

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211511

# 基于用户舒适度区间约束的电热区域综合能源系统优化运行研究

史喆, 金宇飞, 王勇, 张晓天, 杨博, 周沫

(国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 由于风电资源的波动性与随机性, 需要电热区域综合能源系统具备一定的灵活性来匹配风的变化以减小弃风。热负荷无论在管道传输还是建筑内部供热, 都具有一定热惯性, 这使得热负荷曲线随风电波动进行一定的调整, 是区域综合能源系统灵活性运行的重要手段。现有研究中热惯性往往在预先设定的范围内变化, 缺乏应对热惯性在系统中波动的理论指导。为此, 引入用户舒适度概念, 将热惯性与室内、室外温度实时关联起来, 提出一种基于用户舒适度区间约束的电热区域综合能源系统优化运行方法。考虑用户舒适度的室内温度平衡, 建立以室内散热量为控制变量、以系统总运行成本和弃风惩罚成本最小为优化目标的运行优化模型。通过算例分析, 所提方法能够在用户的舒适区间内有效降低运行成本, 同时提高弃风消纳能力。

**关键词:** 电热区域综合能源系统; 热惯性; 消纳弃风; 用户舒适度

## Optimal operation of an electric heating region integrated energy system based on a user comfort interval constraint

SHI Zhe, JIN Yufei, WANG Yong, ZHANG Xiaotian, YANG Bo, ZHOU Mo

(Economic Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

**Abstract:** Because of the volatility and randomness of wind power, it is necessary for an integrated energy system in an electric heating area to have a certain flexibility to match the wind changes and reduce wind abandonment. Thermal load, whether in pipeline transmission or in building internal heating, has a certain thermal inertia, which means that the thermal load curve can be adjusted to a certain extent by wind electric fluctuation. This is an important means of flexible operation of a regional integrated energy system. In existing research, thermal inertia often changes within a predetermined range, and there is no theoretical guidance to deal with the fluctuation of thermal inertia in the system. This paper introduces the concept of user comfort, correlates thermal inertia with indoor and outdoor temperatures in real time, and proposes an optimal operation method of an electric heating zone integrated energy system based on the constraint of user comfort interval. Considering the indoor temperature balance of user comfort, an operational optimization model is established to minimize the total operating cost and wind abandonment penalty cost of the system with indoor heat dissipation as the control variable. An example is given to show that the proposed method can effectively reduce operating cost within the user's comfort zone and improve the wind abandonment capacity.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 2021YF-48).

**Key words:** electric heating area integrated energy system; thermal inertia; wind abandonment; user comfort

## 0 引言

随着能源消耗的不断增长, 化石能源短缺、气候变暖、环境污染等问题日益突出, 促进风电消纳

的区域综合能源系统越来越受重视<sup>[1]</sup>。在区域综合能源系统中, 由于风电资源存在波动性, 系统应具备一定的灵活性, 使系统更有效地消纳弃风<sup>[2]</sup>。电热区域综合能源系统, 在不考虑可调节电负荷的情况下, 负荷侧的灵活性主要来自热负荷<sup>[3]</sup>。而热负荷无论在管道传输还是建筑内部供热, 都具有一定

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(2021YF-48)

热惯性,这使得热负荷曲线可以随区域综合能源系统需求变化,随风电波动进行一定的调整,是区域综合能源系统灵活性运行的重要手段<sup>[4-5]</sup>。

在电热区域综合能源系统中,电能传输较快,可瞬时完成;而由于热能传输较慢,能量的传输和热量变换需要横跨多个时段和横断面<sup>[6-7]</sup>。由于系统热能传输实际供热运行过程工况复杂,会直接使各个管网供热阻力流动特性发生变化,而导致热网中各管道压力阻抗的流动不确定性,必然也会导致热网中各个管段供热流量的流动不确定性,从而引起整个系统供热的流动惯性不确定性等问题<sup>[8-9]</sup>。由于区域综合能源系统的多种能量相互之间耦合和影响,所以热惯性也必将会影响整个系统的优化运行。因此,深入研究热惯性的机理,分析其对区域综合能源系统的重要影响极其重要。

近年来,国内外专家学者针对区域综合能源系统的热惯性优化提出了多种系统优化运行解决方案。文献[10-12]主要提出由于电锅炉、供热系统管网和其他建筑物的热惯性源荷物理模型结构差异较大,导致区域综合能源系统的实际源荷物理同步运行协调优化问题日益突出。文献[13-15]重点研究了大型固体加热电锅炉的多种实际源荷物理运行模型及其特性,并将其热惯性与不同供热系统管网和建筑物的热惯性相互有机配合,有效地提升了区域综合能源系统的运行灵活性和可调节运行能力,降低了能源经济应用成本,并对未来的多能源应用系统的源荷协调优化运行具有重要指导意义。文献[16-18]研究了考虑蓄热装置模型和供暖系统管道动态特性的热电联合优化模型,该模型能充分保证系统的经济性,促进了系统风电消纳利用能力。文献[19]研究利用节能建筑物的保温隔热特性,在风电产能高峰期降低其他热源出力,提高热电联产机组的错峰消纳能力。文献[20-22]提出一种利用热网传热介质的蓄热装置,对系统热负荷进行“移峰填谷”,将每个热用户视为一个“大房间”,建立描述热用户热负荷特性的三阶状态计算方程,用于预测微电网可再生能源的能耗,以降低系统和热电机组在热负荷高峰时的出力需求。文献[23-25]基于采暖区热惯性设计,对风力发电的间歇性和随机性进行了平滑分析。上述参考文献对于解决区域综合能源系统的热惯性问题,仅基于考虑能源热网的单一供热惯性,建立基于热网单一热惯性的区域综合能源系统优化方法,并未充分考虑用户整体舒适度,若在充分满足用户整体舒适度的前提下,同时灵活组合调整机组出力,可有效缓解弃风现象。文献[27-30]考虑热需求,建立了园区综合能源系统优化运行模型,

