

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210303

# 含多区域综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度策略

李咸善, 马凯琳, 程杉

(梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 区域综合能源系统(Regional Integrated Energy System, RIES)通常经电气接口与主动配电网(Active Distribution Network, ADN)相连, 参与 ADN 需求响应调度。为了提高 RIES 与 ADN 的交互效益, 提出了含多 RIES 的 ADN 双层博弈优化调度策略。在 RIES 内部, 以 RIES 效益最大为目标, 建立满足电-气-热负荷需求、响应 ADN 需求调度的 RIES 异质能优化协调调度策略。在此基础上, 建立 ADN 与多 RIES 联盟的双层博弈调度模型。上层为 ADN 与 RIES 联盟的非合作博弈, ADN 通过制定分时购售电价引导 RIES 联盟制定购售电策略。下层为 RIES 联盟成员合作博弈, 达到联盟出力在成员之间的最优分配, 并基于 Shapley 值对联盟成员分摊合作利益。采用粒子群算法求解博弈模型的纳什均衡点, 得到最优电价策略及各 RIES 的最优购售电策略。算例结果表明, 所提策略能够提高 ADN 削峰填谷能力, 保障 RIES 的经济性及 ADN 的可靠运行。

**关键词:** 区域综合能源系统; 主动配电网; 双层博弈; 优化调度

## Dispatching strategy of an active distribution network with multiple regional integrated energy systems based on two-level game optimization

LI Xianshan, MA Kailin, CHENG Shan

(Hubei Provincial Key Laboratory of Operation and Control of Cascade Hydropower Stations,  
China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** A regional integrated energy system (RIES) is usually connected with an active distribution network (ADN) through an electrical interface, and participates in the ADN demand response dispatch. To improve the interaction efficiency of RIES and ADN, a two-level game optimal scheduling strategy for ADN with multiple RIES is proposed. In RIES, a heterogeneous energy optimization and coordination scheduling strategy is established to meet the demands of electricity-gas-heat load of the RIES, and to respond to ADN electricity demand scheduling with the goal of maximizing RIES benefit. A two-layer game scheduling model of ADN and RIES-coalition is established. The upper layer is the non-cooperative game between ADN and RIES-coalition, and the ADN guides RIES-coalition to formulate power purchase and sale strategies responding to the ADN demand scheduling through a time-of-use purchase and sale price policy. The lower layer is RIES-coalition members' cooperative game to achieve the optimal distribution of coalition trading power among members, and cooperation benefits are shared among coalition members based on the Shapley value. The particle swarm optimization algorithm is used to solve the Nash equilibrium point of the game model, and the optimal electricity price strategy and the optimal electricity purchase and sale strategy of each RIES are obtained. The results of a numerical example show that the proposed strategy can improve the peak shifting and valley filling capacity of ADN, ensure the economy of RIES and the reliable operation of the ADN.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607105) and the Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2016CFA097).

**Key words:** regional integrated energy system; active distribution network; two-level game; optimal scheduling

## 0 引言

随着化石能源供给匮乏的形势日益严峻, 能源

互联及能源高效利用成为当前研究的热点问题<sup>[1]</sup>。区域综合能源系统(Regional Integrated Energy System, RIES)将异质能源协调管理, 实现电、气、热系统的耦合<sup>[2-4]</sup>, 对异质能源的生产、传输、消费环节进行统筹优化, 极大地减少了资源的浪费<sup>[5-6]</sup>, 并在满足自身异质能负荷需求的同时参与主动配电网

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607105); 湖北省自然科学基金项目资助(2016CFA097)

网(Active Distribution Network, ADN)的电力需求调度,提升系统的整体效益。

当多个 RIES 通过电气接口接入 ADN 时, RIES 对于 ADN 是电力产消者,具有电功率双向调节效应,是 ADN 的电力需求调度响应资源<sup>[7-8]</sup>;对 RIES 本身来说,它包含电-气-热等相互耦合的异质能系统, RIES 的电力需求侧响应须通过其内部的多异质能资源协调调度来实现。

多 RIES 具有不同的产消能力,多 RIES 联合运行,有利于 RIES 互联互通,提高 RIES 资源利用效率。多 RIES 具有共同的新能源消纳及高效运行目标,组成 RIES 联盟参与 ADN 电力需求调度,有利于发挥多 RIES 资源互补效应,提高 RIES 需求侧响应能力,促进 RIES 联盟和 ADN 调度效益的提升。

