

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200167

计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度

张涛^{1,2}, 郭玥彤^{1,2}, 李逸鸿^{1,2}, 余利^{1,2}, 章佳莹³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 区域综合能源系统(Regional Integrated Energy System, RIES)是解决社会能源利用效率低以及可再生清洁能源难以消纳问题的有效途径之一。首先建立了包含风电、多种储能以及电转气(Power-to-Gas, P2G)设备的 RIES 模型。针对电、气、热负荷柔性特征和可调度价值, 结合三种负荷在 RIES 中形成的耦合关系, 提出计及电-气-热多种负荷的综合需求响应模型。同时采用典型场景集考虑风电出力的不确定性, 建立区域综合能源系统优化调度模型。该模型以综合运行成本最少、碳排放量最小、能效利用率最高为优化目标, 利用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解并输出 Pareto 最优前沿解集。仿真算例设置了4种场景, 分析电、气、热需求响应及 P2G、储能设备接入对区域综合能源系统运行优化的影响。结果验证所建立多目标优化调度模型既能够提高能源利用效率, 也能保证系统的环保经济运行。

关键词: 区域综合能源系统; 多目标优化调度; 综合需求响应; P2G; NSGA-II

Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response

ZHANG Tao^{1,2}, GUO Yuetong^{1,2}, LI Yihong^{1,2}, YU Li^{1,2}, ZHANG Jiaying³

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. Shaoxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

Abstract: A Regional Integrated Energy System (RIES) is one of the effective ways to solve the problems of low efficiency of social energy utilization and difficult consumption of renewable clean energy. First, the RIES model including wind power, various energy storage and Power-to-Gas (P2G) equipment is established. In view of the flexible characteristics and dispatchable value of electric, gas and thermal loads, and the coupling relationship between the three loads in RIES, an integrated demand response model that takes into account electric, gas and thermal loads is proposed, and the uncertainty of wind power contribution is considered in a typical scenario set to establish the regional integrated energy system optimization dispatch model. The model is optimized for the lowest combined operating cost, lowest carbon footprint and highest energy efficiency utilization, and solved by using the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) to output the Pareto optimal frontier solution set. Four scenarios are set up in the simulation case to analyze the impact of electricity, gas and heat demand response and access of P2G and energy storage equipment on the operational optimization of an RIES. The results show that the multi-objective optimization scheduling model can not only improve energy efficiency, but also ensure environmental protection and the economic operation of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407104).

Key words: regional integrated energy system; multi-objective optimization scheduling; integrated demand response; P2G; NSGA-II

0 引言

随着能源危机与环境污染问题的日益加剧, 近

年来对多种能源互联融合和互补集成的需求不断提高, 区域综合能源系统(Regional Integrated Energy System, RIES)应运而生, 成为未来能源领域的发展趋势^[1-5]。综合需求响应(Integrated Demand Response, IDR)作为传统需求响应(Demand Response, DR)在

RIES 中的衍生, 不仅能够通过价格或激励机制刺激需求侧调整负荷用能量、平缓负荷波动, 还能调整用户用能方式, 实现多能互补^[6-7]。考虑多种能源综合需求响应的 RIES 优化调度对于提高系统能源利用效率和运行经济性具有重要意义。

为了提高系统运行效率以及消纳更多的清洁能源, 国内外学者从运行维护成本、环境效益成本等角度开展了 RIES 经济运行与优化调度的研究。文献[8]以运行成本为优化目标, 建立了含新能源、储能设备及 CCHP 系统的 RIES 的联合调度模型。文献[9]将传统的储电、储冷、储热设备和需求侧灵活性负荷相结合, 提出广义储能的概念, 以系统总运行成本为优化指标对 RIES 进行结构及运行优化研究。文献[10]在电-气互联系统中引入碳交易机制, 并将碳交易成本计入系统运行成本, 分析了天然气价格、碳交易价格以及天然气网络约束对综合系统运行的影响。上述文献并未充分利用综合需求响应进一步对系统进行优化调度, 且主要考虑系统运行的经济性, 未将对 RIES 极为重要的环境及能效指标与经济指标共同应用到调度问题中。

随着能源网络耦合程度逐渐提高, 综合需求响应成为 RIES 运行优化的关键环节。文献[11]在传统需求响应机制的基础上, 考虑综合能源系统中各种能源的价格和需求差异, 建立了基于价格的需求响应优化模型。文献[12-13]考虑电/热负荷需求响应和供需双侧热/电耦合, 建立了考虑热电联合需求响应的调度模型。文献[14]考虑激励型需求响应资源参与系统调度, 通过经济激励信号引导用户自愿参与需求响应, 但未考虑多种能源间的替代关系。综上, 在考虑需求响应的 RIES 优化调度的现有研究中, 大多数仅考虑单一电力柔性负荷或热/电耦合, 较少综合考虑电力、天然气、热能共同耦合参与需求响应, 且主要考虑了负荷的可转移特性, 但综合需求响应的管理范围不仅包括需求侧负荷, 还包括储能设备和能量转换设备实现的可替代负荷。

本文在现有研究基础上, 首先分析 RIES 中多种能源的耦合关系, 并根据电、气、热三种负荷自身的柔性特性和响应能力, 构建电、气、热需求响应模型。然后, 利用典型场景处理风电出力的不确定性, 以系统运行成本、碳排放量最低以及能效利用率最高为优化目标, 建立 RIES 的多目标优化调度模型。最后, 结合实际算例, 采用 NSGA-II 算法对上述模型进行求解, 得到多种场景下的 Pareto 最优前沿解集。仿真结果表明, 考虑综合需求响应的 RIES 的优化调度能够提高能源利用效率, 同时保证系统的环保经济运行。

1 RIES 结构

本文所研究 RIES 的结构及能量流向如图 1 所示, 包含能源供给、能源转换、负荷需求 3 个模块, 由风机(Wind Turbine, WT)、CCHP 机组、燃气锅炉 (Gas Boiler, GB)、电锅炉(Electric Boiler, EB)、电储能 (Electrical energy Storage, ES)、热储能 (Heat Storage, HS)、气储能(Gas Storage, GS)、电负荷、热负荷、气负荷构成。系统的电负荷由风机、CCHP 机组、燃气轮机及外部电网供应; 热负荷由电锅炉、CCHP 机组和燃气锅炉供给; 气负荷由系统与上级电网、气网进行双向能量交换, 电、气、热负荷需求响应灵活参与调度。