通过优化能源需求侧的售能价格和能源供给侧的设备运行参数等,实现了能源供给侧和需求侧的协调优化,提升了综合能源系统的经济性,促进了可再生能源的消纳。

在上述背景下,本文引入用户舒适度概念,将系统热惯性与室内外温度实时关联起来,提出一种基于用户舒适度区间约束的电热区域综合能源系统优化运行方法,建立以室内散热量为控制变量的运行优化模型,构造考虑用户舒适度的室内温度平衡约束,作为热负荷约束,以系统总运行成本和弃风惩罚成本最小为优化目标。所提方法能够在用户的舒适区内有效提高弃风消纳能力,同时降低运行成本。

## 1 供热区域热惯性及用户舒适度

### 1.1 供热区域热惯性

供暖负荷是系统集中供热区域的主要供热负荷,图1为供热区域原理图,加热流程简述为:热源对低温热介质进行加热,将其转化为高温热介质,并通过加热管传递给用户侧。高温热介质散热后又变成低温热介质,通过回水管道重返热源,热源继续将热量传递给用户侧,保证热用户的供暖需求。无论是在管道传输还是在建筑物内部供热,都具有一定的热惯性,即供热量在一定范围内波动时,建筑物内部温度不会在短时间内产生剧烈变化。利用热惯性,通过热负荷的时间平移,可有效追随新能源的变化,提高新能源利用率,且满足用户的基本需求。

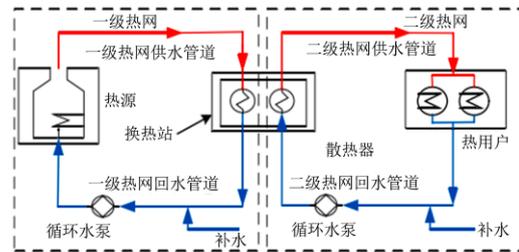


图1 供热区域原理图

Fig. 1 Schematic diagram of heating area

描述供热区域热动态过程的方程可表示为

$$C \frac{dT_{in}}{dt} = Q_R - Q_L \quad (1)$$

式中:  $Q_R$  为供热区域内所有散热器的总散热量, MW,  $Q_R = \sum Q_r$ ,  $Q_r$  为供热器的散热量, MW, 如式(2)所示;  $Q_L$  为采暖区室内热损失量, MW, 如式(3)所示;  $C$  为受热面积总热容, J/°C;  $T_{in}$  为室内

温度, (°C)。

采暖区域的采暖量是其总热负荷需求。通过调节暖气片的流量或供水温度, 可以调节采暖区域的散热量, 从而改变室内温度。

$$Q_r = \varepsilon_r W_{rs} (t_g - t_n) \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_r$  为供热器的有效系数;  $W_{rs}$  为热负荷侧的热媒流量热当量,  $W (^\circ C)^{-1}$ ;  $t_g$  为散热器进口的供水温度, (°C);  $t_n$  为供热区域的平均温度, (°C)。

$$Q_L = S \times h \times (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

式中:  $S$  为室内供热总面积,  $m^2$ ;  $h$  为单位供热面积和单位温差下室内热量损失量,  $W (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ , 如式(4)所示;  $T_{out}$  为室外温度, (°C)。

$$h = \frac{A_{wa}}{\frac{1}{K_{wa,in}} + \sum \frac{1}{K_{wa,i}} + \frac{1}{K_{wa,out}}} + K_{wi} A_{wi} + r_a V' C_a R \quad (4)$$

式中:  $A_{wa}$  为单位供暖面积等效室内墙体面积,  $m^2$ ;  $A_{wi}$  为单位供暖面积等效室内窗户面积,  $m^2$ ;  $K_{wa,in}$ ,  $K_{wa,i}$ ,  $K_{wa,out}$  为各层室内墙体内部、夹层及外部的传热系数,  $W (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ ;  $K_{wi}$  为各层室内窗户的传热系数,  $W (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ ;  $V'$  为单位供热面积下室内空气体积,  $m^3/m^2$ ;  $R$  为室内通风换气次数。

根据以上分析, 可将加热区域视为一个一阶惯性环节。有了这种热惯性, 可以在弃风期到来之前增加采暖, 在弃风期适当减少采暖, 因此, 在保证采暖区室内温度需求的基础上, 提高风电消纳量。

为将热惯性应用到存在时间间隔的综合能源系统优化运行中, 需简化方程, 得到供热区域热惯性的柔性热负荷方程, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} Q_{R,t} = \frac{k_3 T_{in}^t - T_{in}^{t-1} - k_2 T_{out}^t}{k_1} \\ k_1 = \frac{\Delta T}{C' \times S} \\ k_2 = \frac{h \times \Delta t}{C'} \\ k_3 = 1 + k_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Q_{R,t}$  为供暖区域内所有散热器  $t$  时刻的总散热量,  $MW$ ;  $C'$  为单位供暖室内面积下的热容,  $J (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ ;  $\Delta t$  为优化时间间隔,  $s$ ;  $T_{in}^t$  为  $t$  时刻室内温度, (°C);  $T_{out}^t$  为  $t$  时刻室外温度, (°C);  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为相关系数。

### 1.2 用户舒适度

区域综合能源系统应在追求经济性的同时, 保

证了一定的室内舒适度。温度是舒适度的重要指标, 因此本文重点研究温度对用户舒适度的影响, 并引入温度舒适度的概念来描述人体对外界环境温度的满意度。

为了量化温度对人体舒适度的影响, 利用热舒适方程进行分析, 建立了用户舒适度(predicted mean vote, PMV)指标来近似估计温度舒适度, 如表 1 所示。