RIES 及其联盟的电力需求侧响应,将改变 RIES 内部及 RIES 之间的“电-气-热”能量调度机制及其成本分摊机制,进而影响到“RIES-RIES 联盟-ADN”等多层次系统的能量调度协调机制。与普通电力产消者相比, RIES 电力产消者的需求侧响应资源不仅是电力产消资源,还包括气、热产消资源<sup>[9-10]</sup>,因此需要建立满足 RIES 内部电-气-热负荷需求,以 RIES 经济效益最大,响应 ADN 需求调度的 RIES 异质能优化协调调度策略。

当多 RIES 联盟参与 ADN 调度时,由于两者属于不同的利益主体,有着各自的运行目标,基于博弈理论,两者之间可实施非合作博弈调度。ADN 实施分时电价激励政策,以削峰填谷和运行效益最大为目标;多 RIES 联盟响应电价政策,以联盟效益最大为目标。求解博弈模型获得 ADN 的电价优化策略及各主体的能量优化调度策略。在 RIES 联盟内部,可基于 Shapley 值分配合作效益<sup>[11]</sup>。

目前,对于区域综合能源系统的研究已取得丰富的成果,文献[12]针对配网级 RIES,考虑了光伏及负荷的不确定性,实现多能互补及环境效益;文献[13]运用最优负荷削减量分层解耦计算方法,得到 RIES 各种故障状态下的最优负荷削减量;文献[14]基于一种新型综合能源系统,以清洁的方式产生氢气,并对太阳能-水-氢-动力循环进行热力学分析和评估;文献[15]建立了工业园区多参与主体合作博弈模型,根据各参与主体独立及合作运营模式的特点提出了基于 Shapley 值的利益分配方法;文献[16]建立了基于多主多从 Stackelberg 博弈的能源交易模型,分析了 IES 中多个分布式能源站和用户之间的多能交互方式。以上文献对于 RIES 的研究具有一定的指导意义,但多为单个 RIES 的优化,未涉及多个 RIES 的协调优化问题。

针对多区域综合能源系统的研究,目前对 RIES 参与 ADN 削峰填谷调度的研究还尚欠缺。文献[17]针对各子区域内冷热电负荷的峰谷交错现象,通过协调各冷热电联供系统的热出力满足该区域的热负荷需求;文献[18]将若干相对独立的小型冷热电联供系统集成一个多区域分布式冷热电联供系统,提出了异质能源与电力系统协同的通用集成方案;文献[19]建立了计及碳交易成本的多 RIES 分散调度模型,分析了碳交易成本对系统运行的影响;文献[20]基于冷热电联供系统和热网构建了多 RIES 的规划方法,大幅提高了燃气轮机利用率,以及减少了热能传输损耗。

基于上述研究背景,本文提出了含多 RIES 的主动配电网双层博弈优化调度策略,解决以电力需求响应为目标的 RIES 内部多异质能源的协调调度问题,和以 ADN 削峰填谷调度为目标的“RIES-RIES 联盟-ADN”等多层次系统的能量调度协调机制问题,以促进含 RIES 的 ADN 高效运行。主要创新及解决的关键问题包括:

1) 建立了 RIES 异质能协调优化调度策略,解决以响应 ADN 电力需求调度为目标而引发的 RIES 内部耦合异质能的协调优化调度问题。

2) 建立了 RIES 联盟的等效功率模型。组建多 RIES 联盟,利用各 RIES 能量产消差异,实现多 RIES 的功率互济平衡;分析了 RIES 联盟的等效电力需求侧响应功率将受到 RIES 响应能力及联盟互补特性的影响。

3) 建立了 RIES 联盟与 ADN 的双层博弈优化调度模型,实现系统效益的整体提升。根据“RIES-RIES 联盟-ADN”的层次目标特性,建立了 ADN 与 RIES 联盟的主从博弈优化调度模型,和 RIES 联盟成员之间的合作博弈模型,实现含 RIES 的主动配电网的优化调度。