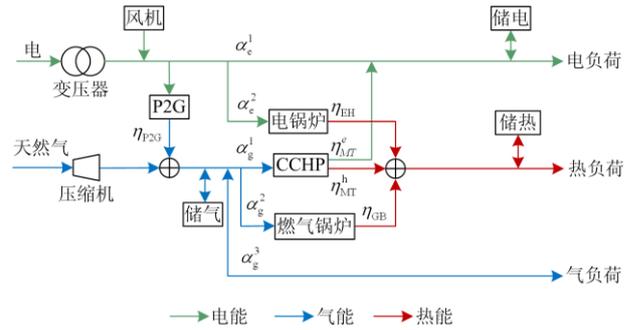


图 1 RIES 结构

Fig. 1 Structure of RIES

图 1 中, α_e^1 、 α_e^2 分别输入电能直接供给电负荷、电锅炉的分配系数, $\alpha_e^1 + \alpha_e^2 = 1$; α_g^1 、 α_g^2 、 α_g^3 分别为天然气供能给 CCHP、燃气锅炉、气负荷的分配系数, 且 $\alpha_g^1 + \alpha_g^2 + \alpha_g^3 = 1$; η_{EB} 、 η_{GB} 、 η_{P2G} 为电锅炉、燃气锅炉和 P2G 的转换效率; η_{MT}^e 、 η_{MT}^h 为 CCHP 系统的电、热转换效率。

由图 1 所示的 RIES 模型结构图中的能源耦合关系, 得到系统耦合表达式为

$$\mathbf{L} = \mathbf{C}\mathbf{P} + \mathbf{P}^S \quad (1)$$

式中: \mathbf{L} 为负荷侧需求矩阵; \mathbf{C} 为耦合关系矩阵; \mathbf{P} 为能源供给矩阵; \mathbf{P}^S 为储能功率矩阵。

根据供给侧接入机组类型以对应类型能源相加求和的方式得到能源供给矩阵表达式为^[15]

$$\begin{bmatrix} P_e^{\text{in}} \\ P_g^{\text{in}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_e + P_w \\ P_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -P_{P2G} \\ \eta_{P2G} P_{P2G} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: P_w 、 P_{P2G} 分别为风电功率和经 P2G 设备转换的功率。

根据系统内部各个机组转换参数可将式(1)转变为

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_g \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_e^1 & \alpha_g^1 \eta_{MT}^e \\ 0 & \alpha_{g,t}^3 \\ \alpha_e^2 \eta_{EH} & \alpha_g^1 \eta_{MT}^h + \alpha_g^2 \eta_{GB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e^{\text{in}} \\ P_g^{\text{in}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_e^S \\ P_g^S \\ P_h^S \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： L_e 、 L_g 、 L_h 分别为电、热、气负荷需求； P_e^{in} 、 P_g^{in} 分别为能源供给侧电、气功率； P_e^S 、 P_g^S 、 P_h^S 为蓄电池、储气设备、储热设备与电力、天然气、热力系统间的交互功率。

2 电-气-热综合需求响应模型

传统需求响应仅对电负荷曲线进行调节，调节方式通常为采用价格信号刺激用户主动改变用电习惯^[16-17]。在RIES中，负荷为电、气、热等多种形式，天然气与电能拥有相同的市场商品属性，热力具有供热系统惯性和温度变化时滞性，因此，气、热负荷也可参与需求响应进行优化调节。

另外，RIES中多种能源的耦合使得负荷能以相互替代和多能互补的形式参与需求响应。因此，在RIES中，电、气、热负荷不仅能以各自形式参与需求响应，还可以通过能源转换设备及储能装置实现三种负荷耦合互补、相互替代。

本文所构建的综合需求响应包括负荷转移和负荷替代两个部分，首先基于电、气、热负荷的可调节性，对电、气、热负荷分别建立需求响应模型，实现三种负荷在横向时间上的转移。其次，利用RIES中的能源转换设备及储能设备，使电、气、热三种负荷耦合互补，实现三种负荷在纵向上的相互替代。由于负荷替代体现在由于系统设备冗余，用户可选择消费不同能源类型以满足电、气、热负荷需求，已涵盖在能源系统耦合关系之中，所以本节着重对负荷转移进行建模，即根据电、气、热负荷各自特性，建立需求响应模型。

2.1 电负荷需求响应

本文的电负荷转移响应建模采用价格型需求响应。通过引入峰谷分时电价，对用户形成合理的用电导向，从而减小负荷峰谷差，提升系统的运行可靠性^[18]。电量电价弹性矩阵法是目前应用最广泛的价格型响应建模方法，可利用电量电价弹性指标来表示各时间段内电负荷变化率和电价变化率^[19]，其表达式为

$$m = \frac{\Delta L}{L} \left(\frac{\Delta c_p}{c_p} \right)^{-1} \quad (4)$$

式中： m 为电量电价弹性指标； c_p 、 Δc_p 为峰谷电价格和其与固定电价相比的差额； L 、 ΔL 为负荷响应前的用电量与负荷响应量。

依据分时电价与传统固定电价比值，建立包含自弹性系数和互弹性系数的电量电价弹性矩阵^[20]为

$$\mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & L & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & L & M_{2n} \\ M & M & M & \\ M_{n1} & M_{n2} & L & M_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_{ii} = \frac{\Delta L_i}{L_i} \left(\frac{\Delta c_{pi}}{c_{pi}} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$M_{ij} = \frac{\Delta L_j}{L_i} \left(\frac{\Delta c_{pj}}{c_{pj}} \right)^{-1} \quad (7)$$

式中： \mathbf{M}_e 为电量电价弹性矩阵； M_{ii} 为自弹性系数； M_{ij} 为交叉弹性系数； L_i 、 ΔL_i 为*i*时段用户的电量及其变化量； c_{pi} 、 c_{pj} 和 Δc_{pi} 、 Δc_{pj} 分别为*i*、*j*时段的电价及其变化量。

