

多种可再生能源渗透场景下的热电联产系统优化

黄治军

(内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010206)

摘 要: 针对传统热电联产 (CHP) 系统受热电耦合的限制, 灵活调节能力低、可再生能源消纳能力弱的问题, 分析了传统热电联产系统的灵活性不足机理, 提出采用地热源热泵来提高其灵活性。为了确定地热源热泵 (GSHP) 的最优容量, 建立了考虑切负荷惩罚、可再生能源弃用惩罚、设备投资成本及运行成本的热电联产-地热源热泵系统优化模型, 将该模型运用到可再生能源渗透率 (可再生能源发电量/总发电量) 分别为 15%、40% 和 55% 的 3 种情景中。结果表明: 地热源热泵的容量随可再生能源渗透率的提升而提升, 同时地热源热泵的集成可以扩大系统的可运行域, 提高可再生能源的消纳容量; 在最优地热源热泵容量下, 3 种场景的日节约成本分别为 38%、64% 和 70%, 同时集成系统的能源利用率可超过 100%, 可再生能源弃用的惩罚成本分别下降 100%、89% 和 89%。

关 键 词: 热电联产系统; 灵活性改造; 可再生能源渗透; 地热源热泵

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2023.04.016

[引用本文格式] 黄治军. 多种可再生能源渗透场景下的热电联产系统优化[J]. 热能动力工程, 2023, 38(4): 121-130. HUANG Zhi-jun. Optimization of cogeneration system under multiple scenarios of renewable energy penetration[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 121-130.

Optimization of Cogeneration System under Multiple Scenarios of Renewable Energy Penetration

HUANG Zhi-jun

(Inner Mongolia Datang International Totor Power Generation Co., Ltd., Hohhot, China, Post Code: 010206)

Abstract: Aiming at the problems that the traditional combined heat and power (CHP) system is limited by thermal-electric coupling, resulting in low flexibility and weak renewable energy accommodation, this paper analyzes the mechanism of insufficient flexibility of traditional CHP system and uses ground source heat pump (GSHP) to improve its flexibility. In order to determine the optimal capacity of GSHP, the optimization model of CHP-GSHP system considering load shedding penalty, renewable energy abandonment penalty, equipment investment cost and operation cost is established. The results show that the capacity of GSHP increases with the increase of renewable energy penetration, meanwhile, the integration of GSHP can enlarge the operational domain of system to improve the renewable energy accommodation capacity. This model is applied to three scenarios with renewable energy penetration rates (i.e. the ratio of renewable energy generating capacity and total power generating capacity) of 15%, 40% and 55%, respectively. The results show that under the optimal capacity of GSHP, the typical daily costs in the three scenarios are saved by 38%, 64% and 70%, the energy utilization rate of the integrated system exceeds 100%, and the penalty costs of renewable energy abandonment are reduced by 100%, 89% and 89% respectively.

Key words: combined heat and power (CHP) system, flexibility transformation, renewable energy penetration, ground source heat pump (GSHP)

引 言

随着各国对环保问题的日益关注及“碳达峰、碳中和”等战略目标的提出,可再生能源的发展受到了广泛关注^[1-2]。未来新型电力系统的构建将以可再生能源为主体,但由于可再生能源的波动性与随机性,电网的供需失衡程度极大加深。此外,为了满足冬季热负荷的供应,提高能源的利用效率,大量的热电联产系统被接入电网^[3-5]。然而,热电联产系统的热电耦合关系使其热电比的灵活调控有限,导致大规模的可再生能源接入后难以保证电力系统的安全稳定运行,造成可再生能源弃用率逐渐增加^[4]。因此,需要对热电联产系统进行技术升级改造。

目前,国内外许多学者对热电联产(Combined Heat and Power, CHP)系统进行改造,增加其灵活性。胡康等人^[6]分析了热电耦合对系统整体效率的影响,并对比了电加热储热、电热泵制热、热电机组储热、汽轮机高/中压旁路抽汽供热等4种灵活性改造方案的效果。李斌等人^[7]在传统火电机组基础上,开发利用太阳能和储能,提出了带储热的槽式太阳能光热系统、压缩空气储能和火电机组集成的“光火储”一体化发电系统。Wang 等人^[8]通过分析热电联产系统调峰能力与可再生能源发电煤耗的关系,提出降低加热抽汽压力的方案。胡康等人^[9]采用相变储热装置提升热电联产系统的灵活性。Ge 等人^[10]使用电锅炉、电解槽和氢罐等设备来扩展热电联产系统的等效运行区域。Klasing 等人^[11]在中央热电联产系统的基础设施中增加熔盐高温热能储存技术来提高系统灵活性。唐树芳等人^[12]对汽轮机进行新型凝抽背改造,并分析了改造后供热能力的提升情况,验证了该改造对热电机组灵活性的提升效果。Xu 等人^[13]提出了一种协调热电联产、区域热网和建筑物的两层控制系统,实现了热电解耦,提高了 CHP 系统的灵活性。Daraei 等人^[14]通过协调加氢解油生产和热电联产系统之间的运行,提高了 CHP 系统的灵活性和可再生能源的消纳水平。陈永辉等人^[15]针对热电解耦时间、电锅炉型式及不同电锅炉容量配置对机组实际发电负荷的影响等灵

活性改造关键技术进行研究,确定了最优电锅炉容量,提供了电锅炉装设方案。

目前,大量研究采用不同的技术来提高热电联产系统的灵活性,从而增加可再生能源的消纳,但对采用地热源热泵(Ground Source Heat Pump, GSHP)技术的系统鲜有研究。本文对热电联产系统的灵活性不足机理进行了剖析,并集成地热源热泵来提高其灵活性。为了确定地热源热泵的最优容量,提出集成系统的优化方法,分析灵活性的提升效果与特征。此外,针对可再生能源渗透率不同的场景,运行该优化方法,分析不同场景中的能源利用率在可运行域的分布规律以及集成地热源热泵带来的经济和环境收益。