表 1 PMV 与舒适度

Table 1 PMV and comfort level

PMV	冷/热(体感)	PMV	冷/热(体感)
3	热	-1	稍凉
2	较热	-2	凉
1	稍热	-3	冷
0	舒适	—	—

当 PMV 为 0 时, 此时室内温度为人体最舒适的温度。在其他因素处于舒适状态时, 对不同室温进行 PMV 取值, 得到 PMV 与温度之间的关系, 如式(6)所示。

$$P_{MV} = \begin{cases} 0.3895(x - 26), & x \geq 26 \\ 0.4065(26 - x), & x < 26 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, 温度维持在  $26^\circ C$  时, PMV 最小, 此时用户舒适度最高。ISO7730<sup>[26]</sup> 给出了用户舒适度可接受范围内的 PMV 取值(-0.5~0.5), 相应的室内温度在  $24.8^\circ C$  和  $27.3^\circ C$  之间。

## 2 电热区域综合能源系统优化运行模型

### 2.1 计及用户舒适度区间约束的优化运行方法

在传统的区域综合能源系统中, 电负荷和热负荷都需要满足时刻平衡, 而热负荷的时刻平衡约束和热电联产的热电耦合约束共同导致弃风现象。然而, 只要供热区域的室内温度保持在用户的舒适范围内, 就不需要使热负荷实时平衡。鉴于此, 在热力系统实际物理模型的基础上, 对传统的优化运行模型进行了改进, 如图 2 所示。

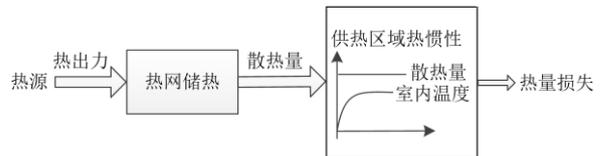


图 2 改进后热力系统物理模型

Fig. 2 Improved physical model of thermal system

热力系统主要由热源、供热管道、热网和供热区组成。热网是一种特殊的蓄热装置, 加热管内的

热介质储存了大量的能量。热网的蓄热和放热可以用来提高风电的消纳。采暖区从热网获取能量, 满足室内温度要求。根据以上分析, 散热器在采暖区域的散热和温度可视为一个大惯性环节。

计及用户舒适度区间约束的电热区域综合能源系统优化运行, 将系统热惯性与室内外温度实时关联起来, 以室内散热量为控制变量, 通过调节散热器的散热, 使供热区域室内温度保持在一定范围内, 可在不增加投资成本的前提下, 满足用户的舒适度需求。在区域综合能源系统中采用计及用户舒适度的优化运行方法, 将更加符合区域综合能源系统的实际物理模型, 有利于风电消纳, 降低系统运行成本。区域综合能源系统的拓扑如图 3 所示。

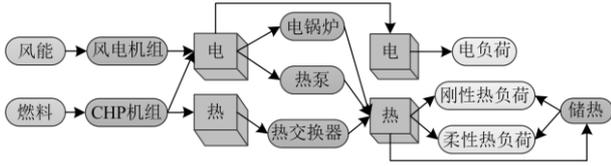


图 3 区域综合能源系统的拓扑

Fig. 3 Topology of a regional integrated energy system

## 2.2 目标函数

考虑用户舒适度的优化运行方法无需额外投资成本, 因此目标函数为最小化区域综合能源系统的总运行成本。总运行成本由两部分组成, 第一部分为热电联产机组的总运行成本, 第二部分为弃风惩罚成本。

$$\min f = F_1 + F_2 \quad (7)$$

1) 热电联产机组(combined heat and power, CHP)的总运行成本

$$F_1 = \sum_{t=1}^T (a + b(P_t^{\text{CHP}} + dQ_t^{\text{CHP}}) + c(P_t^{\text{CHP}} + dQ_t^{\text{CHP}})^2) = \sum_{t=1}^T \left( a_1 + a_2 P_t^{\text{CHP}} + a_3 Q_t^{\text{CHP}} + a_4 (P_t^{\text{CHP}})^2 + a_5 P_t^{\text{CHP}} Q_t^{\text{CHP}} + a_6 (Q_t^{\text{CHP}})^2 \right) \quad (8)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为热电联产机组运行成本相关系数;  $a_1 - a_6$  为关于机组特性的常数;  $a_5 P_t^{\text{CHP}} Q_t^{\text{CHP}}$  反映了抽汽式机组单位时间需要热电转换的成本;  $P_t^{\text{CHP}}$  和  $Q_t^{\text{CHP}}$  分别为汽轮机在  $t$  时刻的产电及产热量, MWh。

2) 弃风惩罚成本

为增大风电并网量, 引入了弃风惩罚成本。

$$F_2 = \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{PW}} - P_t^{\text{W}}) \times C_Q \quad (9)$$

式中:  $F_2$  为弃风惩罚成本;  $P_t^{\text{PW}}$  为风电机组在  $t$  时

刻的预测发电量, MWh;  $P_t^{\text{W}}$  为风电机组在  $t$  时刻的实际发电量, MWh;  $C_Q$  为弃风惩罚成本相关系数。

## 2.3 约束条件

1) 电平衡约束

$$P_t^{\text{W}} + P_t^{\text{CHP}} = P_t^{\text{HP}} + P_{\text{load},t} + P_t^{\text{EB}} \quad (10)$$

式中:  $P_t^{\text{CHP}}$  为  $t$  时刻热电联产机组的发电量, MWh;  $P_t^{\text{HP}}$  为热泵在  $t$  时刻的耗电量, MWh;  $P_{\text{load},t}$  为系统在  $t$  时刻的电负荷需求量, MWh;  $P_t^{\text{EB}}$  为电锅炉在  $t$  时刻的耗电量, MWh。

2) 热源与供热区域散热量约束

$$Q_t^{\text{CHP}} + Q_t^{\text{HP}} + Q_t^{\text{EB}} + Q_t^{\text{HS}} = Q_{R,t} \quad (11)$$

式中:  $Q_t^{\text{CHP}}$  为  $t$  时刻热电联产发电机组的产热量, MWh;  $Q_t^{\text{HP}}$  为  $t$  时刻热泵的产热量, MWh;  $Q_t^{\text{EB}}$  为  $t$  时刻电锅炉的产热量, MWh;  $Q_t^{\text{HS}}$  为储热装置在  $t$  时刻的吸放热量, MWh, 放热为正值, 吸热为负值。