4) 通过典型算例验证了方案的有效性。

## 1 含 RIES 的主动配电网基本框架

本文各区域综合能源系统通过电气接口连接于 ADN,以电功率的形式与 ADN 产生交互,从而形成了含有多个综合能源系统的 ADN。各 RIES 根据 ADN 制定的购售电价决定与 ADN 的购售电交易,同时各 RIES 可向天然气商购买天然气供给能源,热负荷可由内部产热机组自给自足。多个 RIES 之间可通过配网母线进行电能交互,形成 RIES 联盟,旨在通过 RIES 及多 RIES 联盟内部电-气-热异质能系统的产消协调优化,响应 ADN 的电力需求调度,促进 RIES 及 ADN 的高效运行。

如图 1 所示, ADN 含自有负荷、自有新能源机组、自有可控机组和 RIES 及 RIES 联盟, 并接入上一级高压大电网系统。RIES 内部包含电/气/热柔性负荷、新能源发电机组、“电-气-热”耦合设备及电/气/热储能装置。

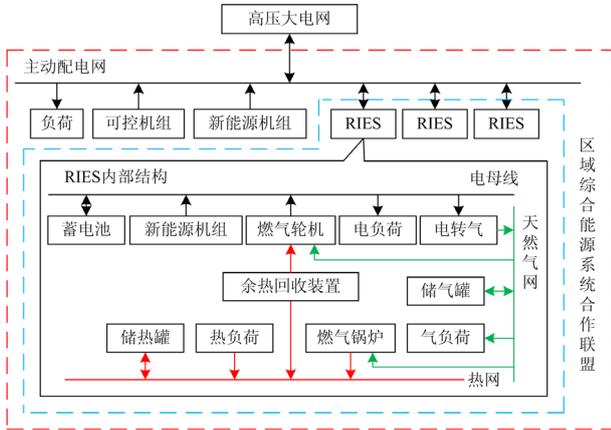


图 1 含多区域综合能源系统的主动配电网基本框架  
Fig. 1 Framework of ADN with multi-RIES

## 2 主动配电网与区域综合能源系统博弈调度策略

RIES 参与 ADN 电力需求侧响应, 将改变 RIES 内部综合能源系统的“电-气-热”能量调度机制及其成本分摊机制, 进而影响到“RIES-RIES 联盟-ADN”等多层次系统的能量调度协调机制。由于 ADN 和 RIES 属于不同的利益主体, 基于博弈理论, 建立 ADN 与 RIES 联盟的主从博弈调度框架, 并提出含 RIES 联盟的 ADN 调度策略、RIES 联盟互济策略以及响应 ADN 功率调度的 RIES 调度策略, 实现含多 RIES 系统的主动配电网削峰填谷优化调度。

### 2.1 含 RIES 联盟的 ADN 双层博弈调度框架

在 ADN 运行过程中, ADN 根据其预测的次日净负荷(负荷与新能源之差)峰谷时段制定分时电价引导 RIES 响应 ADN 削峰填谷电力需求调度, RIES 在满足自身负荷需求的同时与 ADN 调度协调交互, 从而获得最大收益。多 RIES 组成 RIES 联盟, 新能源过剩(新能源出力大于内部负荷)的 RIES 将新能源平抑负荷后的余量传递给负荷过剩(新能源出力小于内部负荷)的 RIES, 实现能量的互济。RIES 联盟一方面利用各 RIES 能量的产消差异, 实现 RIES 之间的互联互通, 增加了 RIES 的经济效益, 另一方面以 RIES 联盟的形式参与 ADN 的电力需求调度, 可提升 RIES 的需求响应能力, 减少了配网侧可控机组的发电压力以及 ADN 与上一级大电网的

交互压力, 更好地优化 ADN 的运行。

ADN 和 RIES 联盟分属不同的利益主体, 具有各自的运营目标, 在联合调度时, 基于博弈理论, 宜采用 ADN 与 RIES 联盟之间的主从博弈调度; 而 RIES 联盟各成员具有相同的运营目标, 可采用 RIES 联盟成员之间的合作博弈调度。从而构成了“RIES-RIES 联盟-ADN”之间的双层博弈调度框架, 如图 2 所示。

