# 可再生能源配额制下多园区综合能源系统优化调度

骆 钊1,卢 涛1,马 瑞2,刘兴琳1,朱东歌2,王 浩1

(1. 昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650500;2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院,宁夏 银川 750001)

摘要:为提高综合能源系统可再生能源消纳能力和满足电力行业节能减排的要求,提出了一种基于可再生能 源配额制的多园区综合能源系统优化调度模型。建立了考虑热网的多园区综合能源系统模型;将可再生能 源配额制引入模型中,提出了综合考虑绿色证书交易机制和热网的综合能源系统调度模型;分析了不同算例 下的系统经济性和可再生能源消纳情况。结果表明,通过引入可再生能源配额制和热网,可有效提高系统可 再生能源消纳能力,减少系统碳排放,并保证系统经济性。

关键词:多园区综合能源系统;可再生能源配额制;热网;优化调度;碳排放

中图分类号:TM 73;TK 01 文献标

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202104006

# 0 引言

随着当今社会对能源的需求日益增加,世界各 国将可再生能源的利用上升到战略高度<sup>[1-2]</sup>。综合能 源系统(IES)因能整合多种能源,提高可再生能源利 用效率,故而受到各国能源行业的普遍关注。此外, 可再生能源配额交易机制也对可再生能源产业的发 展有重要影响<sup>[3]</sup>。因此,对建立新的可提高可再生 能源消纳能力的IES优化模型进行研究十分必要。

为提高可再生能源消纳率,国内外学者针对 IES 已经开展了详细的研究,提出了很多解决弃风、弃光 问题的方法。目前,基于 IES 对可再生能源消纳进 行的研究主要集中在利用储能设备促进可再生能源 消纳、提高新能源消纳容量等方面。文献[4]建立了 含电转气与低温余热发电装置的调度模型,通过仿 真算例验证了调度模型对促进风电消纳、提高系统 经济性的有效性。文献[5]在微电网系统中添加了 电热转换设备和热储能装置,提高了风电和光伏 (PV)消纳容量,缓解了微电网的弃风、弃光问题。 文献[6-7]将电锅炉引入 IES 中参与优化调度,提高 了风电消纳容量。上述文献在 IES 经济优化、可再 生能源消纳等方面进行了详细的研究,但未从可再 生能源消纳制度角度提升 IES 新能源消纳的能力。

在节能环保和减少对传统能源依赖的要求下, 政府和监管部门越来越重视新能源消纳的问题。目 前可再生能源配额制(RPS)被认为是促进可再生能

#### 收稿日期:2020-09-14;修回日期:2021-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907084);云南省引进人才科研启动基金项目(KKSY201704027);云南省教育厅科学研究基金资助项目(2018JS032)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51907084), the Research Start Up Fund Project of Introducing Talents in Yunnan Province(KKSY201704027) and the Scientific Research Foundation of Yunnan Provincial Department of Education(2018JS032) 源大力发展的最有效方式之一,为此国内外学者也进行了多方面的研究。文献[8-9]深入分析了国内可再生能源的发展政策、市场交易机制,总结了国外可再生能源参与市场的典型交易模式,对比分析了固定上网电价机制和配额制2种使用最广泛的可再生能源价格机制的利弊,研究了绿色证书价格、绿色能源波动等因素对市场的影响。文献[10]为激励电力辅助服务市场提供灵活服务的积极性,设计了一种调频辅助服务绿色证书量化分配方法,提升了辅助服务市场发展公平性,提高了可再生能源消纳能力。 文献[11]将 RPS 引入风电并网调度模型,通过仿真算例验证了配额制对于提高调度模型中风电消纳能力的有效性。上述文献分别从 RPS 的发展政策、市场机制、电力市场辅助服务、经济调度等方面进行了详细的研究,但未针对IES进行进一步的研究。

综上,目前国内外学者较少研究 RPS 对 IES 可 再生能源消纳能力的影响。因此,本文提出了一种 RPS下多园区 IES 优化调度模型,综合考虑了冷热电 联供(CCHP)、绿色证书交易机制和热网的约束。针 对多园区 IES 的典型工况进行仿真分析,结果表明 所提模型可引导 IES 优先使用绿色环保的可再生能 源,有效提高可再生能源的消纳量,同时减少碳排放 量,验证了本文所提模型的合理性和有效性。

# 1 基于能源集线器的多园区 IES 建模

能源集线器(EH)可同时为多种能源的输入、输 出提供接口,以满足不同能源需求<sup>[12]</sup>。基于EH,可 以便捷分析IES结构以及各设备之间的能量流动情 况。本文构建的基于EH的多园区IES架构如图1所 示,其由3个CCHP型微网构成,包含电、热、冷3种负 荷。能量的输入包括天然气、PV、风机(WT)和电网 供电;能量的转化包括微型燃气轮机(MT)、燃气锅 炉(GB)、电制冷机(EC)、吸收式制冷机(AC)、余热 回收装置(HE)等设备;能量的储存有蓄电池(ES)。 该架构可清晰展示 EH 的能量转化和流动情况以及 各设备之间的连接组成方式。