3) 风电机组约束

$$0 \leq P_t^{\text{W}} \leq P_{t,\text{max}}^{\text{W}} \quad (12)$$

$$0 \leq P_t^{\text{PW}} \leq P_t^{\text{PW}} \quad (13)$$

式中,  $P_{t,\text{max}}^{\text{W}}$  为  $t$  时刻风电机组设备的最大发电量, MWh。

4) 热电联产机组约束

$$Q_{\min}^{\text{CHP}} \leq Q^{\text{CHP}} \leq Q_{\max}^{\text{CHP}} \quad (14)$$

$$P_{\min}^{\text{CHP}} \leq P^{\text{CHP}} \leq P_{\max}^{\text{CHP}} \quad (15)$$

$$\max(k_1 Q^{\text{CHP}} + P_D^{\text{CHP}}, k_2 Q^{\text{CHP}} + P_C^{\text{CHP}}) \leq P^{\text{CHP}} \quad (16)$$

$$P^{\text{CHP}} \leq k_1 Q^{\text{CHP}} + P_A^{\text{CHP}} \quad (17)$$

式中:  $Q_{\min}^{\text{CHP}}$ 、 $Q_{\max}^{\text{CHP}}$  为热电联产设备的产热量上下限;  $P_A^{\text{CHP}}$ 、 $P_C^{\text{CHP}}$ 、 $P_D^{\text{CHP}}$  为热电联产机组的热电耦合系数, 用以表示在热电联产机组电功率和供热输出功率之间的热电耦合关系。

5) 热泵约束

$$Q^{\text{HP}} = P^{\text{HP}} \times C_{\text{Op}} \quad (18)$$

$$0 \leq P_t^{\text{HP}} \leq P_{\max}^{\text{HP}} \quad (19)$$

式中:  $Q^{\text{HP}}$  为热泵装置的热输出功率, MW;  $P^{\text{HP}}$  为热泵装置的电输入功率, MW;  $C_{\text{Op}}$  为能源转化效率系数, 表示热泵装置由电能转化为热能时的能源利用效率;  $P_{\max}^{\text{HP}}$  为热泵的容量最大值, MW。

6) 电锅炉约束

$$Q^{\text{EB}} = \eta \times P^{\text{EB}} \quad (20)$$

$$0 \leq P_t^{\text{EB}} \leq P_{\max}^{\text{EB}} \quad (21)$$

式中:  $Q^{\text{EB}}$  和  $P^{\text{EB}}$  分别为电锅炉设备热功率的发出

和电功率的消耗, MW;  $\eta$  为电热转换效率系数, 是常数, %;  $P_{\max}^{\text{EB}}$  为电锅炉设备的容量最大值。

7) 储热装置约束

$$Q_{\min}^{\text{HS}} \leq Q_t^{\text{HS}} \leq Q_{\max}^{\text{HS}} \quad (22)$$

$$R_t^{\text{HS}} - R_{t-1}^{\text{HS}} = Q_t^{\text{HS}} \quad (23)$$

$$R_t^{\text{HS}} \leq R_{\max}^{\text{HS}} \quad (24)$$

$$\sum_{t=1}^T Q_t^{\text{HS}} = 0 \quad (25)$$

$$R_0^{\text{HS}} = R_{24}^{\text{HS}} = 0 \quad (26)$$

式中:  $R_t^{\text{HS}}$ 、 $R_{t-1}^{\text{HS}}$ 、 $R_0^{\text{HS}}$ 、 $R_{24}^{\text{HS}}$  为  $t$ 、 $t-1$ 、0、24 时刻储热装置所含热量;  $Q_{\min}^{\text{HS}}$ 、 $Q_{\max}^{\text{HS}}$  为储热装置吸放热功率极限;  $R_{\max}^{\text{HS}}$  为储热装置最大储热容量。

根据上述分析, 室内温度上下限与 PMV 的关系可表示为

$$\begin{cases} T_{\min} = 26 + \frac{P_{\text{MV}}}{0.4065}, P_{\text{MV}} < 0 \\ T_{\max} = 26 + \frac{P_{\text{MV}}}{0.3895}, P_{\text{MV}} \geq 0 \end{cases} \quad (27)$$

国际标准化组织(ISO)制定的 ISO7730 标准规定了高舒适度室内环境要素和控制值, 而该标准中的温度范围是指室内环境最佳热舒适温度, 室内温度基值范围为 20°C~26°C, 本文为让系统消纳更多弃风, 产生更多的热, 所以舒适温度基值定为 26°C。

ISO7730 给出了用户最舒适区间的 PMV 取值在 -0.5 和 0.5 之间, 此范围为用户可接受舒适度最优范围。由上述可得室内温度约束为

$$T_{\min} \leq T_{\text{in}} \leq T_{\max} \quad (28)$$

式中:  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  分别为室内温度最小值与最大值。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例数据描述

本文以辽宁省北部某小区域综合能源系统为例进行模型验证和分析, 所包含的各个设备模型如前文所述, 以冬季典型场景为例, 并以系统经济性成本最低为目标, 其中 CHP 机组的电出力和热出力、电锅炉的出力、热泵的出力、储热的出力、风电机组的出力、室内温度和柔性热负荷为控制变量, 区域综合能源系统包括 1 台 350 MW 的 CHP 机组, 1 台 20 MW 的电锅炉, 1 台 20 MW 的热泵和 1 个 220 MW 的风电场, 由于火电厂灵活性最高, 在系统中加入火电厂会导致系统优先使用火电机组来供电, 所以本节不考虑火电机组。其中电锅炉的效率值为 0.9, 热泵的  $C_{\text{Op}}$  为 3, 储热的吸热限值为 -20 MW,