1 系统改造

1.1 传统热电联产系统

集成可再生能源的热电联产系统结构如图1所示。可再生能源机组与热电联产系统共同组成混合热电联产系统。其中,热负荷由热电联产系统供应,电负荷由可再生能源机组与热电联产系统共同供应。在传统热电联产系统中,工质进入锅炉,在锅炉中吸热蒸发,再进入汽轮机高压缸做功;工质经再热后进入中压缸做功,此时工质的压力、温度均有较大降低,在低压缸的发电效率较低,抽凝式机组可以抽取这部分工质加热生活热水,供给热用户,满足热负荷。此外,从高压缸、中压缸和低压缸中抽取部分蒸汽并分别输送至高压和低压加热器来加热给水。最后,低压缸中做功后的工质经冷凝器液化和低压加热器加热后,与供热冷凝的工质在除氧器中混合并除氧,经水泵加压、高压加热器加热后进入锅炉,完成一次汽水循环。

负荷侧热电负荷具有随机性,在夜间气温较低,热负荷需求大,而电负荷需求低。而以热定电的运行模式导致电功率随热功率增长,挤压了可再生能源的消纳容量,同时可再生能源本身的波动性也不利于可再生能源的消纳。

1.2 灵活性分析及改造

传统热电联产系统的可运行域如图2所示。其数学模型可定义为:

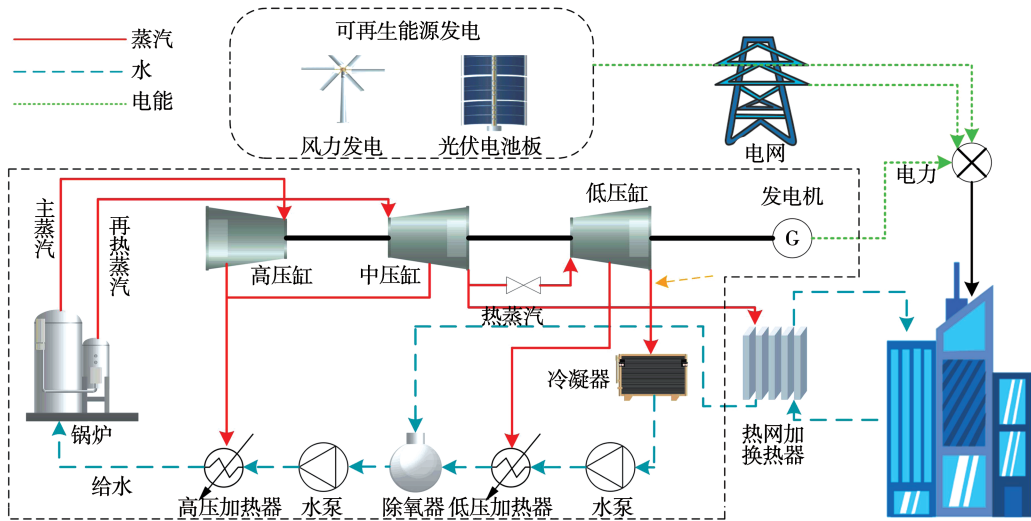


图1 可再生能源发电与热电联产耦合系统

Fig. 1 Hybrid cogeneration system with renewable energy

$$\begin{cases} P_e \geq \max \{ P_{e,\min}^{co} - c_v P_h, P_e^0 + c_m P_h \} \\ P_e \leq P_{e,\max}^{co} - c_v P_h, 0 \leq P_h \leq P_{h,\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_e —电功率, MW; P_h —热功率, MW; $P_{e,\max}^{co}$ —冷凝运行时的最大电功率, MW; $P_{e,\min}^{co}$ —冷凝运行时的最小电功率, MW; c_v —AB 的斜率, 表示增加单位热功率时, 电功率的下降量; c_m —线 BC 的斜率; $P_{h,\max}$ —系统最大热功率。

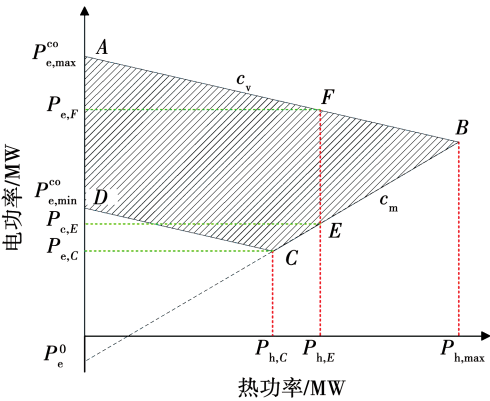


图2 热电联产系统可运行域

Fig. 2 Operational domain of cogeneration system

图2中 AB 和 CD 分别代表主蒸汽流量最大和最小的热电耦合关系曲线, 即最大和最小煤耗时的煤耗曲线; BC 表示最大抽汽下的热电耦合关系曲线。与 AB 平行的每1条曲线代表在同一煤耗下的煤耗曲线, 所有曲线共同组成了系统的可运行域。

根据图2, 当热负荷低于 $P_{h,C}$ 时, 热电联产系统电功率的调节容量为 $P_{e,\max}^{co}$ 和 $P_{e,\min}^{co}$ 的差值。当热负

荷高于 $P_{h,C}$ 时, 热电联产系统电功率的调节容量随着热负荷的增加逐渐减小, 如热负荷为 $P_{h,E}$ 时, 最大输出电功率为 $P_{e,F}$, 最小输出电功率为 $P_{e,E}$ 。当等效电负荷低于最小电功率输出时, 会导致可再生能源的弃用; 反之, 当等效电负荷高于最大电负荷输出时, 会导致切负荷的发生。为了满足热负荷, 将热电联产系统的热负荷由 $P_{h,C}$ 增加到 $P_{h,E}$, 相应的电负荷也由 $P_{e,C}$ 增加为 $P_{e,E}$, 挤压可再生能源的消纳容量, 其大小为 $P_{e,E}$ 与 $P_{e,C}$ 的差值。

为了增加可再生能源的消纳, 需要提高热电联产系统的灵活调节能力。集成地热源热泵后可有效增加热电联产系统可运行域的面积, 其作用包括两方面: 一方面, 地热源热泵可消耗电能, 降低集成系统的电功率输出, 从而增加可再生能源的消纳容量; 另一方面, 地热源热泵提供的热功率可降低热电联产系统的等效热功率输出, 进一步增加可再生能源的消纳容量。