图 1 基于 EH 的 IES 架构 Fig.1 IES architecture based on EH

# 2 RPS及绿色证书交易机制

RPS是指某个国家或地区以强制性法律规定可 再生能源发电市场的市场份额<sup>[13-14]</sup>。研究表明通过 法律可有效保障可再生能源市场的发展,提高我国 可再生能源的消纳能力,大幅缓解能源紧张匮乏问 题。绿色证书(green certificates)是指对发电商颁发 的一种凭证,以证明发电商所发电能来自于可再生 能源,并代表一定数量的绿色电量,可用于市场交 易<sup>[15]</sup>。由于绿色证书时效性较强,其价格受到短期 的供求关系制约。

与 RPS 配套的绿色证书交易机制,其目标是建 立一个统一的绿色证书交易市场<sup>[10]</sup>。绿色证书数量 的计算公式<sup>[10]</sup>可表示为:

$$G = P_s \Delta t / 1\,000 \tag{1}$$

其中,G为参与交易的绿色证书的数量(单位为本/(MW·h)); $P_s$ 为第s个可再生能源发电设备的实际出力(单位为kW); $\Delta t$ 为调度时段时长(单位为h)。

绿色证书交易制度是一种基于RPS的政策工 具,它是对除水电外其他可再生能源电量生产和消 费的有效凭证<sup>[13]</sup>。图2为RPS下的市场交易框架。 其展示了各主体间的关系:发电企业每生产一定数 量的可再生电能,就可以获得相应数量的绿色证书, 可再生能源同时参与绿色证书市场和电力批发市 场;园区IES中的常规能源发电商直接向电力市场 供电,售电商根据监管机构规定从绿色证书交易市 场上买入绿色证书,并向用户供电;监管机构承担核 发绿色证书、监管市场、制定配额和监督电价等职 责。配额指标一般指可再生能源发电量占总电量的 比例,并将其折算为一定数量的绿色证书。监管机 构依据实际情况给电力生产商和电力用户分配一定 的指标。若电力生产商生产或用户消纳的可再生能 源超过分配指标,可将剩余的绿色证书在市场上出 售而获利;若电力生产商或用户未完成配额指标,可

在市场中购买相应数量的绿色证书,从而达到配额 指标。由于我国绿色证书交易目前还处于自愿申购 阶段,交易量较小,因此绿色证书单价参考价值较 小,本文设定绿色证书单价为100元/本。





## 3 热网模型

热网作为热能传输和交换的网络系统,反映节 点中温度和热媒之间的变化,根据工质不同可分为 热水网络和蒸汽网络<sup>[16-18]</sup>。目前国内供热系统传输 媒介主要是热水,根据热水温度差异可分为低温热 水供热系统和高温热水供热系统<sup>[18]</sup>。

## 3.1 区域节点热能平衡方程

根据热力学第一定律,热网中每个节点的流入 能量必须等于流出能量,其中热媒的传输和热交换 模式如图3所示。



图 3 热网模型 Fig.3 Model of thermal network

#### 3.2 网络热损方程

根据热稳态传热基本原理,热能损耗为[17]:

$$\Delta Q \approx 2\pi \frac{T_{\rm H} - T_e}{\sum R} l \tag{2}$$

其中, $\Delta Q$ 为热网管道中的热损失; $T_{\rm H}$ 为供水温度; $T_{\rm e}$ 为热网管道周围介质的平均温度; $\sum R$ 为热媒与周围环境间每千米管道的平均热阻;l为管道长度。

管道热损平衡约束为<sup>[18]</sup>:

$$Q_{uv,t} = -\left(Q_{uv,t-t_{\text{delay}}} - \Delta Q_{uv,t_{\text{delay}}}\right) \tag{3}$$

$$Q_{uvt}^{\min} \leq Q_{uvt} \leq Q_{uvt}^{\max} \tag{4}$$

其中, $Q_{uv,t}$ 、 $Q_{uv,t-t_{delay}}$ 和 $\Delta Q_{uv,t_{delay}}$ 分别为t时刻管道uv的 交互热功率、 $t-t_{delay}$ 时刻流入管道的热功率和热网 传输过程中在传输延时时间 $t_{delay}$ 内的热损失; $Q_{uv,t}^{min}$ 和 *Q*<sup>max</sup><sub>*uw*,t</sub>分别为*t*时刻热网管道*uv*传输的最小可利用热功率和最大可利用热功率。

#### 3.3 碳排放量计算公式

多园区IES实际碳排放量计算公式为:

$$N_{\rm CO_2} = \sum_{c=1}^{D} \sum_{t=1}^{m} \lambda_c P_{c,t}^{\rm CO_2} \Delta t$$
 (5)