根据电量电价弹性矩阵 \mathbf{M}_e ，求得基于分时电价的用户负荷响应量为

$$\Delta L_{e,t} = \begin{pmatrix} L_{e,0,f} & 0 & 0 \\ 0 & L_{e,0,p} & 0 \\ 0 & 0 & L_{e,0,g} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{M}_e \cdot \begin{pmatrix} \Delta c_{e,pf} / c_{e,p0,f} \\ \Delta c_{e,pp} / c_{e,p0,p} \\ \Delta c_{e,pg} / c_{e,p0,g} \end{pmatrix} \frac{1}{2} \quad (8)$$

式中： $\Delta L_{e,t}$ 为实施分时电价后的用电转移量； $L_{e,0,f}$ 、 $L_{e,0,p}$ 、 $L_{e,0,g}$ 分别为实施分时电价前峰、平、谷时段的用电量； $c_{e,p0,f}$ 、 $c_{e,p0,p}$ 、 $c_{e,p0,g}$ 和 $\Delta c_{e,pf}$ 、 $\Delta c_{e,pp}$ 、 $\Delta c_{e,pg}$ 分别表示传统固定电价和其与峰、平、谷电价的差值。

2.2 气负荷需求响应

进一步考虑价格响应机制在天然气系统中的作用，类比价格型电力负荷，价格型天然气负荷随分时气价变化亦存在如式(9)的关系。

$$\Delta L_{g,t} = \begin{pmatrix} L_{g,0,f} & 0 & 0 \\ 0 & L_{g,0,p} & 0 \\ 0 & 0 & L_{g,0,g} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{M}_g \cdot \begin{pmatrix} \Delta c_{g,pf} / c_{g,p0,f} \\ \Delta c_{g,pp} / c_{g,p0,p} \\ \Delta c_{g,pg} / c_{g,p0,g} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中： $\Delta L_{g,t}$ 为实施分时气价后的用气转移量； $L_{g,0,f}$ 、 $L_{g,0,p}$ 、 $L_{g,0,g}$ 分别为实施分时气价前峰、平、谷时段的用气量； $c_{g,p0,f}$ 、 $c_{g,p0,p}$ 、 $c_{g,p0,g}$ 和 $\Delta c_{g,pf}$ 、 $\Delta c_{g,pp}$ 、 $\Delta c_{g,pg}$ 分别表示传统固定气价和其与峰、平、谷气价的差值； \mathbf{M}_g 为气价气量弹性矩阵。

2.3 热负荷需求响应

热负荷具有感知模糊性和时间延时性。温度是

热负荷的主要调节尺度, 用户对其敏感度较低, 在舒适期间内改变温度值对用户并没有太大影响; 其次, 受供热系统网络特性的影响, 热网在传输热负荷过程中具有热惯性^[21-22], 负荷调节速率较慢。本文从以上两个特性出发, 将热负荷作为柔性负荷参与区域综合能源系统优化调度。

以 ARMA 时间序列模型描述供热系统温度动态特性, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} T_{h,t} = \sum_{j=0}^J \alpha_j T_{h,t-j} + \sum_{j=0}^J \beta_j T_{g,t-j} + \sum_{j=0}^J \gamma_j T_{w,t-j} \\ T_{n,t} = \sum_{j=0}^J \theta_j T_{h,t-j} + \sum_{j=0}^J \phi_j T_{g,t-j} + \sum_{j=0}^J \omega_j T_{w,t-j} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $T_{h,t}$ 、 $T_{g,t}$ 、 $T_{n,t}$ 、 $T_{w,t}$ 为 t 时段热网回水温度、供水温度、建筑物室内温度、室外温度; J 为 ARMA 时间序列模型阶次; α 、 β 、 γ 、 θ 、 ϕ 、 ω 为供热系统热惯性物理参数。

建筑物室内温度变化与供暖功率、环境温度的关系表达式为

$$T_{in,t+1} = T_{in,t} e^{-\Delta t/\tau} + (RQ_t + T_{out,t})(1 - e^{-\Delta t/\tau}) \quad (11)$$

$$\tau = R \cdot C_{air} \quad (12)$$

式中: $T_{in,t}$ 为 t 时段的建筑物室内温度; $T_{out,t}$ 为 t 时段的室外温度; R 为建筑物的等效热阻, 单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$; C_{air} 为室内空气热容 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) / $^{\circ}\text{C}$; Q_t 为时间 t 内向建筑物的热功率。

由式(11)得到由室内温度变化计算热功率的关系式为

$$Q_t = \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{T_{in,t+1} - e^{-\Delta t/\tau} T_{in,t}}{1 - e^{-\Delta t/\tau}} - T_{out,t} \right) \quad (13)$$

根据人体舒适度的温度范围, 对于室内温度有如下约束:

$$T_{min} \leq T_{in,t} \leq T_{max} \quad (14)$$

式中, T_{min} 和 T_{max} 为最低室内舒适温度和最高温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

3 计及 IDR 的 RIES 多目标优化

3.1 典型场景集

由于风电出力具有波动性和随机性, 其实际出力往往与预测出力存在偏差。本文主要考虑了风电出力的预测误差生成典型场景集, 再对其进行削减, 从而将不确定性优化问题转化为确定性问题的求解。风电出力预测误差 $\Delta P_{w,t}$ 近似服从均值为 0、方差为 $\sigma_{w,t}$ 的正态分布。 t 时段风电出力表达式为

$$P_{w,t} = P_{wf,t} + \Delta P_{w,t} \quad (15)$$

式中, $P_{w,t}$ 、 $P_{wf,t}$ 分别为 t 时段的风电实际出力和预测出力。

首先利用拉丁超立方采样模拟风电波动场景, 生成 M 个初始场景集, 详细步骤见文献[23]。生成初始场景后, 采用同步回代法对生成的场景缩减。定义 M 为场景的初始集合, N 为削减场景集合, 初始为空集, 场景 s 的发生概率为 $p(s)$, 具体削减步骤如下。