放热限值为 20 MW, 储热量上限为 100 MW, 弃风惩罚为 300 元/MW。CHP 机组为抽汽式热电机组, 其机组约束参数如表 2, CHP 机组煤耗系数如表 3。本文选取冬季典型日的电、热负荷曲线、风电预测出力曲线和室外温度曲线如图 4—图 7 所示, 负荷包括电负荷和热负荷, 优化周期为 24 h, 单位优化时间为 1 h。

表 2 CHP 机组约束参数

Table 2 Constrained parameters of CHP unit

参数	数值	参数	数值
$Q_{\min}^{\text{CHP}}$	50	$P_A^{\text{CHP}}$	107
$Q_{\max}^{\text{CHP}}$	350	$P_D^{\text{CHP}}$	300
$P_{\min}^{\text{CHP}}$	88.32	$k_1$	-0.152
$P_{\max}^{\text{CHP}}$	247.5	$k_2$	0.706

表 3 CHP 机组煤耗系数

Table 3 Coal consumption coefficient of CHP unit

参数	数值	参数	数值
$d_1$	11.54	$d_4$	0.0002
$d_2$	0.27	$d_5$	0.000 05
$d_3$	0.04	$d_6$	0.000 003

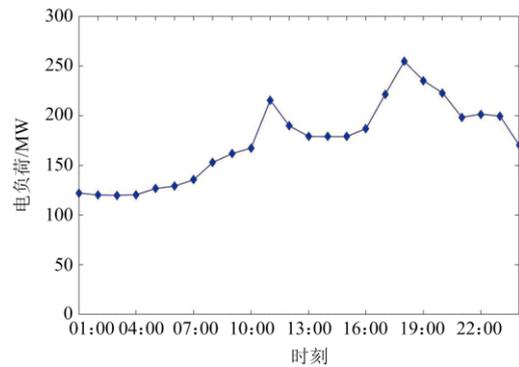


图 4 典型日电负荷曲线

Fig. 4 Typical load curve

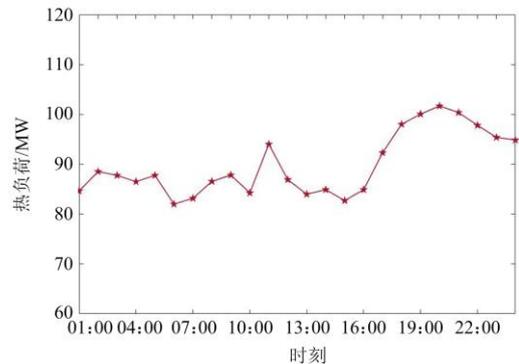


图 5 典型日热负荷曲线

Fig. 5 Typical daily heat load curve

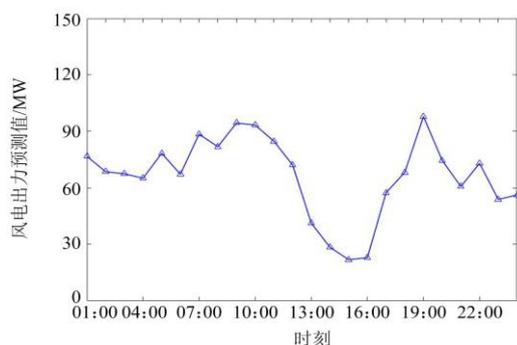


图 6 风电预测出力曲线

Fig. 6 Wind power forecast output curve

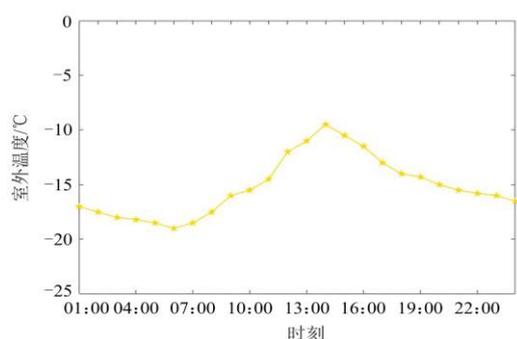


图 7 室外温度曲线

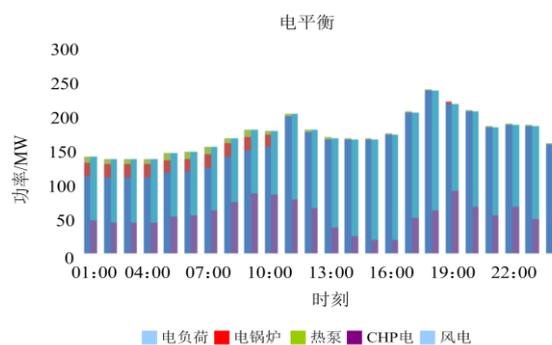
Fig. 7 Outdoor temperature curve

### 3.2 结果分析

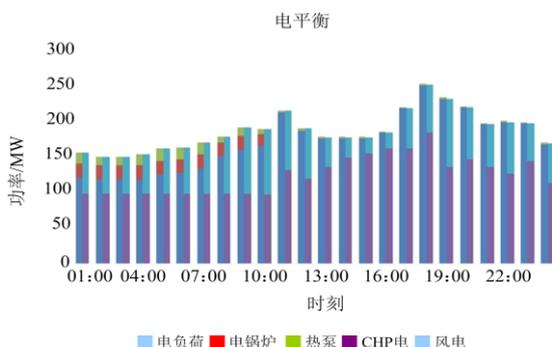
为了对比分析用户舒适度对区域综合能源系统弃风消纳优化运行的影响, 本文构建了 3 种场景进行对比, 具体场景如下: I) 系统中不考虑热惯性; II) 系统中考虑热惯性但不计及用户舒适度; III) 系统中考虑热惯性计及用户舒适度。

图 8 为两种场景电平衡优化结果, 在 00:00—06:00 内风电的消纳量为 383.73 MW, 场景 III 高于场景 II, 说明在考虑用户舒适度的供热区域热惯性的情况下, 利用居民供暖负荷的可预测性, 在不降低用户舒适度的情况下, 对热负荷进行调节, 实现负荷的波动, 可有效减少系统的弃风量。