其中, $N_{co_2}$ 为实际碳排放量;B为碳排放设备数量;M为调度周期时段数; $\lambda_c$ 为第c台碳排放设备(即 MT、 GB和AC等碳排放设备)的碳排放系数; $P_{c,t}^{co_2}$ 为t时 刻第c台碳排放设备的输出功率。

# 4 多园区 IES 运行优化模型

本文假设区域间电、冷能无直接交互,并将多个 区域作为整体进行如下综合优化建模。

#### 4.1 目标函数

含有 RPS 和热网的多园区 IES 运行优化目标函数由购电费用  $F_{e,b}$ 、燃气费用  $F_{g}$ 、热网运行费用  $F_{H}$ 、运行维护成本  $F_{om}$  和绿色证书交易收益  $F_{gre}$  五部分<sup>[3,17]</sup>构成,即:

$$\min_{f} f = F_{e,b} + F_{g} + F_{H} + F_{om} - F_{gre}$$
(6)

(1)购电费用。

$$F_{\rm e, b} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} C_{\rm e, b, t} P_{\rm grid, b, i, t} \Delta t$$
(7)

其中,N为CCHP系统数量; $C_{e,b,t}$ 为t时刻购电电价;  $P_{grid,b,i,t}$ 为t时刻第i个CCHP系统从电网购电功率。

(2)燃气费用。

$$F_{\rm g} = C_{\rm g} \sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} \left( \frac{P_{\rm MT, i, t}}{\eta_{\rm MT, i}} + \frac{Q_{\rm GB, i, t}}{\eta_{\rm GB, i}} \right) \Delta t \tag{8}$$

其中, $C_g$ 为购买天然气的单位热值价格; $P_{MT,i,t}$ 和  $Q_{GB,i,t}$ 分别为t时刻第i个 CCHP系统中MT 的发电功 率和GB的产热功率; $\eta_{MT,i}$ 和 $\eta_{GB,i}$ 分别为第i个 CCHP 系统中MT 和GB 的效率。

(3)热网运行费用。

$$F_{\rm H} = \sum_{z=1}^{R} \sum_{t=1}^{M} \eta_{\rm ehr, z} C_{\rm e, b, t} Q_{z, t} \Delta t \tag{9}$$

其中,R为循环水泵数量; $\eta_{ehr,z}$ 为第z台水泵的耗电输热比; $Q_{z,t}$ 为t时刻第z台水泵输送的热量。

(4)运行维护成本。

$$F_{\rm om} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} K_i P_{i,t} \Delta t$$
 (10)

其中, $K_i$ 为第i台设备的维护费用系数; $P_{i,i}$ 为t时刻 第i台设备的出力。

(5)绿色证书交易收益。

$$F_{\rm gre} = \sum_{r=1}^{D} \sum_{t=1}^{m} C_{\rm gre} \Big( G_{r,t}^{\rm s} - G_{r,t}^{\rm b} \Big)$$
(11)

其中,D为发电企业数量; $C_{gre}$ 为绿色证书交易价格;  $G_{r,t}^{s}$ 为t时刻第r个发电企业售出的绿色证书数量;  $G_{r,t}^{b}$ 为t时刻第r个发电企业购买的绿色证书数量。

#### 4.2 约束条件

系统约束主要包括冷热电功率平衡约束<sup>[19]</sup>、微 网内各设备的运行约束<sup>[19]</sup>以及绿色证书交易机制的 运行约束<sup>[20]</sup>。

(1)冷功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} (\eta_{\text{EC},i} P_{\text{EC},i,t} + \eta_{\text{AC},i} H_{\text{AC},i,t}) = \sum_{t=1}^{M} L_{\text{CA},t} \quad (12)$$

其中, $P_{\text{EC},i,t}$ 为t时刻第i个 CCHP 系统中 EC 输入的电 功率; $\eta_{\text{EC},i}$ 为第i个 CCHP 系统中 EC 的制冷系数;  $H_{\text{AC},i,t}$ 为t时刻第i个 CCHP 系统中 AC 输入的热功 率; $\eta_{\text{AC},i}$ 为第i个 CCHP 系统中 AC 的制冷系数; $L_{\text{CA},t}$ 为t时刻用户冷负荷。

(2)热功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} (\eta_{\text{HE},i} H_{\text{HE},i,t} - H_{\text{EX},i,t} - H_{\text{AC},i,t}) = \sum_{t=1}^{M} L_{\text{HA},t} \quad (13)$$

其中, $\eta_{\text{HE},i}$ 为第i个CCHP系统中HE的效率; $H_{\text{HE},i,t}$ 为 t时刻第i个CCHP系统中HE回收的热功率; $H_{\text{EX},i,t}$ 为t时刻第i个CCHP系统与热网的耦合热损耗; $L_{\text{HA},t}$ 为t时刻用户热负荷。