理论上集成地热源热泵后, 热电联产系统的可运行域如图3所示。系统集成地热源热泵后, 地热源热泵可以利用部分电能获得更多热量, 可运行域面积从面 ABCD 增加到面 ABB'C'D'D, 具体数学模型为:

$$\begin{cases} P_e \leq \min \{ P_{e,\max}^{co} - c_v P_h, P_{e,\max}^{co} - c_v P_{h,\max} - (P_h - P_{h,\max})/\text{COP} \} \\ P_e \geq \max \{ P_{e,\min}^{co} - P_h/\text{COP}, P_{e,\min}^{co} - c_v P_h - (1 - c_v \text{COP}) V_{\text{GSHP}}, P_{e,\min}^{co} - c_m P_h - (1 + c_m \text{COP}) V_{\text{GSHP}} \} \\ 0 \leq P_h \leq P_{h,\max} + V_{\text{GSHP}} \text{COP} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_{GSHP} —地热源热泵的容量, MW; COP—地热源热泵能效比。

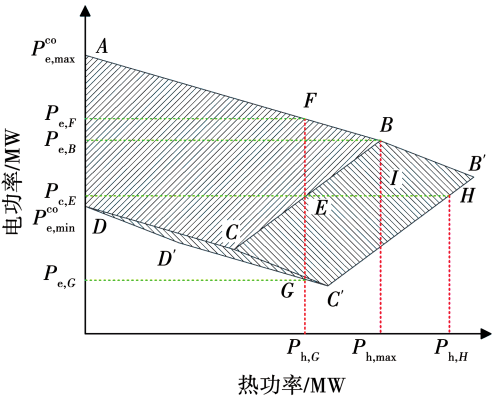


图 3 改进后系统可运行域
Fig. 3 Operational domain of modified system

图 3 中线 $B'C'$ 是地热源热泵最大输出功率与热电联产机组最大热功率下的热电耦合关系曲线, 线 $C'D'$ 是最小主蒸汽流量下地热源热泵在额定功率的热电耦合曲线, 在图形 $BB'C'C$ 内与 BB' 平行的所有曲线代表在该煤耗率和热电联产机组最大供热功率下, 地热源热泵从零到全负荷的热电耦合曲线。由图 3 可知, 集成地热源热泵扩大了热电联产系统的可运行域面积, 使灵活调节能力提升, 可再生能源消纳容量增加。这是因为当热电联产系统的等效电功率等于 $P_{e,E}$, 而等效热功率从 $P_{h,E}$ 增加到 $P_{h,max}$ 时, 传统热电联产系统必须将电功率输出从 $P_{e,E}$ 提高到 $P_{e,B}$, 致使可再生能源消纳容量降低; 而集成地热源热泵的热电联产系统的等效电功率输出仍为 $P_{e,E}$, 因此提高了热电联产系统对可再生能源的消纳水平。

2 优化模型

2.1 优化方法

为确定地热源热泵的最优容量, 最大化提升集成热电联产系统的灵活性及可再生能源消纳水平, 构建了集成系统的优化方法。具体的优化流程如图 4 所示, 主要包括初始参数输入、优化模型和性能评估等模块。

构建的优化方法为单目标优化, 优化包含系统运行成本、可再生能源弃用惩罚、切负荷惩罚及地源热泵投资成本的总成本最小值。引入弃用惩罚是为了使优化模型最大化消纳可再生能源, 而引入地热

源热泵投资成本是为了选取合理的热泵容量, 优化函数定义为:

$$\begin{aligned} \text{TEC} = \min \sum_{t=1}^T & (aP_e^t + ac_vP_h^t + b + ccr_{\text{GSHP}}^tP_{h,\text{GSHP}}^t + \\ & \rho_{\text{REC}}P_{\text{REC}}^t + \rho_{\text{LS}}P_{\text{LS}}^t)C_C + V_{\text{GSHP}}C_{\text{GSHP}} + C_M \end{aligned} \quad (3)$$

式中: TEC—总成本, 万元; P_e^t —系统电功率, MW; P_h^t —系统热功率, MW; ccr_{GSHP}^t —地热源热泵热补偿的煤耗; $P_{h,\text{GSHP}}^t$ —地热源热泵功率, MW; ρ_{REC} —弃用的惩罚因子; P_{REC}^t —可再生能源弃用功率, MW; ρ_{LS} —切负荷惩罚因子; P_{LS}^t —切负荷, MW; C_C —系统发电单位投资, 万元; C_{GSHP} —地源热泵的单位投资, 万元; C_M —维护费用, 万元; t —第 t 小时, h; a —纯冷凝状态下单位功率的边际煤耗率, $\text{kg}/(\text{MW} \cdot \text{h})$; b —空载状态下的边际煤耗率, kg/h 。

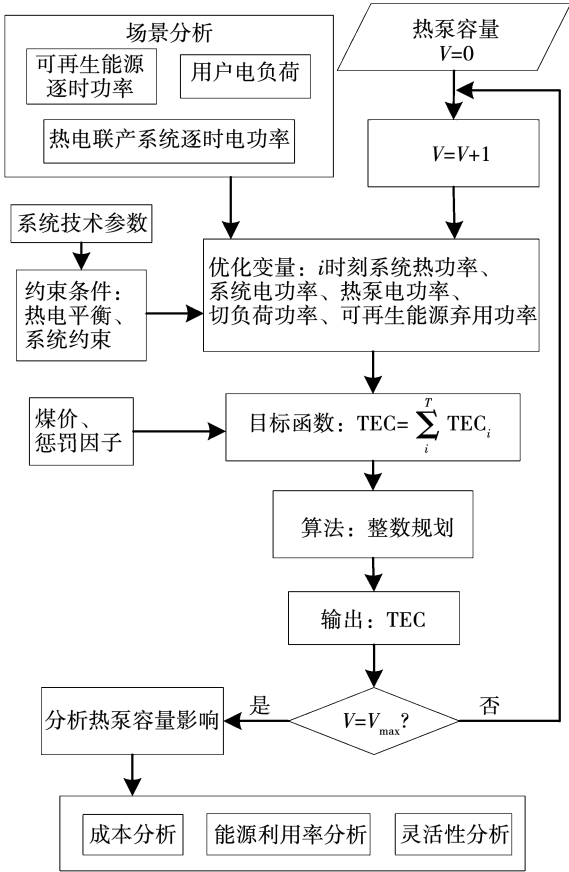


图 4 优化流程
Fig. 4 Optimization process

电平衡与热平衡的约束为:

$$P_{e,\text{CHP}}^t - P_{\text{REC}}^t + P_{\text{LS}}^t - P_{e,\text{GSHP}}^t = P_{e,\text{L}}^t \quad (4)$$

$$P_{h,CHP}^t + P_{h,GSHP}^t = P_{h,L}^t \quad (5)$$

式中: $P_{e,GSHP}^t$ —地热源热泵用电功率, MW; $P_{e,L}^t$ —电负荷, MW; $P_{h,L}^t$ —热负荷, MW。

此外,传统热电联产系统需要满足可运行域的运行约束:

$$\begin{cases} P_e \geq \max \{ P_{e,min}^{co} - c_v P_h, P_{e,min}^0 + c_m P_h \} \\ P_e \leq P_{e,max}^{co} - c_v P_h, 0 \leq P_h \leq P_{h,max} \end{cases} \quad (6)$$