图 9 为两种场景热平衡优化结果, 利用居民供暖负荷的可预测性, 在不降低用户舒适度的情况下, 对热负荷进行调节, 实现负荷的波动及室内温度的波动, 可以看出, 场景 III 的弃风量为 50.67 MW, 风电消纳量为 1545.09 MW, 相对于场景 II, 场景 III 的弃风量有明显的减少, 这是因为计及用户舒适度的供热区域热惯性的加入, 增加了系统热负荷的波动性, 另一方面减小了 CHP 机组的热出力, 提升 CHP 的电出力调节空间, 而且考虑用户舒适度的供热区域热惯性不需要在优化中增加额外的投资成本, 是一种值得推广的风电消纳方法。



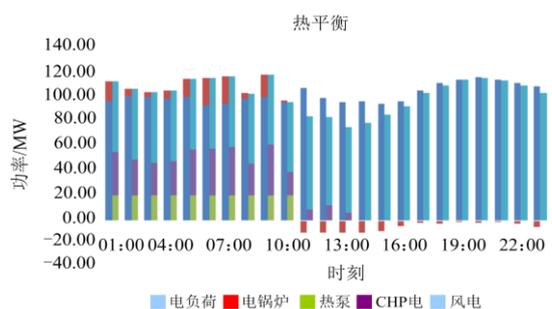
(a) 场景 II



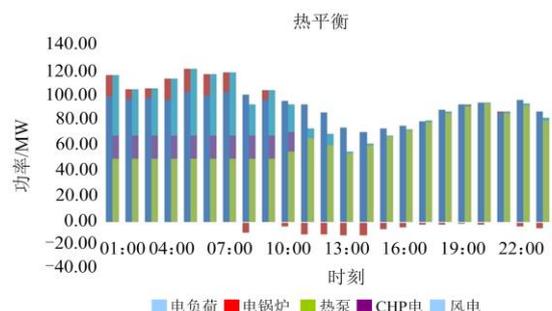
(b) 场景 III

图 8 两种场景电平衡优化结果

Fig. 8 Optimization results of electrical power balance in two scenarios



(a) 场景 II



(b) 场景 III

图 9 两种场景热平衡优化结果

Fig. 9 Optimization results of heat load balance in two scenarios

图 10 为 3 种场景风电出力的对比图。场景 I: 00:00—06:00, 风电消纳量为 318.58 MW, 在风电高发期, 风电利用电制热装置将电能转换为热能, 进而存储在储热装置中, 在负荷高发期, 将储热装置中的热能释放出来, 从而降低 CHP 的热出力和电出力, 提升了风电消纳空间。场景 II: 00:00—06:00, 风电的消纳量为 337.25 MW, 高于场景 I, 说明在考虑热惯性的情况下, 利用居民供暖负荷的可预测性, 对热负荷进行调节, 实现负荷的波动, 可有效减少系统的弃风量。场景 III: 00:00—06:00, 风电消纳量为 383.73 MW, 高于场景 I、II, 说明在考虑计及用户舒适度热惯性的情况下, 利用居民供暖负荷的可预测性, 在不降低用户舒适度的情况下, 对热负荷进行调节, 实现负荷更大幅度的波动, 更有效减少系统的弃风量。

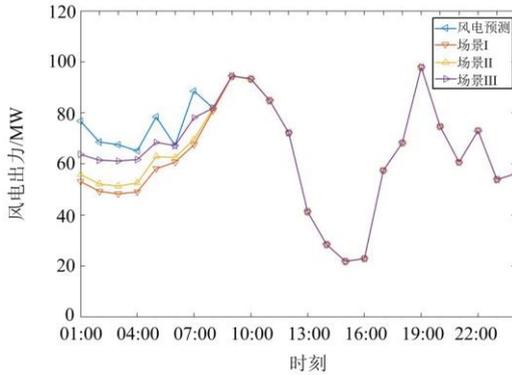


图 10 风电出力对比图

Fig. 10 Wind power output comparison diagram

图 11 为 3 种场景的热负荷对比图。场景 I: 热负荷表示在系统中未考虑热惯性, 系统的输入热负荷。场景 II: 热负荷表示在系统中考虑热惯性但不计及用户舒适度, 系统的热负荷在场景 I 的基础上可上下波动 10%。场景 III: 热负荷表示在系统中考虑计及用户舒适度的热惯性, 系统的热负荷在不影响用户舒适度的情况下, 上下波动范围远超场景 I、II。可以看出: 1) 00:00—10:00 为风电高发期, 此时间段内场景 III 的热负荷相较于场景 I、II 更大, 此时也是电锅炉和热泵主要发挥作用的时间, 在满足电负荷和热负荷需求后, 将多余的风电通过电锅炉设备和热泵装置转换为热能, 进而存储在储热装置中; 2) 14:00—21:00, 此时场景 III 的热负荷开始下降, 除了 CHP 机组对系统进行供热外, 在风电高发期利用电锅炉和热泵将电能转换为热能, 然后将热能存储在储热装置中, 开始释放热能, 这可以保证 CHP 机组的热出力降低, 从而给予 CHP 机组电出力更大的空间, 保证了风电更高的消纳率。

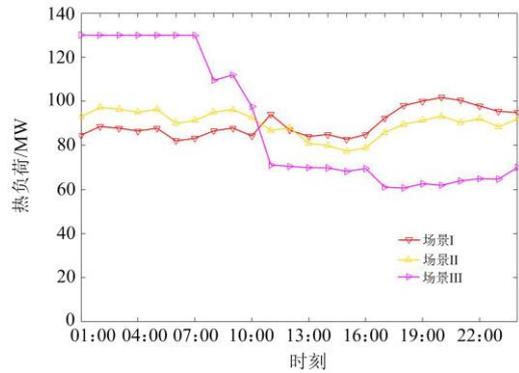


图 11 热负荷对比图

Fig. 11 Heat load comparison diagram

图 12 为 3 个场景的室内温度对比图。场景 III 利用居民供暖负荷的可预测性, 在不降低用户舒适度的情况下, 对热负荷进行调节, 实现负荷的波动及室内温度的波动。从图 12 可以看出, 场景 III 的室内温度波动明显高于场景 I、II, 这是因为计及用户舒适度的热惯性的加入, 增加了系统热负荷的波动性, 另一方面减小了 CHP 机组的热出力, 提升 CHP 的电出力调节空间。