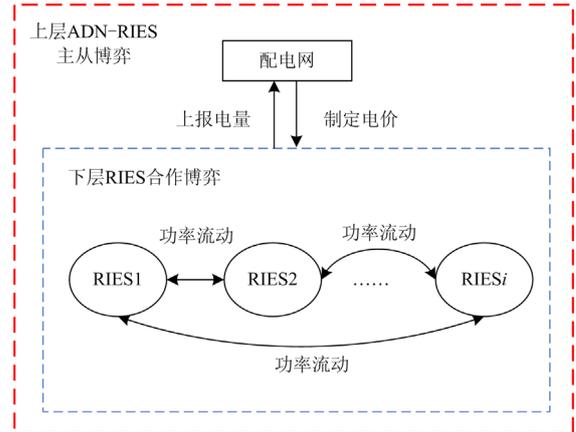


图 2 含 RIES 联盟的主动配电网双层博弈框架  
Fig. 2 Two-layer game dispatching framework of ADN with RIES union

双层博弈流程如下:

- 1) ADN 作为领导者, 根据净负荷曲线的峰谷时段制定初始的购售电价。
- 2) 根据 ADN 制定的电价, 多 RIES 之间通过功率互济的方式进行合作联盟, 以联盟整体的形式响应电价策略, 制定相应的联盟购售电量(功率)策略, 并将策略上报给 ADN。
- 3) ADN 根据 RIES 联盟上报的购售电量策略更新电价, 引导 RIES 联盟对购售电量策略进行动态调整, 保证 ADN 内部功率的平衡以及自身经济效益最优。
- 4) RIES 联盟再次根据更新的电价调整电量策略, ADN 同样根据更新的联盟策略不断对电价进行动态修正, 直至 RIES 联盟电量策略和 ADN 电价策略稳定不变, 达到博弈的 Nash 均衡解。
- 5) RIES 联盟成员之间根据自身的贡献程度进行合作博弈剩余利润的分配, 确保能源利用率的提高以及联盟功率在 RIES 各机组之间的优化分配。

### 2.2 含 RIES 的主动配电网调度策略

建立含多 RIES 的主动配电网削峰填谷功率调度策略、RIES 联盟功率互济及其等效功率模型和响应主动配电网需求调度的 RIES 调度策略。

### 1) 主动配电网调度策略

为减小负荷峰谷差和促进新能源消纳, ADN 实现自身负荷供电平衡调度策略如下。

第一步: 优先消纳自有新能源供电。

ADN 优先消纳其自有新能源之后, 剩下的负荷定义为净负荷, 如式(1)所示。

$$\Delta P_{\text{ADN-L}}(t) = P_{\text{ADN-load}}(t) - P_{\text{ADN-new}}(t) \quad (1)$$

式中:  $\Delta P_{\text{ADN-L}}(t)$ 、 $P_{\text{ADN-load}}(t)$ 和  $P_{\text{ADN-new}}(t)$ 分别为 ADN 的净负荷、自有负荷和新能源出力。

第二步: 基于分时电价的净负荷削峰填谷调度

ADN 为了减小净负荷峰谷差, 并避免多 RIES 与 ADN 的无序交互带来的新的峰谷差, 实施基于分时电价的削峰填谷调度。ADN 根据净负荷曲线制定分时电价引导 RIES 联盟调整用能策略  $P_{\text{RIES}\Sigma}(t)$ , 实现 RIES 与 ADN 的有序交互, 达到 ADN 削峰填谷的目的。

第三步: 剩下的净负荷不平衡功率由 ADN 自有发电机组出力  $P_{\text{ADN-DG}}(t)$ 和向大电网购电量  $P_{\text{UG}}(t)$ 平衡, 如式(2)所示。

$$\Delta P_{\text{ADN-L}}(t) - P_{\text{RIES}\Sigma}(t) - P_{\text{ADN-DG}}(t) - P_{\text{UG}}(t) = 0 \quad (2)$$

### 2) RIES 联盟功率互济及其等效功率模型

单个 RIES 等效发电出力  $P_{\text{RIES}_i}(t)$ 如式(3)所示。

$$P_{\text{RIES}_i}(t) = P_i(t) - P_{\text{LD}_i}(t) - \sum_{j=1}^i \Delta P_{ij}(t) \quad (3)$$

式中:  $P_i(t)$ 、 $P_{\text{LD}_i}(t)$ 为 RIES<sub>i</sub> 的发电出力和负荷;  $\Delta P_{ij}(t)$ 为考虑多个 RIES 新能源产消能力的互补性, 可实现多 RIES 之间的功率互济, 有利于新能源的就地消纳, 即新能源过剩的 RIES 将余量传递给新能源不足的 RIES。