1) 计算场景 s 和 s' 之间的距离 $D_{s,s'} = \|P_s - P_{s'}\|_2$ 。

2) 对每个场景 k , $D_k(r) = \min D_{k,s'}$, 其中 r 表示与场景 k 距离最近的场景, $s' \in M$, $k \neq s'$ 。

3) 计算概率距离 $P_k^D(r) = p(k) \cdot D_k(r)$, 并选出概率距离最小的场景 d , 即 $P_d^D = \min P_k^D$, $k \in M$ 。

4) 每减去一个场景, 将其概率加到距离其最近的场景上: $M = M - \{d\}$, $N = N - \{d\}$, $p(r) = p(r) + p(d)$ 。

通过不断更新场景及其对应的概率, 使缩减后的场景和初始场景的概率距离最为接近, 最终获得 N 个风电出力预测误差场景集, 并通过式(15)计算可得相应的风电实际出力。

3.2 目标函数

为实现 RIES 的经济运行、环境友好以及节能减排, 建立了计及经济、环境、能效多目标的目标函数模型。多目标优化调度问题的目标函数为

$$\min f = (F_1, F_2, F_3) \quad (16)$$

式中: F_1 为经济目标函数; F_2 为环境目标函数; F_3 为能效目标函数。

1) 目标 1: 系统运行成本最少。

在本文所提 RIES 优化调度模型中, 经济目标函数主要包括系统的外电网购电成本、购气成本、燃料成本、运维成本。本文将调度周期分成 24 个时段, 每一个时段为 1 h, 其目标函数为

$$\min F_1 = \sum_{s=1}^N p(s) \left[\sum_{t=1}^T (C_{e,t} P_{e,t,s}^{\text{in}} + C_{g,t} P_{g,t,s}^{\text{in}}) + C_G(P_{i,t,s}) + OM_G(P_{i,t,s}) \right] \quad (17)$$

式中: T 表示总运行周期; $p(s)$ 为第 s 场景发生的概率; N 为场景个数; $C_{e,t}$ 、 $C_{g,t}$ 分别为 t 时段内购电、气价格; $P_{e,t,s}^{\text{in}}$ 、 $P_{g,t,s}^{\text{in}}$ 分别为 t 时段 s 场景下购电、气量; $C_G(P_{i,t,s})$ 、 $OM_G(P_{i,t,s})$ 表示第 i 个可控机组在 t 时段的燃料成本、运维成本。

各可控机组燃料成本、运维成本表达式如式(18)和式(19)所示。

$$C_G = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C_{g,t} \times \frac{1}{LHV_{\text{gas}}} \times \frac{P_{i,t,s}}{\eta_{i,t,s}} \quad (18)$$

$$OM_G = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I K_{OM,i} \times P_{i,t,s} \quad (19)$$

式中： I 表示可控机组总数； LHV_{gas} 为天然气低热值，单位为 kWh/m^3 ，取 9.7 kWh/m^3 ； $P_{i,t,s}$ 为第 i 个可控机组在 t 时段的输出功率，单位为 kW ； $\eta_{i,t,s}$ 为第 i 个可控机组在 t 时段的转换效率； $K_{OM,i}$ 为可控机组的运行维护比例参数。

2) 目标 2：系统碳排放量最小。

RIES 具有多能互补的特性，能够灵活选择各类能源输入，达到控制碳排放的目标。因此，RIES 的碳排放为环境评价的关键。环境目标函数为

$$\min F_2 = \sum_{s=1}^N p(s) \sum_{t=1}^T (\omega_e P_{e,t,s}^{\text{in}} + \omega_g P_{g,t,s}^{\text{in}}) \quad (20)$$

式中： ω_e 、 ω_g 分别为向电网购电和天然气网消耗的二氧化碳排放系数。

3) 目标 3：能效利用率最高。

能效利用率可评价能源在数量上的利用率，较高的能源利用率说明系统在运行时可以最大限度地利用多种能源，因此，在本文提到所提 RIES 优化调度模型中，从热力学第一定律出发计算能效利用率，并将其倒数作为目标函数，如式(21)所示。

$$\min F_3 = \sum_{s=1}^N p(s) \sum_{t=1}^T \frac{L_{t,s}}{S_{t,s}} \quad (21)$$

$$L_{t,s} = L_{e,t,s} + L_{h,t,s} + L_{g,t,s} \quad (22)$$

$$S_{t,s} = P_{e,t,s}^{\text{in}} + P_{g,t,s}^{\text{in}} + P_{h,t,s}^{\text{in}} + P_{e,t,s}^s + P_{g,t,s}^s + P_{h,t,s}^s \quad (23)$$

式中： $L_{e,t,s}$ 、 $L_{h,t,s}$ 、 $L_{g,t,s}$ 分别为系统在 t 时刻 s 场景下的电负荷、热负荷、气负荷； $P_{e,t,s}^s$ 、 $P_{g,t,s}^s$ 、 $P_{h,t,s}^s$ 分别为 t 时刻电、热、气储能系统与电力、热力、天然气系统的交互功率，当能量由储能设备流向系统时，交互功率取正，当能量由系统流向储能设备时，交互功率取负。

3.3 约束条件

所提出的多目标优化调度模型约束条件包括能量平衡约束、机组和储能设备的运行约束，具体叙述如下。

1) 能量平衡约束

(1) 电能平衡约束。电网购电、风电出力供能给电制冷机、电锅炉以及 CCHP 电出力，与用户电负荷构成电能的平衡约束。

$$L_{e,t,s} = \alpha_{e,t,s}^1 (P_{e,t,s}^{\text{in}} + P_{w,t,s} - P_{P2G,t,s}) + \alpha_{g,t,s}^1 \eta_{MT}^e (P_{g,t,s}^{\text{in}} + \eta_{P2G,t} P_{P2G,t,s} + P_{g,t,s}^s) + P_{e,t,s}^s \quad (24)$$