根据热泵技术参数有热泵电功率约束与爬坡约束:

$$0 \leq P_{GHSP} \leq V_{GHSP} \quad (7)$$

$$r_{down} + P_{GHSP}^t \leq P_{GHSP}^{t+1} \leq r_{up} + P_{GHSP}^t \quad (8)$$

式中: r_{down} —地热源热泵下降爬坡率, MW/h; r_{up} —地热源热泵上升爬坡率, MW/h。

CHP - GSHP 模型是一个整数线性规划问题,结合枚举法通过求解可得到最小目标值下地热源热泵的最优容量。为了分析热泵容量对集成系统运行性能的影响,提取集成系统运行时的相关参数,对比分析集成系统的经济节约率、能源利用率和灵活性,由此可以证明地热源热泵容量配置的合理性与优势。

2.2 煤耗模型

传统热电联产的纯冷凝运行功率与煤耗的关系一般可定义为二次函数,而满负荷与半负荷之间的平均煤耗相差只有 10%。为了降低优化模型的复杂度,采用一次函数来描述系统的纯冷凝运行功率与煤耗的关系^[16]:

$$f(P_e^{co}) = a(P_e^{co}) + b \quad (9)$$

式中: P_e^{co} —纯冷凝状态下的功率, MW; $f(P_e^{co})$ —纯冷凝运行时的煤耗率, kg/h。

纯冷凝运行下的电功率可用热电联产系统的热、电功率来表示,则煤耗量的函数可表示为:

$$P_e^{co} = P_{e,CHP} + c_v \cdot P_{h,CHP} \quad (10)$$

热补偿煤耗可定义为:

$$f(P_{h,GSHP}^t) = aP_{e,GSHP}^t + ac_v P_{e,GSHP}^t / \text{COP} \quad (11)$$

等式右侧第 1 项为地热源热泵耗电导致的热电联产系统多发电的煤耗,第 2 项为地源热泵电热转换煤耗。

因此,地热源热泵热补偿的煤耗可定义为:

$$\begin{aligned} ccr_{GSHP}^t &= \frac{f(P_{h,GSHP}^t)}{P_{h,GSHP}^t} = \frac{aP_{e,GSHP}^t + ac_v P_{e,GSHP}^t / c_m}{(\text{COP} + 1/c_m) P_{e,GSHP}^t} \\ &= a \frac{c_v + c_m}{1 + c_m \text{COP}} \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 多种可再生能源渗透率场景

为了使系统在不同的可再生能源渗透率下均可靠、环保、节能地运行,分别考虑可再生能源渗透率为 15%, 40% 和 55% 3 种场景下的集成系统优化。热电联产系统的等效电负荷如图 5 所示。

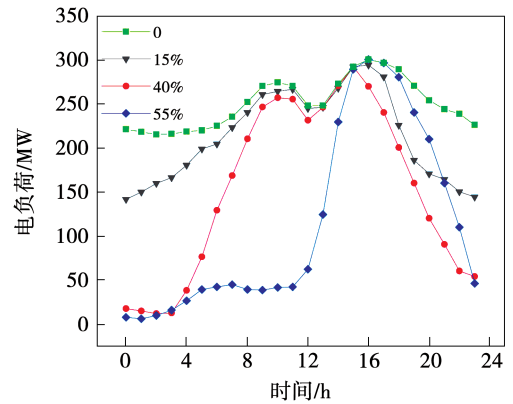


图5 3种场景下热电联产系统的等效电负荷
Fig.5 Equivalent electric load of cogeneration system under three scenarios

2.4 评价指标

根据煤耗模型,可以得到热电联产系统的能源利用率分布模型及集成地热源热泵的热电联产系统的能源利用率分布模型。在可运行区域内,热电联产系统的能源利用率分布为:

$$\gamma_{CHP} = \frac{[P_{h,CHP} + P_{e,CHP}] \times 3\,600}{f(P_{e,CHP}^{co}) \cdot \text{HHV}} \quad (13)$$

式中: HHV—煤的低位发热量, 29 307 MJ/t。

改造后系统的能源利用率为:

$$\begin{aligned} \gamma_{CHP-GSHP} &= \\ &= \frac{[P_{h,CHP} + P_{e,CHP} - (1 - \text{COP}) \cdot P_{e,GSHP}] \times 3\,600}{f(P_{e,CHP}) \cdot \text{HHV}} \end{aligned} \quad (14)$$

改造获得的成本节约率 CSR 为:

$$\text{CSR} = \frac{\text{TEC}_{CHP} - \text{TEC}_{CHP-GSHP}}{\text{TEC}_{CHP}} \times 100\% \quad (15)$$

式中: TEC_{CHP} —CHP 系统成本, 万元; $\text{TEC}_{CHP-GSHP}$ —CHP - GSHP 系统成本, 万元。

3 结果与讨论

3.1 初始参数

以 C280/N350-16.7/537/537/0.49 亚临界抽凝式热电联产系统为例,分析其灵活性与性能提升特征。基本参数如表 1 所示^[16]。

表 1 热电联产系统技术参数

Tab. 1 Technical parameters of cogeneration system

容量/ MW	c_v	c_m	$P_{e,max}^{co}/$ MW	$P_{e,min}^{co}/$ MW	$P_{h,max}/$ MW
350	0.244 5	0.628 7	382.6	175	483.5