RIES 联盟等效功率是各 RIES 的等效功率之和, 如式(4)所示,  $I$  为 RIES 的数量。

$$P_{\text{RIES}\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^I P_{\text{RIES}_i}(t) = \sum_{i=1}^I [P_i(t) - P_{\text{LD}_i}(t) - \sum_{j=1}^i \Delta P_{ij}(t)] \quad (4)$$

可见, RIES 联盟的等效电力需求侧响应功率  $P_{\text{RIES}\Sigma}(t)$ 受到 RIES 响应能力  $P_{\text{RIES}_i}(t)$ 及联盟互补特性的影响。 $P_{\text{RIES}_i}(t)$ 的大小又将受到 ADN 分时电价和 RIES 内部异质能耦合系统功率调度的影响。

### 3) 响应 ADN 需求调度的 RIES 调度策略

RIES<sub>i</sub> 内部发电部分由新能源出力  $P_{\text{new}_i}(t)$ 、燃气轮机发电出力  $P_{\text{GT}_i}(t)$ 和蓄电池充放电  $P_{\text{ES}_i}(t)$ 组成, 如式(5)所示。

$$P_i(t) = P_{\text{new}_i}(t) + P_{\text{GT}_i}(t) + P_{\text{ES}_i}(t) \quad (5)$$

结合式(3)和式(5), RIES 优先消纳其自有新能源  $P_{\text{new}_i}(t)$ , 剩余不足或过剩的电量与其他 RIES 进行功率交互, 而  $P_{\text{GT}_i}(t)$ 、 $P_{\text{ES}_i}(t)$ 、 $P_{\text{LD}_i}(t)$ 等将受到 RIES

对 ADN 电力需求调度的分时电价激励政策的需求响应调度策略的影响, 根据设备成本以经济性为目标制定出力计划, 满足自身负荷需求的同时响应配电网的激励政策。RIES<sub>i</sub> 内部热力系统及天然气系统则通过内部耦合的方式配合电力系统完成发电部分的出力。

## 3 RIES 联盟与配电网双层博弈调度模型

### 3.1 RIES 各元件出力模型

#### 1) 燃气轮机

$$\begin{cases} P_{\text{GT}_i}(t) = \eta_{\text{GT}_i}^e G_{\text{GT}_i}(t) \cdot LHV \\ H_{\text{GT}_i}(t) = \eta_{\text{GT}_i}^h G_{\text{GT}_i}(t) \cdot LHV \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{GT}_i}(t)$ 、 $H_{\text{GT}_i}(t)$ 分别为  $t$  时段 RIES<sub>i</sub> 燃气轮机的发电功率和热功率;  $\eta_{\text{GT}_i}^e$ 、 $\eta_{\text{GT}_i}^h$ 、 $G_{\text{GT}_i}(t)$ 分别为 RIES<sub>i</sub> 燃气轮机的发电效率、制热效率和天然气耗量;  $LHV$  为天然气的低热值, 本文取  $9.7 \text{ kWh}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ 。

#### 2) 燃气锅炉

燃气锅炉通过燃烧天然气产生热量, 由于燃气锅炉具有供热效率高、污染物排放少的特点, 是目前热力系统中最常用的供热设备。

$$H_{\text{GB}_i}(t) = \eta_{\text{GB}_i} G_{\text{GB}_i}(t) \cdot LHV \quad (7)$$

式中:  $H_{\text{GB}_i}(t)$ 、 $G_{\text{GB}_i}(t)$ 分别为  $t$  时段 RIES<sub>i</sub> 燃气锅炉的热功率和天然气耗量;  $\eta_{\text{GB}_i}$  为 RIES<sub>i</sub> 燃气锅炉的制热效率。

#### 3) 余热锅炉

$$H_{\text{WHB}_i}(t) = \eta_{\text{WHB}_i} H_{\text{GT}_i}(t) \quad (8)$$

式中:  $H_{\text{WHB}_i}(t)$ 为  $t$  时段 RIES<sub>i</sub> 余热锅炉的供热功率;  $\eta_{\text{WHB}_i}$ 表示 RIES<sub>i</sub> 余热锅炉的供热效率, 本文取 0.9。