(3)电功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} (P_{\text{grid}, \text{s}, i, t} - P_{\text{grid}, \text{b}, i, t} + P_{\text{PV}, i, t} + P_{\text{WT}, i, t} + P_{\text{MT}, i, t} - P_{\text{EC}, i, t} - P_{\text{ES}, \text{C}, i, t} + P_{\text{ES}, \text{D}, i, t}) = \sum_{t=1}^{M} L_{\text{EA}, t}$$
(14)

其中, $P_{grid,s,i,t}$ 为t时刻第i个CCHP系统向电网售出的电功率; $P_{WT,i,t}$ 为t时刻第i个CCHP系统中WT输出的电功率; $P_{PV,i,t}$ 为t时刻第i个CCHP系统中PV输出的电功率; $P_{PV,i,t}$ 为t时刻第i个CCHP系统中PV输出的电功率; $P_{ES,C,i,t}$ 个BN为t时刻第i个CCHP系统中ES充、放电功率; $L_{EA,t}$ 为t时刻用户电负荷。

(4)风电和PV出力约束。

$$P_{\mathrm{WT},j,t} = P_{\mathrm{WT},j,t}^{\mathrm{tru}} \tag{15}$$

$$0 \leq P_{\mathrm{WT},j,t} \leq P_{\mathrm{WT},j,t}^{\mathrm{norm}} \tag{16}$$

其中, *P*<sup>Int</sup><sub>WT,j,t</sub>和*P*<sup>NOTT</sup><sub>WT,j,t</sub>分别为*t*时刻第*j*台WT的实际 消纳值和实际出力。

$$P_{\mathrm{PV},k,t} = P_{\mathrm{PV},k,t}^{\mathrm{tru}} \tag{17}$$

$$\leq P_{\text{PV}\ k\ t} \leq P_{\text{PV}\ k\ t} \tag{18}$$

其中, $P_{PV,k,t}^{Im}$ 和 $P_{PV,k,t}^{norm}$ 分别为t时刻第k台 PV 的实际消纳值和实际出力。

(5)其他设备电、热功率约束。

$$\begin{pmatrix} P_{p,\min} \leq P_{p,l} \leq P_{p,\max} \\ H_{p,\min} \leq H_{p,l} \leq H_{p,\max} \end{cases}$$
(19)

其中, $P_{p,t}$ 为t时刻第p台设备输出的电功率; $H_{p,t}$ 为t时刻第p台设备输出的热功率; $P_{p,\min}$ 和 $P_{p,\max}$ 分别为第p台设备输出的电功率下限和上限; $H_{p,\min}$ 和 $H_{p,\max}$ 分别为第p台设备输出的热功率下限和上限。

(6)绿色证书配额约束。

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} \left( \tau \alpha_{i,t} P_{i,t} + e_{i,t}^{b} G_{i,t}^{b} - e_{i,t}^{s} G_{i,t}^{s} \right) = \tau \sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} \eta_{i,t} P_{i,t} \quad (20)$$
$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{M} \left( e_{i,t}^{b} + e_{i,t}^{s} \right) \leq 1 \quad (21)$$

其中, $\tau$ 为生产单位绿色电能所获得的绿色证书数 量,取 $\tau=1$ 本/(MW·h); $\alpha_{i,i}$ 为t时刻第i个 CCHP系 统消纳可再生电能的比例; $\eta_{i,i}$ 为t时刻第i个 CCHP系 统可再生能源配额系数,取 $\eta_{i,i}=0.2$ ; $P_{i,i}$ 为t时刻 第i个 CCHP系统输出的电功率; $G_{i,i}^{b}$ , $G_{i,i}^{b}$ 分别为t时刻 第i个 CCHP系统购买、售出的绿色证书数量; $e_{i,i}^{b}$ , 句别为t时刻第i个 CCHP系统购买和出售证书时 的状态变量。当 $e_{i,i}^{s}=0$ 且 $e_{i,i}^{b}=1$ 时,表示t时刻购买 绿色证书;当 $e_{i,i}^{s}=0$ 且 $e_{i,i}^{b}=0$ 时,表示t时刻没有绿色证书 交易。

绿色证书的出售量应不大于绿色证书的持有 量,即:

0

$$\leq G_{r,t}^{s} \leq G_{r,t}^{\max} \tag{22}$$

其中, G<sub>r</sub>, 为t时刻第r个发电企业所持有的绿色证书最大数量。

绿色证书交易市场中绿色证书的总出售量应等 于总购买量,即:

$$\sum_{r=1}^{D} \sum_{t=1}^{M} G_{r,t}^{s} = \sum_{r=1}^{D} \sum_{t=1}^{M} G_{r,t}^{b}$$
(23)

4.3 模型解决方案

综上所述,本文综合考虑了CCHP系统、热网和 绿色证书交易的特点,建立了考虑热网和绿色证书 交易的综合调度模型。本文所建立的模型是一个混 合整数线性规划(MILP)模型,可以很容易地用 CPLEX、GUROBI等在线求解器求解。