该热电联产系统的煤耗系数 a 和 b 分别为 269.347 和 9 797.24 kg/h,最小和最大输出功率的煤耗率为 0.295 和 0.325 kg/(kW·h),切负荷与可再生能源的惩罚系数分别为 4 和 10 t/(MW·h)^[16]。此外,地源热泵的相关参数如表 2 所示^[17-18]。

表 2 地源热泵技术参数

Tab. 2 Technical parameters of ground source heat pump

COP	$r_{up}/MW \cdot h^{-1}$	$r_{down}/MW \cdot h^{-1}$
3.05	0.24	0.24

3.2 地源热泵容量对系统性能的影响

在不同的可再生能源渗透率下,热电联产系统的电负荷不同,则同容量的地源热泵无法满足不同场景下的热电联产系统的灵活运行以及对可再生能源的消纳。如果设备容量太小,热电联产系统可能会产生切负荷与可再生能源的弃用,而设备容量过大,则会造成经济与资源的浪费。因此,有必要对地源热泵在每种场景下的容量进行优化。地源热泵的经济参数如表 3 所示。

表 3 地源热泵经济参数

Tab. 3 Economic parameters of ground source heat pump

生命周 期/年	初始投资/ 万元·MW ⁻¹	维护周期/ 次·a ⁻¹	维护费用/ 元·MW ⁻¹
20	248	2	26

在 3 种场景中,地源热泵的容量从 1 到 200 MW 依次增加,基于优化模型求出每种地源热泵容量对应的目标函数最优解。由图 6 可知,可再生能源渗透率为 15%,40% 和 55% 时相应的地源热泵的最优容量分别为 19,115 和 123 MW。当可再

生能源渗透率等于 15% 时,地热源热泵的最优容量相比于 40% 和 55% 时的场景存在明显的差异性。原因是传统热电联产系统本身的灵活调节能力可以消纳低比例的可再生能源,因此对地热源热泵的需求不大。相反,系统中集成高比例可再生能源时,热电联产系统的等效电负荷较低,超出了最小的电负荷输出,因此需要地源热泵来将可再生能源电力转换成热能,提高热供应的同时,增加热电联产系统的等效电负荷。因此,本文从灵活性提升、能源利用率分布、经济成本 3 个方面分别分析 3 种场景中集成地源热泵的特征,分析耦合地源热泵的效果。

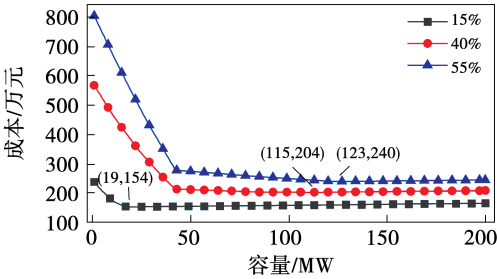


图 6 地源热泵容量优化

Fig. 6 Capacity optimization of ground source heat pump

3.2.1 灵活性对比分析

对比原始热电联产系统与集成地源热泵的热电联产系统之间的可运行域变化,分析集成系统的灵活性,其变化如图 7 所示。集成了 19 MW 地源热泵的热电联产系统的最大等效热功率相较于改造前由点 B 480 MW 增加至点 B' 538 MW,而最低等效电功率由点 C 115.8 MW 降低至点 C' 96.8 MW,最大热电比由 2.09 提升至 3.1,上升率为 48.4%,集成系统的灵活性显著提高。

以图 7 中虚线表示的热负荷 350 MW 为例子进行分析,原始热电联产系统的最小电功率为 183.5 MW,在可再生能源渗透率为 15% 的场景中,集成 19 MW 的地源热泵后,集成系统在该热负荷下的最小电功率输出为 128.1 MW,小于原始系统的 183.5 MW,二者的差值为可再生能源的消纳提供了消纳容量。而在可再生能源渗透率为 40% 和 55% 的场景中,更大的地源热泵容量,使得该负荷下集成系统的电功率可低至 60.2 MW,有效地减少可再生能源的弃用。

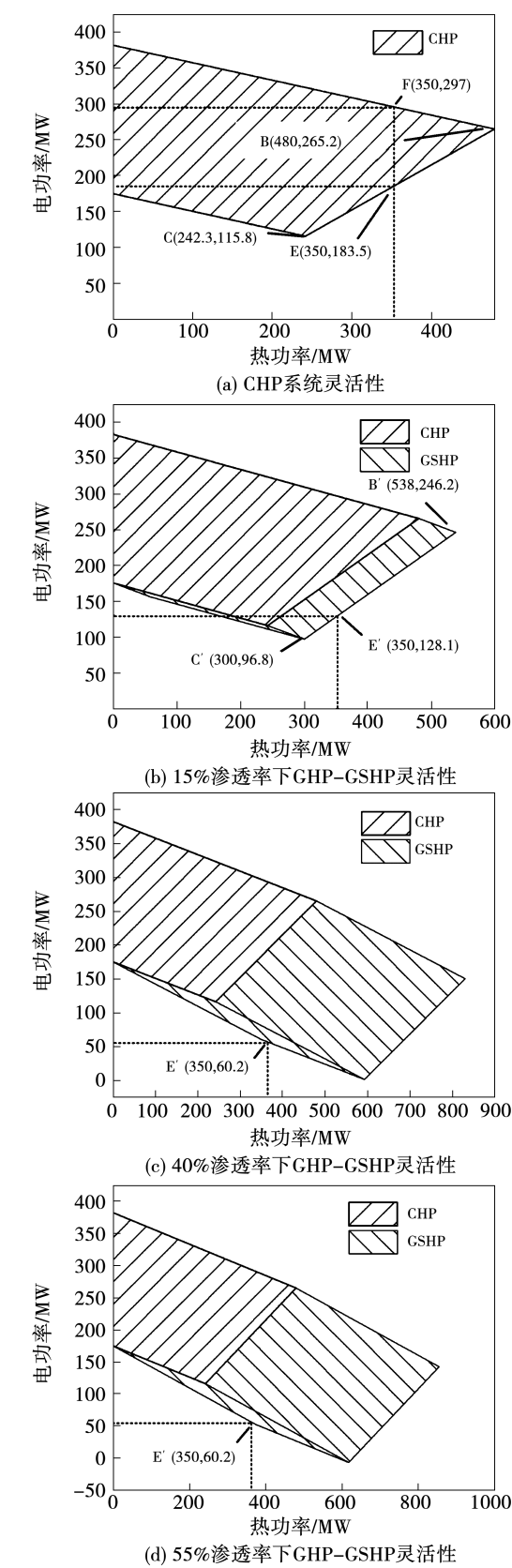


图 7 不同可再生能源渗透率下耦合地源热泵的热电联产系统灵活性

Fig. 7 Flexibility of cogeneration system of integrated ground source heat pump under different renewable energy penetration rates