#### 4) 储能装置模型

$$E_{\delta,i}(t) = E_{\delta,i}(t-1)(1 - \sigma_{\delta,i}) + \eta_{\delta\text{cha},i} P_{\delta\text{cha},i}(t) - \frac{P_{\delta\text{dis},i}(t)}{\eta_{\delta\text{dis},i}} \quad (9)$$

式中:  $\delta \in \{\text{ES}, \text{HS}, \text{GS}\}$ , 即分别表示电、气、热储能装置;  $E_{\delta,i}(t)$ 表示  $t$  时段 RIES<sub>i</sub> 的储能装置储存量;  $\sigma_{\delta,i}$ 为储能的能量损耗率;  $\eta_{\delta\text{cha},i}$ 、 $\eta_{\delta\text{dis},i}$  分别为储能的充、放能效率;  $P_{\delta\text{cha},i}(t)$ 、 $P_{\delta\text{dis},i}(t)$  分别表示  $t$  时段 RIES<sub>i</sub> 储能的充、放能功率。

#### 5) 电转气装置

P2G 的原理是通过电解水产生氢气, 由于氢气难以直接利用以及大规模运输和储存, 与氢气相比, 甲烷的物理特性使其更易储存和运输, 因此由生成的氢气与二氧化碳反应产生甲烷<sup>[21]</sup>。这种化学方式合成的甲烷可以直接通过天然气管道给气负荷供

气,也可以用于燃气轮机、燃气锅炉发电或者储存在储气罐中。

当系统中存在风电富余的情况时,电转气技术可以将风电转化成天然气进行储存,能有效减少弃风率,提高了风电消纳的水平,并且增强了电气耦合特性。P2G 能量转化的关系式如式(10)所示。

$$G_{P2G,i}(t) = \eta_{P2G,i} P_{P2G,i}(t) / HHV \quad (10)$$

式中:  $G_{P2G,i}(t)$ 、 $P_{P2G,i}(t)$  分别表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 中 P2G 产生的天然气量和消耗的电能;  $\eta_{P2G,i}$  表示 RIES<sub>*i*</sub> 中 P2G 的能量转换效率,取 65%<sup>[22]</sup>;  $HHV$  表示甲烷高热值,取 15.5 kWh/m<sup>3</sup>。

### 3.2 上层 ADN-RIES 联盟主从博弈模型

基于博弈理论<sup>[23]</sup>,建立 ADN 与 RIES 联盟的主从博弈模型,如式(11)所示。

$$\begin{cases} \gamma_1^* = \max_{\gamma_1 \in R_1, \gamma_2 \in R(\gamma_1)} F_{ADN}(\gamma_1, \gamma_2) \\ (\gamma_1^*, \gamma_2^*) = \max_{\gamma_2 \in R(\gamma_1^*)} F_{RIES}(\gamma_1^*, \gamma_2^*) \end{cases} \quad (11)$$

式中: 决策变量  $\gamma_1$  表示博弈主体 ADN 的电价策略; 决策变量  $\gamma_2$  表示博弈从体 RIES 联盟的购售电策略;  $F_{ADN}$ 、 $F_{RIES}$  分别表示 ADN 和 RIES 联盟的收益;  $R_1$  表示购售电价的上下限;  $(\gamma_1^*, \gamma_2^*)$  表示非合作博弈的 Nash 均衡点。

#### 3.2.1 博弈主体 ADN 优化模型

##### 1) 博弈主体 ADN 目标函数

在上层主从博弈模型中,ADN 主体效用函数  $C_{ADN}$  以 ADN 购电成本最小为目标,包括发电机组运行成本、向 RIES 购电成本以及向大电网购电成本(新能源发电成本为 0),目标函数如式(12)所示。

$$\min C_{ADN} = \sum_{t=1}^T (C_{DG}(t) + C_{RIES}(t) + C_{UG}(t)) \quad (12)$$

式中:  $T$  为调度周期(一天 24 h);  $C_{DG}$  为 ADN 的发电机组成本;  $C_{RIES}$  为向 RIES 购电的成本;  $C_{UG}$  为向大电网购电的成本。

##### (1) 发电机组成本

$$C_{DG}(t) = \sum_{m=1}^M (a_m (P_{DG,m}(t))^2 + b_m P_{DG,m}(t) + c_m) \quad (13)$$