#### 5 算例分析

为了验证本文所提优化方法的正确性,利用某 园区IES的以下4个算例进行研究:算例Ⅰ是传统的 优化方法,其中忽略了热网和绿色证书交易;算例Ⅱ 仅考虑绿色证书交易;算例Ⅲ仅考虑热网;算例Ⅳ利 用了热网和绿色证书交易的特性。仿真平台采用 Windows系统Intel i5 CPU,优化模型使用CPLEX进 行求解。

#### 5.1 系统结构和参数

某园区 IES 的结构如附录中图 A1 所示。该园 区由生活区、办公区和工业区 3 个子区域组成,每个 子区域均有 CCHP 系统,并通过区域热网连接构成 多园区 IES,热网模型如图 3 所示。以冬季某典型日 的冷热电负荷需求以及可再生能源实际出力为例 进行优化分析。仿真中,生活区和办公区采用固定 电价,生活区电价为0.49元/(kW·h),办公区电价 为0.9元/(kW·h);工业区采用分时电价,如附录中 图 A2 所示;假定天然气价格为0.283元/(kW·h)。 CCHP系统中设备的容量如附录中表A1所示。各设备的其余参数和热网管道参数分别如附录中表A2和表A3所示。

# 5.2 CCHP工况分析

5.2.1 多园区IES电功率优化结果分析

图 4 为 3 个子区域在考虑热网和绿色证书机 制下的电功率优化结果。由图 4 可知,生活区 MT从 白天到夜晚几乎全天工作,但是出力很少,在夜晚优 先消纳风电,在白天优先消纳 PV 出力,缺额部分 主要由电网购电补充,以达到纯电负荷平衡,其余 不足部分由 MT 出力和 ES 补充;办公区夜晚以消 纳风电出力供电为主,白天供电模式以 PV 供电为 主,缺额部分主要由 MT 和电网购电补充;工业区在 00:00 — 04:00、17:00 — 23:00 时段由 WT 供电,在白 天(09:00 — 16:00 时段)主要消纳 PV 出力满足供需 平衡,在 05:00 — 08:00 时段绝大部分由电网供电,多 余的电能除储存在 ES 中外,其余部分由 EC 进行电-冷转换,满足冷负荷需求。





## 5.2.2 多园区IES热功率优化结果分析

多园区 IES 在考虑热网和绿色证书机制下的热 功率优化结果如附录中图 A3 所示。热功率来源包 括余热锅炉、GB 和热网交互功率,当热网交互功率 为正时,表示IES从热网吸收热量;当热网交互功率 为负时,表示IES的多余热功率注入热网。由图A3 可知,生活区的热量需求由余热锅炉和GB供应;办 公区的负荷热电比较低,可将多余的热能通过热网 输送给工业区;工业区的负荷热电比相对较高,从热 网吸收了较多热量。从整体而言,办公区将多余热 能通过区域热网输送至工业区,实现了各个园区热 能的协调分配,有效提高了能源利用效率。

5.2.3 多园区IES冷功率优化结果分析

多园区 IES 冷功率优化结果如附录中图 A4 所示,冷功率来源包括 EC 和 AC。由图 A4 可知,生活 区的冷负荷需求全部由 EC 供应;办公区和工业区的 冷负荷需求也基本由 EC 供应,当在用电高峰期时, 少量冷功率由 AC 提供。

#### 5.3 IES优化调度分析

表1为不同算例下的详细成本。

表1 不同算例下的详细成本

Table 1 Detailed costs in different cases

算例	有无	有无绿色	运行成本 /	绿色证书交易	总费用 /
	热网	业书	兀	収益 / 兀	兀
Ι	无	无	85 339	0	85 3 39
$\Pi$	无	有	85415	11201	74214
Ш	有	无	83615	0	83615
IV	有	有	84443	11201	73 242

在冬季典型日条件下,当不含热网时各园区IES 单独优化运行,算例 I 和算例 II 的日总费用分别为 85339、74214元;当含热网时,算例 III 和算例Ⅳ的日 总费用分别为83615、73242元。由此可知,与算例 I 相比,算例 III 的总费用减少了2%;与算例 II 相 比,算例Ⅳ的总费用减少了1.3%。由附录中图 A3 可知,与不考虑热网的传统模式相比,采用热网的多 园区 IES 利用各园区负荷特性差异,可实现各子区 域之间热能的协调分配,有效提高热能的利用效率, 从而降低系统运行成本。可见通过热网连接各园区 IES,可实现各园区能量协调分配,并且仍可保证系 统优化运行的经济效益。

当不含绿色证书交易时,算例 I 和算例Ⅲ的日总 费用分别为85339、83615元;当含绿色证书交易时, 算例 II 和算例Ⅳ的日总费用分别为74214、73242 元。与算例 I 相比,算例 II 的总费用减少了13%;与 算例Ⅲ相比,算例Ⅳ的总费用减少了12.4%。与不 考虑绿色证书交易机制相比,考虑绿色证书交易的 IES由于具有较高的绿色证书收益会优先考虑可再 生能源的消纳,从而减少燃机出力和外购电量,有效 降低了系统运行成本。可见利用绿色证书交易机 制,可显著提高IES优化运行的经济效益。