(2) 热能平衡约束

$$L_{h,t,s} = \alpha_{e,t,s}^2 \eta_{EH} (P_{e,t,s}^{\text{in}} + P_{w,t,s} - P_{P2G,t,s}) + \alpha_{g,t,s}^1 \eta_{MT}^h (P_{g,t,s}^{\text{in}} + \eta_{P2G,t} P_{P2G,t,s} + P_{g,t,s}^s) + \alpha_{g,t,s}^2 \eta_{GB} (P_{g,t,s}^{\text{in}} + \eta_{P2G,t} P_{P2G,t,s} + P_{g,t,s}^s) + P_{h,t,s}^s \quad (25)$$

(3) 气能平衡约束

$$L_{g,t,s} = \alpha_{g,t,s}^3 (P_{g,t,s}^{\text{in}} + \eta_{P2G,t} P_{P2G,t,s} + P_{g,t,s}^s) \quad (26)$$

式中： $\alpha_{e,t,s}^1$ 、 $\alpha_{e,t,s}^2$ 分别为 t 时刻输入电能直接供给电负荷、电锅炉的分配系数； $\alpha_{g,t,s}^1$ 、 $\alpha_{g,t,s}^2$ 、 $\alpha_{g,t,s}^3$ 分别为天然气供能给 CCHP、燃气锅炉、气负荷的分配系数。

2) 机组约束

RIES 是由多个机组共同工作的综合系统，其内部机组出力受机组自身出力参数上下限约束。

$$\begin{cases} P_{P2G,\min} \leq P_{P2G,t,s} \leq P_{P2G,\max} \\ 0 \leq P_{w,t,s} \leq P_{w,t,\max} \\ 0 \leq P_{e,t,s}^{\text{in}} \leq P_{e,\max}^{\text{in}} \\ 0 \leq P_{g,t,s}^{\text{in}} \leq P_{g,\max}^{\text{in}} \end{cases} \quad (27)$$

式中： $P_{P2G,\max}$ 、 $P_{P2G,\min}$ 为 P2G 设备的出力上下限； $P_{w,t,\max}$ 、 $P_{e,\max}^{\text{in}}$ 、 $P_{g,\max}^{\text{in}}$ 分别为 t 时刻风机、电网、气网的最大供能上限。本文所建立的模型仅考虑能量单相流动，所以电气能网络的下限取 0。

3) 储能设备约束

考虑储电、储热和储气三种储能设备，从能量转换的角度，三种储能设备可用统一的模型表示。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，具体数学模型为

$$E_{t,s} = E_{t-1,s} (1 - \eta^{\text{loss}}) + \eta^{\text{char}} P_{\text{char},t,s} \Delta t - \frac{P_{\text{dis},t,s}}{\eta^{\text{dis}}} \quad (28)$$

式中： $E_{t,s}$ 为 t 时段储能设备的存储容量； $P_{\text{char},t,s}$ 、 $P_{\text{dis},t,s}$ 分别代表储能设备 t 时段储能充、放电功率； η^{loss} 、 η^{char} 、 η^{dis} 分别为储能设备的自损率、充能效率和放能效率。

$$\begin{cases} E_{\min} \leq E_{t,s} \leq E_{\max} \\ 0 \leq P_{\text{char},t,s} \leq \alpha_{\text{char},t} P_{\text{char},t} \\ 0 \leq P_{\text{dis},t,s} \leq \alpha_{\text{dis},t} P_{\text{dis},t} \\ \alpha_{\text{char},t} + \alpha_{\text{dis},t} \leq 1 \\ E_1 = E_T \end{cases} \quad (29)$$

式中： E_{\max} 、 E_{\min} 为储能设备储能容量的上下限； $\alpha_{\text{char},t}$ 、 $\alpha_{\text{dis},t}$ 为充能和放能状态，为 0、1 变量，1 表示设备处于充能或者放能状态，0 表示设备停止充放状态。

3.4 模型的求解

本文所提模型是一个多目标优化问题, 因此采用鲁棒性好、搜索能力强的带精英机制的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。结合本文优化目标, 以各时段电网和气网出力、机组的出力和分配系数作为决策变量, 通过 NSGA-II 算法得到 Pareto 最优前沿后, 使用模糊隶属度函数来评价决策者对各非劣解的综合满意度, 选取综合隶属度最大的作为折衷解^[24]。定义模糊隶属度函数为

$$\mu_j = \begin{cases} 1, & f_j \leq f_j^{\min} \\ \frac{f_j^{\max} - f_j}{f_j^{\max} - f_j^{\min}}, & f_j^{\min} \leq f_j \leq f_j^{\max} \\ 0, & f_j \geq f_j^{\max} \end{cases} \quad (30)$$

$$U = \sum_{j=1}^J \mu_j \quad (31)$$

式中: f_j 为第 j 个目标函数值; f_j^{\min} 、 f_j^{\max} 为第 j 个目标函数的最小值和最大值; U 为每个目标函数的综合隶属度。

4 算例分析

4.1 算例模型及参数设置

为验证本文所提计及 IDR 的 RIES 模型在系统优化运行、可再生能源消纳方面的有效性, 基于文献[25-27]中系统能源供需数据、机组设备参数、负荷数据进行算例仿真。对应的风机预测出力、电-气-热负荷曲线如图 2 所示, 风电预测偏差的标准差为 0.06。RIES 内部设备及储能设备参数见表 1 和表 2。

图 3 为峰谷平时电价及分时气价。选取电力和天然气的价格型需求弹性系数分别为-0.1和-0.2, 交叉弹性系数均为 0.03。热负荷需求响应方面, T_{\min} 取 15°C, T_{\max} 取 24°C, 典型日室外温度如图 4 所示。

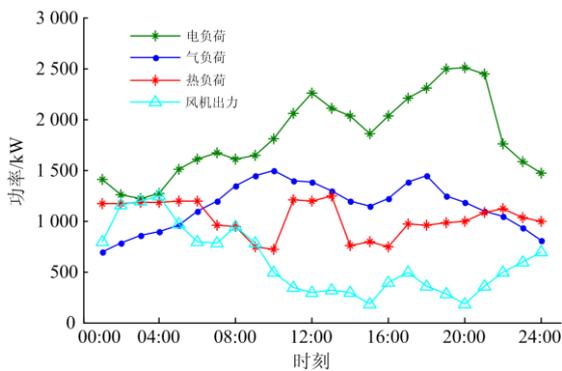


图 2 电气热负荷和风机预测出力曲线

Fig. 2 Curve of electric, gas and heat load and forecast output of wind turbine

表 1 RIES 内部设备参数

Table 1 Parameters of devices in the RIES model

参数	数值
η_{P2G}	0.6
η_{EH}	0.75
η_{GB}	0.75
η_{MT}^E	0.35
η_{MT}^H	0.35
$K_{om,EH}$	0.045
$K_{om,GB}$	0.040
$K_{om,MT}$	0.047