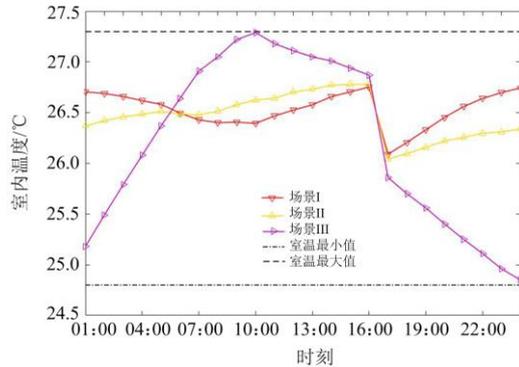


图 12 室内温度对比图

Fig. 12 Contrast diagram of indoor temperature

图 13 表示 3 种场景的风电消纳率。由图可知, 考虑用户舒适度的热惯性后, 可以更大程度地减少

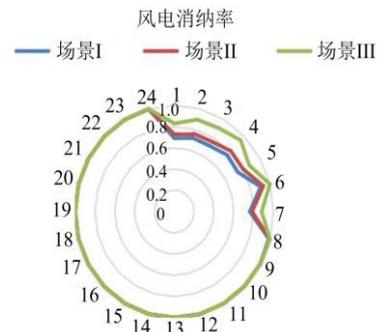


图 13 风电消纳率对比

Fig. 13 Comparison of wind power consumption rate

弃风量,提高了风电消纳率,这是因为在负荷侧考虑热惯性,在风电较多时,利用电锅炉和热泵等电制热装置制热,然后利用热惯性,可以在一段时间内少发热,从而保持一段时间内的室内温度在用户舒适度范围内,进而达到消纳弃风的目的。

图 14 和图 15 表示在场景 III 中不同用户舒适度区间约束的室内温度和风电消纳率对比,用户舒适度区间约束为 $-0.5\sim 0.5$ 的热惯性,可以较大程度地减少弃风量,而用户舒适度区间约束为 $-0.7\sim 0.7$ 的热惯性,可以更大程度地减少弃风量,这是因为扩大舒适度区间约束只为降低系统成本,增加风电消纳率,未从用户侧角度出发,使室内温度超出了用户舒适度最优区间,而当用户舒适度维持在 $-0.5\sim 0.5$ 时,既保证了用户舒适度,又降低了系统成本和弃风量。通过以上场景综合分析,考虑计及用户舒适度的热惯性的投资成本几乎为 0,且不需要提前规划和添加额外的设备,并且在热负荷波动大时,热惯性会发挥更好的作用。

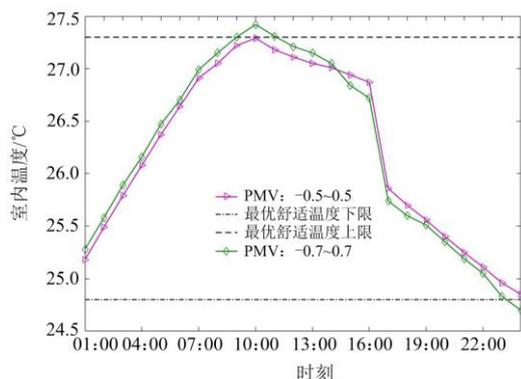


图 14 场景 III 室内温度对比图

Fig. 14 Contrast diagram of indoor temperature

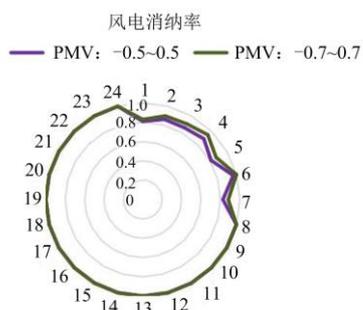


图 15 场景 III 风电消纳率对比

Fig. 15 Comparison of wind power consumption rate

表 4 分析了 3 种场景的弃风量、总运行成本和弃风率的结果对比,从表中可以看出,在考虑计及用户舒适度的热惯性后,场景 III 弃风量有明显降

低,运行成本也随之下降。

表 4 3 种场景的结果对比

Table 4 Comparison of the results of three scenarios			
场景	弃风量/MW	总运行成本/万元	弃风率/%
I	127.63	25.09	8
II	106.69	22.98	6.69
III	50.67	20.75	3.17

## 4 结论

针对我国供暖季弃风严重的问题,研究了用户舒适度的数学模型,提出一种基于用户舒适度区间约束的电热区域综合能源系统优化运行方法,构造计及用户舒适度的室内温度平衡约束,以替代传统热负荷实时平衡约束,以散热器散热为优化控制变量,以系统运行成本和弃风消纳成本最小为优化目标,有效降低了用户舒适区内的运行成本,提高了弃风消纳能力。算例结果显示,与传统方法相比,改进后的优化运行方法可以提高系统风电消纳能力,减少煤炭消耗,并提供了一个为电热区域综合能源系统更好消纳风电的新思路。通过仿真分析表明,热惯性具有较强的风电消纳潜力,合理利用热惯性,将用户舒适度控制在最优范围内,将利于区域综合能源系统消纳弃风,为区域综合能源系统优化运行策略的制定提供了参考。

## 参考文献

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [2] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.  
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [3] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3005-3013.  
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and outlook[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013.
- [4] SUN S, LIU F, XUE S, et al. Review on wind power development in China: current situation and improvement strategies to realize future development[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 589-599.