为了进一步验证所提优化方法的性能,下面以 3个园区总的可再生能源消纳量(PV+风电出力)为 例,分析4种典型场景下可再生能源的消纳情况,场 景设置如下:场景1,不考虑热网约束和绿色证书交易机制的IES优化模型;场景2,仅考虑热网约束的 IES优化模型;场景3,仅考虑绿色证书交易机制的 IES优化模型;场景4,考虑绿色证书交易机制和热 网约束的IES优化模型。

在4种场景下的可再生能源消纳情况如图5 所示。



园区 IES 可再生能源总出力为112009.8 kW,场 景1中弃风弃光总量为14897.3 kW,弃风弃光率为 13.3%,场景2中弃风弃光总量为5376.5 kW,弃风 弃光率为4.8%,场景3和场景4中弃风弃光总量为 0。相比于场景1,场景2-4的可再生能源消纳率 分别提高了8.5%、13.3%和13.3%。场景2有效提 高了可再生能源的消纳量,而场景3和场景4实现了 对可再生能源的消纳量,而场景3和场景4实现了 对可再生能源的100%消纳,可见由于具有较高的 绿色证书交易收益,绿色证书交易机制在实施过程 中必然激励园区 IES 消纳可再生能源的积极性,进 一步提高可再生能源的消纳率,验证了该模型对消 纳大规模可再生能源的有效性。

# 5.4 不同算例下的运行成本与碳排放量的对比分析

不同算例下的碳排放设备出力及相应成本见表 2。由表1和表2可知,多园区IES中的运行成本主 要与燃气费用和购电费用有关,其中燃气费用所占 比例最大,而燃气费用主要由MT、GB等碳排放设备 产生。因此本文基于碳排放设备的出力进一步分析 对碳排放量的影响。

表2 不同算例下的碳排放设备出力及相应成本

Table 2 Output power and costs of carbon emission equipment under different case studies

算例	碳排放设备 出力 / kW	碳排放量 / kg	燃气费用 / 元	购电费用/ 元
Ι	126605.1	118769	56703.5	16552.7
П	124920.1	113 538	55 501.6	16715.5
Ш	122730.0	107 086	55 579.1	16757.0
IV	121 344.2	101 149	55 280.1	16649.6

算例 I 中碳排放设备出力为 126 605.1 kW,算例 IV 中碳排放设备出力为 121 344.2 kW,同比下降了 4.2%;算例 IV 中碳排放量与算例 I 相比,同比下降了 14.8%。随着碳排放设备出力的减少,碳排放

12

量呈阶梯形下降。当分别考虑绿色证书和热网时, 由于一方面绿色证书机制会激励园区 IES 优先消纳 可再生能源,另一方面热网可实现热能协调分配,提 高能源利用效率,因此均会造成碳排放设备出力减 少,从而导致碳排放量减少。随着 MT 等碳交易设 备出力的减少,外购电费略有提升,但算例 IV 中的系 统总费用与算例 I 相比,同比下降了 14.2%,仍可保 证 IES 的经济性。

#### 5.5 绿色证书价格对可再生能源消纳率的影响分析

由于绿色证书交易市场根据当地实际情况制定 相应的绿色证书交易价格,并且交易价格的高低影 响着调度结果,改变绿色证书价格得到的可再生能 源消纳量的变化情况如图6所示。由图6可知,随着 绿色证书单价的增加,可再生能源消纳量呈现先保 持不变,随后增加直至完全稳定的趋势,可见在绿色 证书价格较低时,可再生能源的运行维护成本较高, 导致其并网经济性较低,因此可再生能源并网消纳 量不变;在绿色证书价格较高时,可再生能源的经济 性明显增强,因此可再生能源消纳量呈现快速增长 的趋势,直至可再生能源实现完全消纳,再次呈现消 纳量不变的趋势。





由图6可知,本文模型在考虑绿色证书交易机 制和热网约束后,通过绿色证书交易机制的激励和 各园区热网流量的协调分配,可有效减少化石能源 的消耗量,提高可再生能源的消纳量,这对于推动节 能减排和新能源发电的发展有重要意义。

# 6 结论

本文建立了一种考虑绿色证书交易制度和热网 的综合优化调度模型,该模型考虑了热网特性和绿 色证书交易机制的特性。通过理论分析与算例研究 可以得出以下结论:

(1)考虑绿色证书交易机制和热网的多园区 IES 优化模型通过绿色证书交易机制的激励和各园区热 网流量的综合协调分配,实现了不同园区之间负荷 互补和能量交换,有效减少了化石能源的消耗量,降 低了系统综合成本和碳排放量,从而获得了更高的 经济效益;