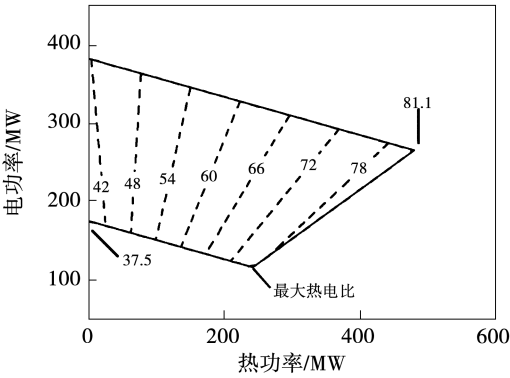
3.2.2 能源利用率分析

可运行域内的能源利用率的等高线分布如图 8 所示。提高同一煤耗曲线下的热功率时,利用中压缸的抽汽来供热,可提高可运行域内的能源利用率。反之,在相同的煤耗曲线下,电能的增加会使能源利用率下降,这是由低压缸热电转换的低效率和抽汽供热的高效率共同导致的。在热电联产系统的可行运行域内,能源利用率最小值为 37.5%,最大值为 81.1%。

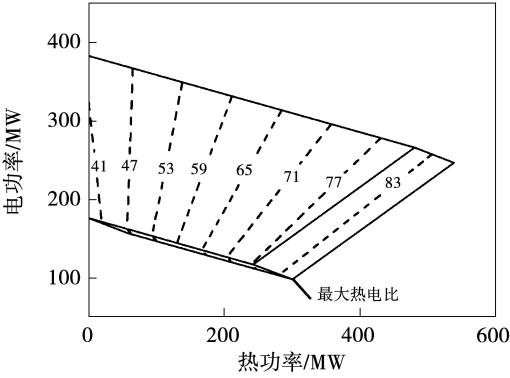
集成地热源热泵后新增可运行域内的能源利用率分布特点与原始热电联产系统的相似。同样的热负荷下,提高电功率同样使能源利用率降低;相反,同样的电负荷下,增加系统的热功率输出会提高能源利用率。因此,能源利用率随着热电比的增大而增大,在最大热电比时,能源利用率达到最大。在可再生能源渗透率为 40% 和 55% 的场景中,由于地热源热泵能效比(COP)大于 1,最大热电比处的能源利用率超过 100%,当地源热泵的负荷较大时,会增加热电联产系统的能源利用率。

3.2.3 成本分析

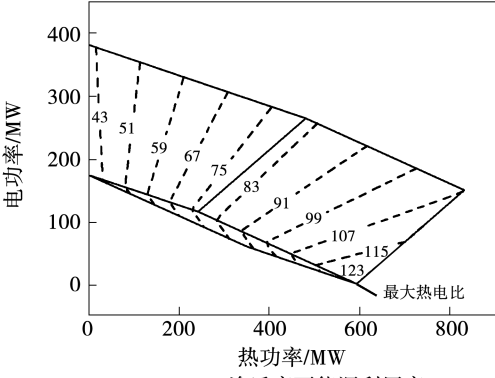
3 种不同可再生能源渗透率场景下,集成与未集成地热源热泵的热电联产系统的经济成本对比分析如图 9 所示。由图 9 可知,可再生能源渗透率为 15%、40% 和 55% 的场景中,集成地热源热泵使得热电联产系统的单日煤耗经济成本分别由 153 万、149 万和 146 万下降到 148 万、133 万和 115 万元,下降率为 3.1%、10.7% 和 21.2%。同时可再生能源的弃用惩罚成本分别由 93 万、429 万和 666 万元下降到 0、46 万和 73 万元,分别下降 100%、89% 和 89%。因此,热泵容量的增加可有效提升可再生能源的消纳,从而实现高比例可再生能源集成下的大规模消纳。此外,3 种场景中切负荷惩罚成本从 1.6 万、0.5 万和 5.1 万元上升到 4 万、15 万和 42 万元,虽然切负荷惩罚成本轻微增加,但在总成本中占比较小。总体上,集成地热源热泵虽然会带来部分设备投资成本增加,但系统性能的提升足以补偿额外成本,总成本分别从 247 万、578 万和 818 万元,降低到 153 万、203 万和 240 万元,成本节约率 SCR 分别为 38%、64% 和 70%。这证明集成地热源热泵能降低热电联产系统的成本,并增加集成系统中可再生能源的消纳水平。