表 2 储能设备参数

Table 2 Parameters of energy storage equipment

参数	电储能	气储能	热储能
η^{loss}	0.01	0.005	0.02
η^{char}	0.94	0.96	0.92
η^{dis}	0.94	0.96	0.92
P_{chmin}	150	125	125
P_{chmax}	150	125	125
E_{min}	60	50	50
E_{max}	600	500	500

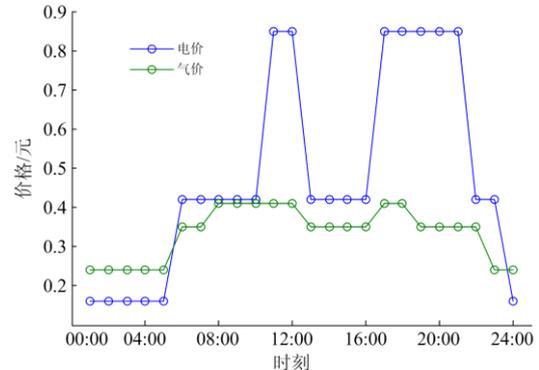


图 3 分时电价和分时气价

Fig. 3 Price of electricity and gas

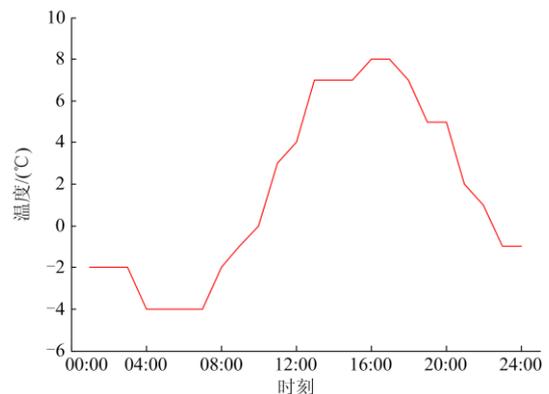


图 4 典型日室外温度

Fig. 4 Outdoor temperature in typical day

电网和天然气网的碳排放参数分别取 889 g/kW h 及 724.6 g/kW h。调度时长为 24 h，单位调度时间为 1 h，NSGA-II的参数设置如下：种群规模为 50，最大迭代次数为 200，交叉百分比取 0.7，变异百分比取为 0.3。

4.2 仿真结果分析

为验证 P2G 设备、储能设备以及考虑电、气、热负荷需求响应的优势，本文设置了以下四种场景进行仿真验证：场景 1，无 P2G，无储能设备，不考虑电、气、热需求响应；场景 2，有 P2G，有储能设备，不考虑电、气、热需求响应；场景 3，无 P2G，无储能设备，考虑电、气、热需求响应；场景 4，有 P2G，有储能设备，考虑电、气、热需求响应。得出的 Pareto 最优前沿解如图 5 所示，表 3 为不同场景目标函数的折衷解。

结合图 5 和表 3 可见，场景 2 和 3 的三个目标函数值相较于场景 1 都有所下降，体现了 P2G 和储能设备，以及电、气、热负荷需求响应对系统运行的优化效果。另外，相较于场景 3，场景 2 增加 P2G 和储能设备提高了系统能源的耦合度，因此，场景 2 的能源利用效率更高。对比场景 4 和另外三种场景可发现，在考虑综合需求响应后，系统运行成本下降了 1 653 元，碳排放量下降了 1.411 2 吨，能源利用效率提高到了 90.92%，验证了综合需求响应对系统优化运行有效性，这一方面是由于 P2G 和储电设

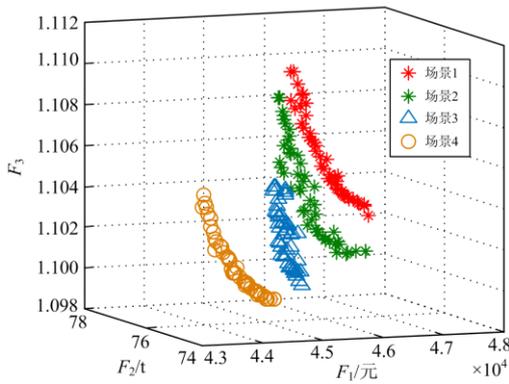


图 5 不同场景的 Pareto 前沿对比

Fig. 5 Pareto optimal fronts under different scenes

表 3 不同场景的折衷解

Table 3 Compromise solution under different scenes

场景	$F_1/\text{元}$	F_2/t	F_3
1	46 069	76.408 9	1.105 3
2	45 798	75.892 7	1.101 8
3	45 102	75.596 7	1.104 6
4	44 416	74.997 7	1.099 9

备将廉价电能转化、存储至高电价时段，另一方面电、气、热需求响应实现部分负荷转移，平抑负荷波动，从而实现系统的优化运行。

图 6 为系统响应前后用户的电、气、热负荷曲线，需求响应后用户电负荷峰谷差相对于需求响应前下降了 11.94%，气负荷的峰谷差下降了 6.9%，且负荷波动得到了很大程度的平抑，一是由于价格响应对用户用能习惯产生影响，用户负荷在价格峰、谷时段分别向下、向上平移，在平时段依据峰、谷时段的负荷变化进行调整。验证了价格型需求响应对电、气负荷优化的有效性。二是由于储电、气设备可根据系统需求充当能源供应者或消费者的角色，也具有削峰填谷的作用。另外，热负荷的峰谷差下降了 29.02%，需求响应有效地平滑了热负荷曲线。由此可见，通过优化运行，能够有效地平滑电、气、热负荷曲线，为提高系统运行经济性、环保性、能效性提供了保障。