(2)本文对所提模型在引入热网和绿色证书交

易机制前后的可再生能源消纳情况进行具体对比分析,得出本文模型可引导 IES 优先使用绿色环保的可再生能源,有效提高可再生能源的消纳量的结论,这对于推动节能减排和新能源发电的发展有重要意义。

然而本文仅考虑了一种交易机制,未同时考虑 碳交易和绿色证书交易机制对IES的影响,2种交易 机制对IES运行的交互影响将作为下一步研究的 重点。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

1-7

- [1]魏一鸣,刘兰翠,范英,等.中国能源报告(2008):碳排放研究[R].北京:科学出版社,2008.
- [2] 康重庆,陈启鑫,夏清.低碳电力技术的研究展望[J].电网技术,2009,33(2):1-7.
   KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2):
- [3]张晓辉,闫鹏达,钟嘉庆,等.可再生能源激励制度下的低碳经济电源规划[J].电网技术,2015,39(3):655-662.
   ZHANG Xiaohui,YAN Pengda,ZHONG Jiaqing, et al. Research on generation expansion planning in low-carbon economy environment under incentive mechanism of renewable energy sources[J]. Power System Technology,2015,39(3):655-662.
- [4] 魏震波,黄宇涵,高红均,等.含电转气和热电解耦热电联产机 组的区域能源互联网联合经济调度[J].电网技术,2018,42 (11):3512-3520.

WEI Zhenbo, HUANG Yuhan, GAO Hongjun, et al. Joint economic scheduling of power-to-gas and thermoelectric decoupling CHP in regional energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3512-3520.

 [5]甘霖,陈瑜玮,刘育权,等.含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J].电力自动化设备,2017,37(6): 275-281.

GAN Lin, CHEN Yuwei, LIU Yuquan, et al. Coordinative optimization of multiple energy flows for microgrid with renewable energy resources and case study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):275-281.

- [6] 李正茂,张峰,梁军,等.含电热联合系统的微电网运行优化
  [J].中国电机工程学报,2015,35(14):3569-3576.
  LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system [J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3569-3576.
- [7]朱嘉远,刘洋,许立雄,等.考虑风电消纳的热电联供型微网日前鲁棒经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(4):40-51.
   ZHU Jiayuan,LIU Yang,XU Lixiong, et al. Robust day-ahead economic dispatch of microgrid with combined heat and power system considering wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(4):40-51.
- [8] 康重庆,杜尔顺,张宁,等.可再生能源参与电力市场:综述与 展望[J].南方电网技术,2016,10(3):16-23.
   KANG Chongqing, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Renewable energy trading in electricity market: review and prospect[J]. Southern Power System Technology,2016,10(3):16-23.
- [9] 钟宇峰,黄民翔,文福拴,等. 计及绿色证书交易机制的大用 户直购电市场均衡分析[J]. 电力自动化设备 2014,34(2): 144-150.

ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, WEN Fushuan, et al. Equlibrium analysis of direct electricity purchase with green certificate mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 144-150.

[10] 刘秋华,袁浩,杨争林,等.可再生能源配额制下绿色证书补偿 辅助服务方案探讨[J].电力系统自动化,2020,44(6):40-47.
LIU Qiuhua,YUAN Hao,YANG Zhenglin, et al. Discussion on compensation ancillary service scheme of green certificates based on renewable portfolio standard[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(6):40-47.

14

- [11] 梁吉,左艺,张玉琢,等. 基于可再生能源配额制的风电并网节 能经济调度[J]. 电网技术,2019,43(7):2528-2534.
  LIANG Ji,ZUO Yi,ZHANG Yuzhuo, et al. Energy-saving and economic dispatch of power system containing wind power integration under renewable portfolio standard[J]. Power System Technology,2019,43(7):2528-2534.
- [12] 郝然,艾芊,朱字超,等. 基于能源集线器的区域综合能源系统 分层优化调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):171-178.
  HAO Ran,AI Qian,ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6): 171-178.
- [13] 蒋轶澄,曹红霞,杨莉,等.可再生能源配额制的机制设计与影响分析[J].电力系统自动化,2019,44(7):187-199.
   JIANG Yicheng,CAO Hongxia,YANG Li,et al. Mechanism design and impact analysis of renewable portfolio standard [J].
   Automation of Electric Power Systems,2019,44(7):187-199.
- [14] 赵岩,王涛.可再生能源电力绿色证书交易机制政策及影响浅 析[J].风能,2016(8):44-45.
- [15] 朱发根.绿色电力证书:国际经验、国内前景和发电对策[J]. 中国电力企业管理,2018(16):66-71.
- [16] 王珺,顾伟,陆帅,等.结合热网模型的多区域综合能源系统协 同规划[J].电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
  WANG Jun,GU Wei,LU Shuai,et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15):17-24.
- [17] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运

行优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1315.

GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5):1305-1315.

[18] 李晓露,单福州,宋燕敏,等.考虑热网约束和碳交易的多区域 综合能源系统优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(19): 52-59.