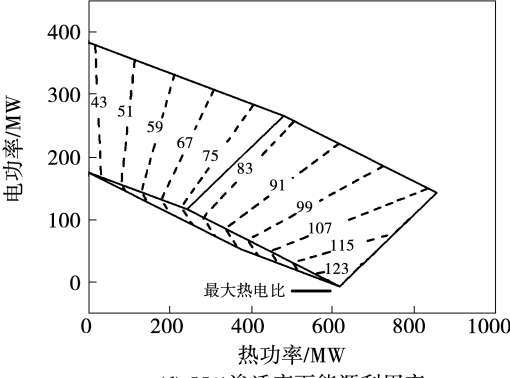
(a) CHP系统能源利用率



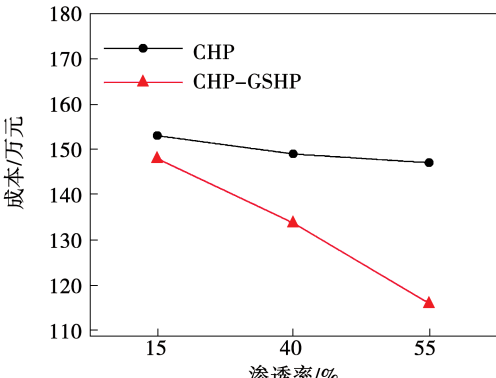
(b) 15%渗透率下能源利用率



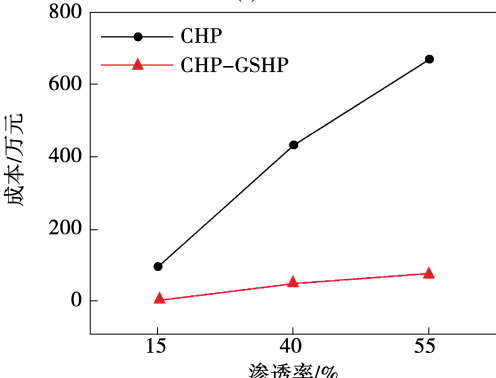
(c) 40%渗透率下能源利用率



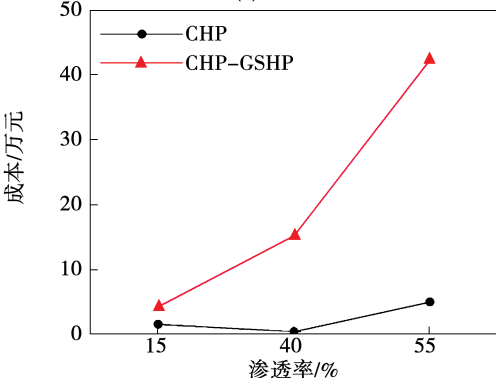
(d) 55%渗透率下能源利用率



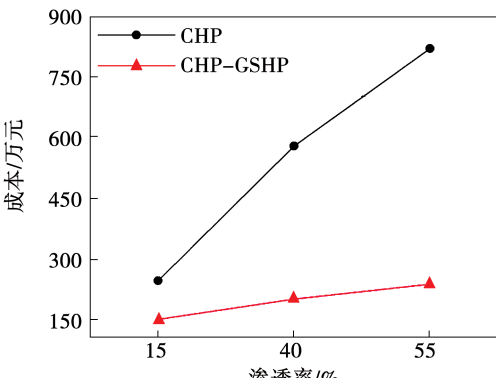
(a) 煤耗经济



(b) 弃用经济



(c) 切负荷经济



(d) 总经济

图 8 不同渗透率的系统能源利用率的等高线分布
Fig. 8 Contour distribution of system energy utilization under different penetration rates

图 9 系统改造前、后各成本对比
Fig. 9 Cost comparison before and after system renovation

3.2.4 优化变量分析

3 种场景中优化模型的各最优变量如图 10 所示。

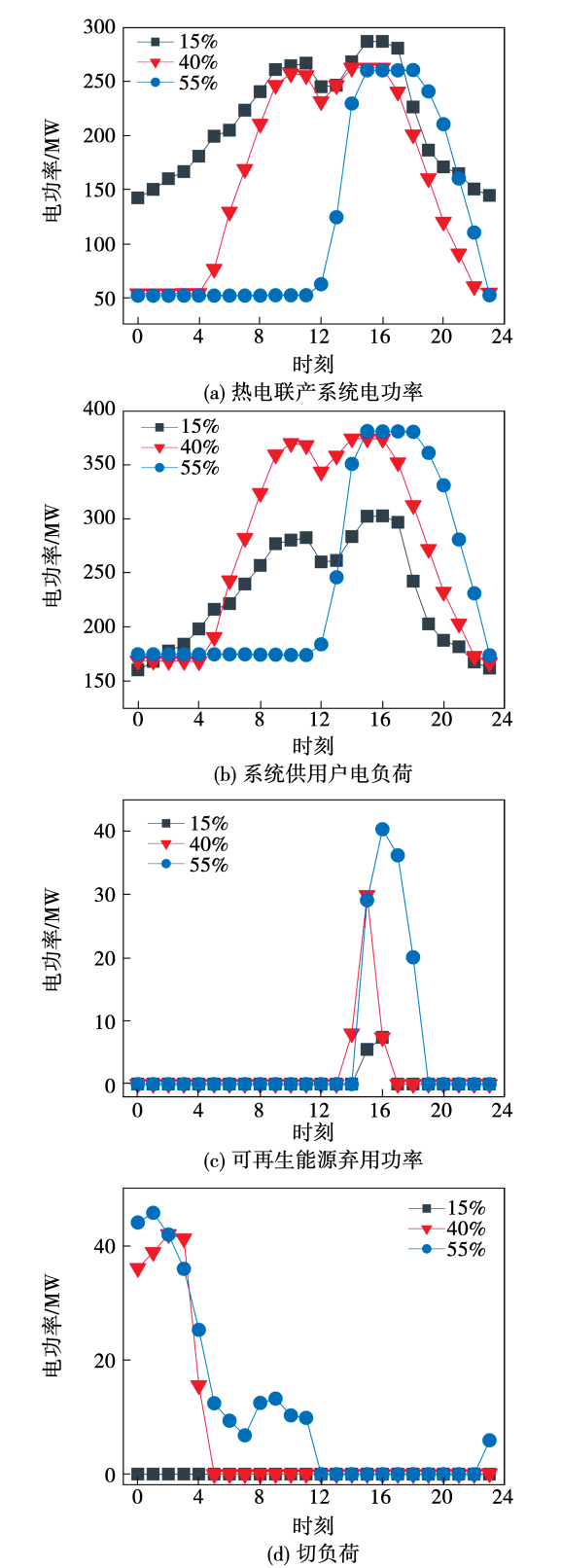


图 10 不同场景下各优化变量典型日逐时功率

Fig. 10 Typical daily hourly power of each optimization variable under different scenarios

由图 10(a)可知,热电联产系统电功率的变化趋势基本与图 5 相似,然而整体上优化后的电功率要高于图 5 的等效电负荷,而多出的电功率通过地热源热泵能将电转换成热来满足部分热负荷,同时消耗电能,因此不会挤压可再生能源的消纳容量。当热电联产系统电功率中扣除供热泵用电后,从图 10(b)可以看出,在可再生能源渗透率为 15% 的场景下,系统等效电功率与图 5 完全一致。在可再生能源输出功率较高且用户所需电负荷相对较少时,系统并不能将可再生能源完全消纳。在满足用户热负荷的情况下,即使热泵满负荷运行,消耗系统产生的电能仍然会挤压可再生能源的消纳容量。从图 10(c)可以看出,热电联产系统中集成地热源热泵可使系统在接入高比例可再生能源系统时的性能显著提升,15% 的渗透率下可完全消纳。从图 10(d)可以看出,切负荷是图 5 与系统供用户电负荷的差值,说明这一部分负荷并非由热电联产系统供应,而是由电网补给。由于此时的电负荷较高,系统为了满足热负荷,必须从中压缸抽汽供热或通过地热源热泵供热,因此减小了电功率的输出,产生的切负荷受 CHP 系统最大蒸汽量限制。