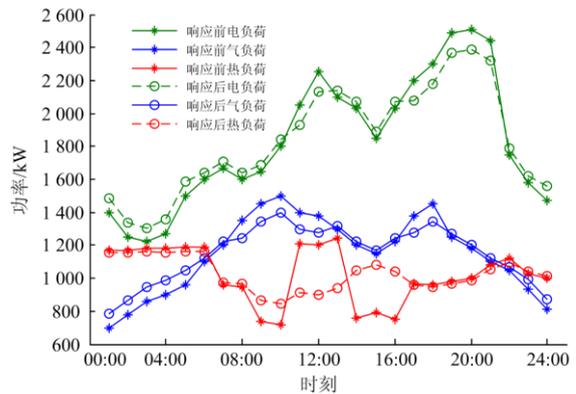


图 6 系统响应前后用户的电、气、热负荷曲线

Fig. 6 Electric, gas and heat load curve of users before and after the integrated demand response

选取场景 4 中折衷解对应的 P2G 和电储能的出力情况进行分析，具体出力情况如图 7 所示。P2G

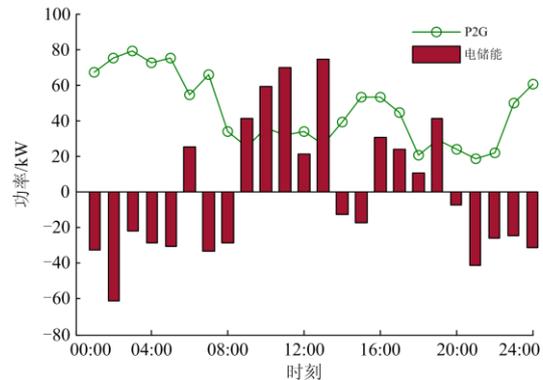


图 7 P2G 和电储能的出力

Fig. 7 Power of P2G and energy

和储能的出力主要受风电、电价及负荷的影响。在 23:00—05:00 时段, 风电出力较高, 电价和气价相对较低, 此时 RIES 从外网购电、购气量增加, P2G 的输出功率较高, 电储能主要为充电状态。在 09:00—13:00 和 16:00—19:00 时段, 风电出力偏低, 电价也相对较低, P2G 输出功率减小, 储能主要为放电状态。在其余时段, 储能会根据自身容量约束对充放电功率进行适当调整。

表 4 为场景 1 至 4 优化后的 24 h 风电消纳总量及消纳率, 结合图 2 可见, 在 23:00—05:00 时段, 风电出力以及热负荷均处于高峰, 但电负荷却处于低谷, 因此场景 1 中, CCHP 的热电耦合导致风电消纳率较低; 场景 2 相较于场景 1, 风电消纳水平有所提高, 这是由于储能设备将风电储存、P2G 将风电转化成天然气, 增加凌晨时段风电的消纳量, 且 P2G 设备处于系统始端, 直接将风电转化为气能, 减少了中间能量的转换步骤, 从而降低了风电的冗余量; 在场景 3 中, 加入电、气、热需求响应能将部分负荷转移至凌晨时段, 也可提高风电消纳水平; 场景 4 相较于场景 1、2、3, 风电消纳率提高到了 95%, 这是因为场景 4 通过 P2G、储能设备和电、气、热需求响应共同作用来平抑风电波动, 具有更稳定的风电消纳能力。

表 4 不同场景的风电消纳总量和消纳率

Table 4 Total wind power consumption and consumption rate under different scenes

场景	风电消纳总量/kW	风电消纳率
1	12 238	83%
2	12 759	87%
3	12 816	89%
4	13 540	95%

4.3 算法性能分析

为了验证 NSGA-II 算法在本文所建立模型求解上的优越性, 本文同时采用非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA) 对模型计算求解, 并将两种算法的优化结果进行对比。

图 8 为两种算法的优化结果。由图 8 可见, NSGA-II 算法的解集分布较 NSGA 算法更加均匀, 收敛性更好, 这是因为 NSGA-II 算法采用拥挤度和拥挤度算子代替 NSGA 算法的适应度共享策略, 维持了种群的多样性, 使 Pareto 解集分布更均匀。表 5 为两种算法最优折衷解目标函数值及计算时间。由表 5 可见, NSGA-II 算法的优化性能比 NSGA 算法高, 这是因为 NSGA-II 算法通过引入精英策略, 有效保留了精英个体, 避免丢失进化过程中取

得的最优解。另外, NSGA 算法虽然通过非支配排序算法保留了种群的多样性, 但计算复杂度较高, 本文模型设有三个目标函数, 且种群较大, 所以采用 NSGA 算法求解时间过长。而 NSGA-II 算法采用快速非支配排序法对种群进行分级, 降低了算法复杂度, 提升了计算速度。因此, 可以看出 NSGA-II 算法在处理本文这类多目标问题上有更好的性能。

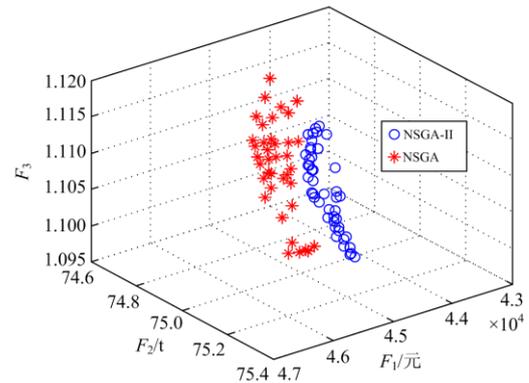


图 8 NSGA-II 与 NSGA 的 Pareto 解集对比

Fig. 8 Comparison of NSGA-II and NSGA's Pareto deconvolution

表 5 不同算法目标函数的最优折衷解

Table 5 Optimal compromise solution for objective functions of different algorithms

算法	运行成本/元	碳排放量/t	能效利用率	计算时间/s
NSGA-II	44 416	74.997 7	1.099 9	76.65
NSGA	45 106	75.834 5	1.108 6	138.67

