联系紧密, 因此, 线性相关系数的取值对模型的优化结果有直接的影响。为方便比较, 将 ε_1 、 ε_2 之和固定为 0.8, ε_1 取值对优化结果的影响如图 9 所示, 可以看出综合目标和经济目标都随着 ε_1 取值的增大而减小, 而碳排放目标随着 ε_1 取值的增大而增大, 这是由于 ε_1 取值越大就会赋予经济目标更大的权重, 因此就会越倾向于对经济性进行优化, 对碳排放目标而言 ε_1 取值越大, 碳排放目标权重越小, 优化效果越差。

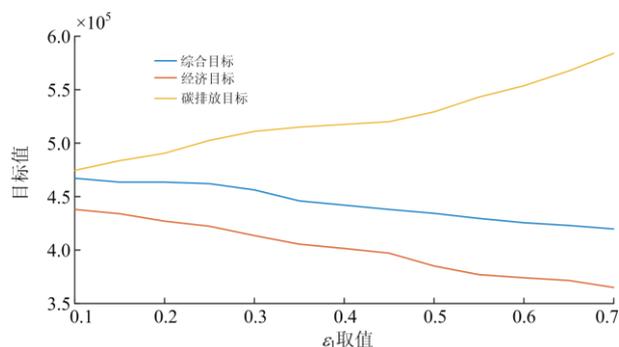


图 9 ε_1 取值对目标值的影响

Fig. 9 Influence of ε_1 on the objective

5 结论

本文在多能微网中建立了基于电/热/气耦合需求响应的多目标规划模型, 规划目标考虑了多能微网经济成本及碳排放量。算例仿真表明: 1) 在不同储能模式的对比下, 混合储能可以更好释放各类储能设备的互补优势, 具有更好的经济性和环保性; 2) 自适应权重可根据当前单一目标值对多目标问题的权重进行优化, 避免了权重的人工过多干预, 实现多能微网的自适应优化规划; 3) 需求响应可直接影响储能规划的结果, 各负荷间需求响应的耦合有利于进一步提升多能微网的经济性和环保性。

参考文献

[1] KIM I, James J A, CRITTENDEN J. The case study of combined cooling heat and power and photovoltaics for building customers using HOMER software[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 490-502.

[2] KHALIQ, ABDUL. Energetic and exergetic performance investigation of a solar based integrated system for cogeneration of power and cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 1305-1316.

[3] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017,

37(6): 282-287.

CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287.

[4] 刘辉, 刘强, 张立, 等. 考虑需求侧协同响应的热电联供微网多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 44-51.

LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, et al. Multi-objective planning for combined heat and power microgrid considering demand side cooperative response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 44-51.

[5] TAN X G, LI Q M, WANG H. Advances and trends of energy storage technology in microgrid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1):179-191.

[6] HUANG W, ZHANG N, YANG J, et al. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1452-1464.

[7] BAZARGAN D, FILIZADEH S, GOLE A M. Stability analysis of converter-connected battery energy storage systems in the grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1204-1212.

[8] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20):75-83.

LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 75-83.

[9] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 8-18.

ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 8-18.

[10] CHEN C, DUAN S, CAI T, et al. Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 2762-2773.

[11] MAKAROV Y V, DU P, KINTNER-MEYER M C W, et al. Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 34-40.

[12] BLUDSZUWEIT H, DOMINGUEZ-NAVARRO J A. A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1651-1658.

- [13] 陈厚合, 杜欢欢, 张儒峰, 等. 考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 174-182, 188.
CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182, 188.
- [14] LI J L, XUE Y S, TIAN L T, et al. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1):1-7. DOI: 10.1186/s41601-017-0067-8.
- [15] 赵波, 包侃侃, 徐志成, 等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5465-5474.
ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465-5474.
- [16] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.
ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [17] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 主动配电网中储能和需求侧响应的联合优化规划[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 199-206.
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Integrated optimal panning of energy storage and demand side response in active power distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 199-206.
- [18] 宋阳阳, 王艳松, 衣京波. 计及需求侧响应和热/电耦合的微网能源优化规划[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3469-3476.
SONG Yangyang, WANG Yansong, YI Jingbo. Microgrid energy source optimization planning considering demand side response and thermo-electrical coupling[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3469-3476.
- [19] MA L, LIU N, ZHANG J H, et al. Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: a game theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1930-1942.
- [20] ABDOLLAHI G, SAYYAADI H. Application of the multi-objective optimization and risk analysis for the sizing of a residential small-scale CCHP system[J]. Energy and Buildings, 2013, 60(3): 330-344.
- [21] MARLER R T, ARORA J S. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 41(6): 853-862.
- [22] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-590.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-590.
- [23] 邓佳乐, 胡林献, 李佳佳. 采用二级热网电锅炉调峰的消纳弃风机理及经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 41-47.
DENG Jiale, HU Linxian, LI Jiajia. Analysis on mechanism of curtailed wind power accommodation and its economic operation based on electric boiler for peak-load regulation at secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 41-47.
- [24] 杜琳, 孙亮, 陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 110-116.
DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.
- [25] 魏大钧, 孙波, 赵峰, 等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 7-12.
WEI Dajun, SUN Bo, ZHAO Feng, et al. Multi-objective optimization design and operation analysis of a small biomass biogas combined cooling heating and power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 7-12.

收稿日期: 2019-10-15; 修回日期: 2020-03-19

作者简介:

吴勇(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微网规划; E-mail: 1004809153@qq.com

吕林(1963—), 男, 教授, 主要研究方向为配电网规划运行; E-mail: lvlin@scu.edu.cn

许立雄(1982—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为微能源网规划与运行、人工智能在电力系统分析中的应用。E-mail: xulixiong@163.com

(编辑 姜新丽)