- [5] SUN T, LU J, LI Z, et al. Modeling combined heat and power systems for microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4172-4180.
- [6] 夏云峰. 2016 年中国风电开发主要数据汇总[J]. 风能, 2017(4): 34-36.  
XIA Yunfeng. Main data summary of wind power development in China in 2016[J]. Wind Energy, 2017(4): 34-36.
- [7] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.  
GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [8] 张海峰, 高峰, 吴江, 等. 含风电的电力系统动态经济调度模型[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1298-1303.  
ZHANG Haifeng, GAO Feng, WU Jiang, et al. A dynamic economic dispatching model for power grid containing wind power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1298-1303.
- [9] 陈忠华, 高振宇, 陈嘉敏, 等. 考虑不确定性因素的综合能源系统协同规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 32-40.  
CHEN Zhonghua, GAO Zhenyu, CHEN Jiamin, et al. Research on cooperative planning of an integrated energy system considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 32-40.
- [10] CHEN X, KANG C, O'MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modeling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.
- [11] LUO Guoliang, LI Yanling, TANG Wenjun, et al. Wind curtailment of China's wind power operation: evolution, causes and solutions[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1190-1201.
- [12] 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 Jiajia, HU Linxian. 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.
- [13] 邓佳乐, 胡林献, 邵世圻, 等. 电热联合系统多时间尺度滚动调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3796-3803.  
DENG Jiale, HU Linxian, SHAO Shiqi, et al. Multi-time scale rolling scheduling method for combined heat and power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3796-3803.
- [14] 帅挽澜, 朱自伟, 李雪萌, 等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 18-26.  
SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, et al. "Source-network-load-storage" coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 18-26.
- [15] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61.  
ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [16] 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.
- [17] 吕泉, 王海霞, 陈天佑, 等. 考虑风电不确定性的热电厂蓄热罐运行策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 23-29.  
LÜ Quan, WANG Haixia, CHEN Tianyou, et al. Operation strategies of heat accumulator in combined heat and power plant with uncertain wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 23-29.
- [18] 吕泉, 刘永成, 刘乐, 等. 考虑弃风特性的风电供热项目节煤效果与最佳配置方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4699-4711, 4895.  
LÜ Quan, LIU Yongcheng, LIU Le, et al. Research on coal-saving performance and optimal configuration of wind power heating project considering wind power curtailment characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4699-4711, 4895.
- [19] 袁桂丽, 王琳博, 王宝源. 基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4974-4985, 5217.  
YUAN Guili, WANG Linbo, WANG Baoyuan. Optimal dispatch of heat-power load and economy benefit analysis based on decoupling of heat and power of virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4974-4985, 5217.
- [20] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat

- and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 12-22.
- [21] 毕庆生, 吕项羽, 李德鑫, 等. 基于热网及建筑物蓄热特性的大型供热机组深度调峰能力研究[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(2): 141-144.
- BI Qingsheng, LÜ Xiangyu, LI Dexin, et al. Research on the capacity of in-depth peak regulation of large-scale heat supply unit based on characteristics of thermal storage of heat supply network and buildings[J]. Turbine Technology, 2014, 56(2): 141-144.
- [22] 杨梓俊, 丁小叶, 陆晓, 等. 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 132-140.
- YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, et al. Inverter air conditioner load modeling and operational control for demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 132-140.
- [23] 崔艳妍, 刘伟, 苏剑, 等. 考虑最优负荷削减与热负荷惯性的综合能源系统可靠性评估[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 40-48.
- CUI Yanyan, LIU Wei, SU Jian, et al. Reliability assessment of integrated energy systems considering optimal load reduction and thermal load inertia[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4): 40-48.
- [24] 张敏, 王金浩, 常潇, 等. 考虑可再生能源不确定性的热-电耦合微能源系统多目标鲁棒规划方法[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 119-129, 140.
- ZHANG Min, WANG Jinhao, CHANG Xiao, et al. Multi-objective robust programming method for thermoelectric coupled microenergy systems considering renewable energy uncertainty[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 119-129, 140.
- [25] 宋杰, 李树鹏, 张卫国, 等. 含蓄热式电采暖的综合能源系统日前优化调度策略研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(4): 14-20.
- SONG Jie, LI Shupeng, ZHANG Weiguo, et al. Research on day-ahead optimal scheduling strategy of integrated energy system with implicit thermal electric heating[J]. Smart Power, 2021, 49(4): 14-20.
- [25] Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005): UNE-EN ISO 7730—2006[S].
- [27] 赵海彭, 苗世洪, 李超, 等. 考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 573-589.
- ZHAO Haipeng, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Research on optimal operation strategy of integrated energy system in industrial park considering coupled response characteristics of cooling, heating and electricity demand[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 573-589.
- [28] 金国锋, 邢敬舒, 张林, 等. 考虑用户舒适度的蓄热式电采暖参与风电消纳的多目标优化[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 12-21.
- JIN Guofeng, XING Jingshu, ZHANG Lin, et al. Multi-objective optimization of wind power consumption based on regenerative electric heating considering user comfort[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 12-21.
- [29] 魏震波, 马新如, 郭毅, 等. 碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 1-9.
- WEI Zhenbo, MA Xinru, GUO Yi, et al. Optimal operation of integrated energy system considering demand response under carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 1-9.
- [30] 王志南, 张宇华, 黄珂, 等. 计及多种柔性负荷的虚拟电厂热电联合鲁棒优化调度模型[J]. 电力建设, 2021, 42(7): 1-10.
- WANG Zhinan, ZHANG Yuhua, HUANG Ke, et al. Robust optimal scheduling model of combined heat and power for virtual power plant with multiple flexible loads[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(7): 1-10.
- 
- 收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2022-01-29
- 作者简介:
- 史喆(1978—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力网络规划研究; E-mail: 394243244@qq.com
- 金宇飞(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网规划研究;
- 王勇(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全防御。
- (编辑 姜新丽)