5 结论

本文利用电、气、热负荷的柔性特性, 建立了计及电、气、热综合需求响应的 RIES 多目标优化调度模型, 并设置了 4 个场景进行对比分析, 可得出以下结论:

1) 随着电能、气能、热能联系日益紧密, 将电、气、热负荷作为柔性负荷共同参与需求响应, 可以有效降低负荷峰谷差, 优化系统运行。

2) 电、气、热负荷需求响应之后参与 RIES 的优化调度能够有效地提高系统经济性和环保性以及系统能效利用率。

3) P2G 和储能设备在 RIES 优化运行中表现出较强的推动作用。将二者结合负荷特性共同参与需求响应, 有利于增加风电的消纳, 提高系统的经济效益和能效利用率。

随着电力领域和现代人工智能技术的发展, 结合大数据信息实现多种能源多网的高效耦合, 提高 RIES 的综合运行效益是下一步的重点研究方向。

参考文献

- [1] MURTY V, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [2] WU J, YAN J, JIA H, et al. Integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167: 155-157.
- [3] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, economy, and the world[M]. New York: Palgrave MacMillan, 2011.
- [4] 何伟, 陈波, 曾伟, 等. 面向绿色生态乡镇的综合能源系统关键问题及展望[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 77-86, 93.
HE Wei, CHEN Bo, ZENG Wei, et al. Key problems and prospects of integrated energy system for green ecological townships[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 77-86, 93.
- [5] 齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 等. 计及弹性恢复的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 19-26.
QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Multi-objective optimal dispatch of district integrated energy system considering resilience[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 19-26.
- [6] YANG H Z, LI M L, JIANG Z Y, et al. Multi-time scale optimal scheduling of regional integrated energy systems considering integrated demand response[J]. IEEE Access, 2020, 8: 5080-5090.
- [7] WANG J, ZHONG H, MA Z, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system[J]. Applied Energy, 2017, 202: 772-782.
- [8] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120, 141.
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120, 141.
- [9] 李宏仲, 房宇娇, 肖宝辉. 考虑广义储能的区域综合能源系统优化运行研究[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3130-3138.
LI Hongzhong, FANG Yujiao, XIAO Baohui. Research on optimized operation of regional integrated energy system considering generalized energy storage[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3130-3138.
- [10] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16.
- [11] HE L G, LU Z G, GENG L J. Environmental economic dispatch of integrated regional energy system considering integrated demand response[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2020, 116.
- [12] 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.
- [13] 刘天琪, 卢俊, 何川, 等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 261-268.
LIU Tianqi, LU Jun, HE Chuan, et al. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 261-268.
- [14] 黄海涛, 王岱锋, 王俊伟. 计及需求响应的区域电-气互联系统综合优化运行分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 200-204.
HUANG Haitao, WANG Daifeng, WANG Junwei. Analysis of integrated optimization operation of regional electro-gas system considering demand response[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(7): 200-204.
- [15] 陈丽萍, 林晓明, 许苑, 等. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 9-16.
CHEN Liping, LIN Xiaoming, XU Yuan, et al. Modeling and multi-objective optimal dispatch of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 9-16.
- [16] 彭春华, 刘兵, 左丽霞, 等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 60-68.
PENG Chunhua, LIU Bing, ZUO Lixia, et al. Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 60-68.
- [17] 宁佳, 汤奕, 高丙团. 基于需求响应潜力时变性的风-火协同控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8):

- 1728-1738.
NING Jia, TANG Yi, GAO Bingtuan. Coordinated control method of wind farm-AGC unit-load based on time-varying characteristics of demand response potential[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1728-1738.
- [18] ZHANG C, XU Y, DONG Z Y, et al. Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4236-4247.
- [19] PRAKASH R T, JINHO K. Consumers' price elasticity of demand modeling with economic effects on electricity markets using an agent-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 390-397.
- [20] ALDAOUDEYEH A I, KAVASSERI R G, LIMAJR I T. Characterization of forward electricity market price variations and price-responsive demands[C] // 2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), March 2017, Denver, United States: 211-218.
- [21] 邹云阳, 杨莉, 冯丽, 等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13-19.
ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19.
- [22] 陈柏翰, 冯伟, 孙凯, 等. 冷热电联供系统多元储能及孤岛运行优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3231-3243.
CHEN Bohan, FENG Wei, SUN Kai, et al. Multi-energy storage system and islanded optimal dispatch method of CCHP[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3231-3243.
- [23] 袁桂丽, 董金凤, 魏更, 等. 基于需求响应和多能互补的冷热电联产微网优化调度[J]. 电力建设, 2019, 40(9): 64-72.
YUAN Guili, DONG Jinfeng, WEI Geng, et al. Optimal scheduling of combined cooling heating and power microgrid based on demand response and multi-energy coordination[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(9): 64-72.
- [24] AGRAWAL S, PANIGRAHI B K, TIWARI M K. Multi-objective particle swarm algorithm with fuzzy clustering for electrical power dispatch[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(5): 529-541.
- [25] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑P2G多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3067-3077.
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3067-3077.
- [26] 张涛, 章佳莹, 王凌云, 等. 计及用户行为的电气-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 86-97.
ZHANG Tao, ZHANG Jiaying, WANG Lingyun, et al. Day-ahead economic dispatch of electric-gas-heat integrated energy system considering user behaviors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 43(11): 86-97.
- [27] 蒋文超, 严正, 曹佳, 等. 计及柔性负荷的能源枢纽多目标综合优化调度[J]. 电测与仪表, 2018, 55(13): 31-39.
JIANG Wenchao, YAN Zheng, CAO Jia, et al. Multi-objective comprehensive optimal dispatch of energy hub considering flexible load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(13): 31-39.

收稿日期: 2020-02-19; 修回日期: 2020-07-16

作者简介:

张涛(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统优化运行、高电压绝缘及测试技术、电力系统过电压与接地技术; E-mail: unifzhang@hotmail.com

郭玥彤(1997—), 女, 硕士, 研究方向为综合能源系统优化调度; E-mail: 647839978@qq.com

李逸鸿(1997—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统优化运行。E-mail: 381026042@qq.com

(编辑 周金梅)