LI Xiaolu, SHAN Fuzhou, SONG Yanmin, et al. Optimal dispatch of multi-region integrated energy systems considering heating network constraints and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19):52-59.

- [19] 王成山,洪博文,郭力,等. 冷热电联供微网优化调度通用建模 方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):26-33.
  WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(31):26-33.
- [20] 赵文会,高娇倩,于金龙,等. 计及碳交易和绿色证书交易机制的发电权交易模型[J]. 可再生能源,2016,34(8):1129-1136.
   ZHAO Wenhui, GAO Jiaoqian, YU Jinlong, et al. Generation rights trade model with carbon trading and green certificate trading mechanisms[J]. Renewable Energy Resources,2016,34 (8):1129-1136.

#### 作者简介:



骆 钊(1986—),男,云南镇雄人,副 教授,博士,通信作者,主要研究方向为区块 链、电力市场、能源互联网、人工智能在电 力系统中的应用(E-mail:waiting.1986@live. com):

卢 涛(1995—),男,江苏南京人,硕 士研究生,主要研究方向为综合能源系统优 化(**E-mail**:1766601631@qq.com);

刘兴琳(1995—),女,云南楚雄人,硕

士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化(E-mail: muyan2024@sina.com)。

(编辑 李玮)

# Optimal scheduling of multi-park integrated energy system under renewable portfolio standard

LUO Zhao<sup>1</sup>, LU Tao<sup>1</sup>, MA Rui<sup>2</sup>, LIU Xinglin<sup>1</sup>, ZHU Dongge<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: In order to improve the renewable energy consumption capacity of integrated energy system and satisfy the requirements of energy conservation and carbon emission reduction in the power industry, an optimal scheduling model of multi-park integrated energy system based on renewable portfolio standard is proposed. The model of multi-park integrated energy system considering thermal network is established. The renewable portfolio standard is introduced into the model, and a scheduling model of integrated energy system that comprehensively considers both the green certificate trading mechanism and the thermal network is proposed. The system economy and renewable energy consumption situation are analyzed in different cases. The results show that the introduction of renewable portfolio standard and thermal network can effectively improve the renewable energy consumption capacity of system, reduce system carbon emission, and ensure system economy.

Key words:multi-park integrated energy system;renewable portfolio standard;thermal network;optimal scheduling;carbon emission



图 A1 CCHP 系统和热网的结构 Fig.A1 Structure of CCHP system and thermal network



图 A2 工业区分时电价 Fig.A2 Time-of-use electricity price for industrial park

Table A1 Equipment capacity in each park					
いなわれ	符号	设备容量/(kW・h)			
反奋石协		生活区	办公区	工业区	
光伏	PV	500	1700	4500	
风机	WT	1300	3100	4800	
蓄电池	ES	300	500	1500	
微型燃气轮机	MT	1200	2500	15000	
燃气锅炉	GB	1000	1500	4000	
电制冷机	EC	200	500	1000	
吸收式制冷机	AC	300	500	1000	
余热锅炉	REC	1000	1500	3000	
余热回收装置	HE	10000	20000	30000	

表 A1 各园区中设备容量 A1 Fourigment capacity in each p

Table 712 Equipment	parameters n	reem	system
参数	生活区	办公区	工业区
效率 $\eta_{\rm MT}$	0.3	0.3	0.3
热电比 a <sub>MT</sub>	2.3	2.3	2.3
效率 $\eta_{\text{REC}}$	0.73	0.73	0.73
效率 $\eta_{GB}$	0.9	0.9	0.9
效率 $\eta_{\rm EC}$	4	4	4
效率 $\eta_{AC}$	1.2	1.2	1.2
效率 η <sub>HE</sub>	0.9	0.9	0.9
充电上限/kW	60	100	200
放电上限/kW	120	200	400
充电效率 η <sub>ES,C</sub>	0.9	0.9	0.9
放电效率 η <sub>ES,D</sub>	0.9	0.9	0.9
最大充电率 YES,C	0.2	0.2	0.2
最大放电率 y <sub>ES,D</sub>	0.4	0.4	0.4
自放电率 $\sigma_{\rm ES}$	0.04	0.04	0.04
初始储能量/(kW•h)	150	250	500
最大储能量 W <sub>ES,max</sub> /(kW・	h) 270	450	900
最小储能量 W <sub>ES,min</sub> /(kW•	h) 60	100	200

Table A2 Equipment parameters in CCHP system

表 A3 热网管道参数				
Table A3 Thermal network piping parameters				
管段	<i>l/</i> km	直径/m	热阻/(km·℃・kW <sup>-1</sup> )	耗电输热比
1-2	1.2	0.7	20	0.0062
2-3	1	0.7	20	0.0059

20

0.0057

3-1

0.8

0.7



(a) 生活区







(c) 工业区







18:00

24:00

0:00

6:00



图 A4 多园区 IES 冷功率优化结果 Fig.A4 Optimization results of cold power for multi-park IES