4 结 论

通过集成地热源热泵来提高抽凝式热电联产系统的灵活性,增加系统中可再生能源的消纳容量,降低经济成本,并提出了集成系统的优化方法来确定最佳热泵集成容量。通过对数据分析,得到结论:

- (1) 在不同的可再生能源渗透率的场景中,集成的地热源热泵容量存在差异性。随着可再生能源渗透率的增加,地热源热泵的容量也随之增加以消纳更多的可再生能源。
- (2) 地热源热泵的集成可以增加热电联产系统的最大热功率输出,减小最小电功率输出,从而扩大集成系统的可运行域,达到消纳可再生能源的目的。
- (3) 集成热电联产系统的能源利用率随电功率升高而降低,随热功率的升高而提升,在热电比大时,能源利用率较高。集成地源热泵后,由于地源热泵的 COP 较大,在可运行域中最大热电比附近,其能源利用率超过 100%。
- (4) 在可再生能源渗透率分别为 15% ,40% 和

55%的3种场景中,在最优地热源热泵容量下,集成系统的典型日节约成本分别为38%、64%和70%。且可再生能源弃用的惩罚成本分别下降100%,89%和89%。

参考文献:

- [1] PABLO P, LOPEZ-SANCHEZ M, GUERRERO-RIOFRIO P, et al. Determinants of renewable and non-renewable energy consumption in hydroelectric countries[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(23): 29554 – 29566.
- [2] NAZIR M S, ALI Z M, BILAL M, et al. Environmental impacts and risk factors of renewable energy paradigm-a review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(27): 33516 – 33526.
- [3] FARZANEH B, NAZARI M E. Optimal sizing of hybrid PV/T-fuel cell CHP system using a heuristic optimization algorithm[C]//The Proceedings of 2019 International Power System Conference. IEEE, 2019: 57 – 63.
- [4] DONG Jun, NIE Shi-lin, HUANG Hui, et al. Research on economic operation strategy of CHP microgrid considering renewable energy sources and integrated energy demand response[J]. Sustainability, 2019, 11(18): 4825.
- [5] PAAKKONEN A, JORONEN T. Revisiting the feasibility of biomass-fueled CHP in future energy systems-case study of the Åland Islands[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 188: 66 – 75.
- [6] 胡 康, 陈 群. 电-热综合能源系统整体能效及灵活性改造方案分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 14 – 21.
- HU Kang, CHEN Qun. Overall energy efficiency and flexibility retrofit scheme analysis of heat-power integrated energy system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 14 – 21.
- [7] 李 斌, 王雨萌, 张庆来, 等. “光火储”一体化发电系统研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 56 – 64.
- LI Bin, WANG Yu-meng, ZHANG Qing-lai, et al. Research on integrated power generation system of "solar, coal-fired and energy storage"[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 56 – 64.
- [8] WANG Cong-yu, SONG Ji-wei, ZHU Ling-kai, et al. Peak shaving and heat supply flexibility of thermal power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 193: 117030.
- [9] 胡 康, 徐 飞, 陈 磊, 等. 利用相变储热提升电力系统可再生能源消纳[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(1): 1 – 7.
- HU Kang, XU Fei, CHEN Lei, et al. Improve the integration of renewable energy sources into power system by the usage of phase-change heat storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(1): 1 – 7.
- [10] GE Pu-dong, HU Qin-ran, WU Qiu-wei, et al. Increasing operational flexibility of integrated energy systems by introducing power to hydrogen[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(3): 372 – 380.
- [11] KLASING F, ODENTHAL C, BAUER T. Assessment for the adaptation of industrial combined heat and power for chemical parks towards renewable energy integration using high-temperature TES[J]. Energy Procedia, 2018, 155: 492 – 502.
- [12] 唐树芳, 王丰吉, 唐郭安, 等. 200 MW 热电联产机组火电灵活性供热改造分析[J]. 工程技术研究, 2022, 7(6): 110 – 112.
- TANG Shu-fang, WANG Feng-ji, TANG Guo-an, et al. Analysis of thermal power flexible heating retrofit for 200 MW cogeneration units[J]. Engineering and Technology Research, 2022, 7(6): 110 – 112.
- [13] XU Xian-dong, ZHOU Yue, QADRDAN M, et al. Unlocking the flexibility of CHP in district heating systems to provide frequency response[C]//The Proceedings of 2019 IEEE Milan PowerTech. IEEE, 2019: 1 – 6.
- [14] DARAEI M, CAMPANA P E, AVELIN A, et al. Impacts of integrating pyrolysis with existing CHP plants and onsite renewable-based hydrogen supply on the system flexibility[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114407.
- [15] 陈永辉, 李志强, 蒋志庆, 等. 基于电锅炉的火电机组灵活性改造技术研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(1): 261 – 266.
- CHEN Yong-hui, LI Zhi-qiang, JIANG Zhi-qing, et al. Research on flexibility transformation technology of thermal power unit based on electric boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(1): 261 – 266.
- [16] 章 艳, 吕 泉, 李 杨, 等. 四种热电厂电热解耦改造方案的运行灵活性剖析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 163 – 171.
- ZHANG Yan, LYU Quan, LI Yang, et al. Analysis of operation flexibility of combined heat and power plant with four improved power-heat decoupling schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 163 – 171.
- [17] 刘艳峰, 宋梦瑶, 周 勇, 等. 分区串并联式太阳能-地源热泵跨季节蓄热组合系统性能研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 71 – 79.
- LIU Yan-feng, SONG Meng-yao, ZHOU Yong, et al. Research on performance of subarea series-parallel solar assisted ground source heat pump system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(12): 71 – 79.
- [18] 彭春华, 郑 聪, 陈 婧, 等. 基于置信间隙决策的综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 41(16): 1 – 10.
- PENG Chun-hua, ZHENG Cong, CHEN Jing, et al. Robust optimal dispatching of integrated energy system based on confidence gap decision[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 41(16): 1 – 10.