式中:  $M$  表示发电机组个数;  $P_{DG,m}(t)$  表示  $t$  时段发电机组  $m$  的发电功率;  $a_m$ 、 $b_m$ 、 $c_m$  表示发电机组  $m$  的发电系数。

##### (2) 向 RIES 联盟购电成本

$$C_{RIES}(t) = \lambda_{ele}^b(t) P_{RIES\Sigma}^b(t) - \lambda_{ele}^s(t) P_{RIES\Sigma}^s(t) \quad (14)$$

式中:  $\lambda_{ele}^b(t)$ 、 $\lambda_{ele}^s(t)$  分别表示  $t$  时段 ADN 制定的购电、售电电价;  $P_{RIES\Sigma}^b(t)$ 、 $P_{RIES\Sigma}^s(t)$  分别表示  $t$  时段向 RIES 联盟购电量及售电量; 上标 b、s 表示买和卖。

##### (3) 向大电网购电成本

由于配网侧电源渗透率较低,负荷相对较大,一般不考虑配网向大电网售电情况,本文仅考虑配网向大电网购电,且大电网售电电价为固定电价,如式(15)所示。

$$C_{UG}(t) = \lambda_{UG}^s(t) P_{UG}^b(t) \quad (15)$$

式中:  $\lambda_{UG}^s(t)$  表示  $t$  时段大电网售电电价;  $P_{UG}^b(t)$  表示  $t$  时段向大电网购电量。

#### 2) 博弈主体优化模型的约束条件

##### (1) 分时电价约束

峰时电价和谷时电价之比为 3:1 左右,且考虑到 ADN 的安全性、可靠性,应保证其售电总收益一定<sup>[24]</sup>,如式(16)所示。

$$F_{ope} = \sum_{t=1}^T (\lambda_{ele}^s(t) P_{load}(t) - C_{RIES}(t)) \quad (16)$$

式中,  $F_{ope}$  表示 ADN 售电收益,为定值。

##### (2) 功率平衡约束

$$P_{load}(t) + P_{RIES}^s(t) = P_{DG}(t) + P_{RIES}^b(t) + P_{UG}^b(t) \quad (17)$$

$$P_{RIES}^b(t) = \sum_{i=1}^I P_{RIESi}^b(t) \quad (18)$$

$$P_{RIES}^s(t) = \sum_{i=1}^I P_{RIESi}^s(t) \quad (19)$$

$$P_{RIESi}^s(t) \cdot P_{RIESi}^b(t) = 0 \quad (20)$$

式(20)表示不能同时向 RIES 进行购售电,其中:

$P_{RIESi}^b(t)$ 、 $P_{RIESi}^s(t)$  分别为 ADN 向 RIES<sub>*i*</sub> 购售电量。

##### (3) 网络潮流约束

$$\begin{cases} P_{G,i}(t) - P_{L,i}(t) = \\ U_i(t) \sum_{j \in i} U_j(t) (G_{ij} \cos \theta_{ij}(t) + B_{ij} \sin \theta_{ij}(t)) \\ Q_{G,i}(t) - Q_{L,i}(t) = \\ U_i(t) \sum_{j \in i} U_j(t) (G_{ij} \sin \theta_{ij}(t) - B_{ij} \cos \theta_{ij}(t)) \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (21)$$

式(21)为配网  $t$  时段的潮流方程,其中:  $n$  为节点数;  $P_{G,i}(t)$ 、 $Q_{G,i}(t)$  分别为节点  $i$  发电机组的有功、无功功率;  $P_{L,i}(t)$ 、 $Q_{L,i}(t)$  分别为节点  $i$  所带负荷的有功、无功功率;  $U_i(t)$ 、 $U_j(t)$  分别表示节点  $i$ 、 $j$  的节点电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别表示支路  $ij$  的电导、电纳;  $\theta_{ij}(t)$  表示  $i$ 、 $j$  节点电压之间的相角差。

##### (4) 网络节点电压约束

$$U_{imin} \leq U_i(t) \leq U_{imax} \quad (22)$$

式中,  $U_{imax}$ 、 $U_{imin}$  分别表示节点  $i$  电压的上下限。

##### (5) 联络线交互功率约束

$$0 \leq (P_{RIES}^b(t), P_{RIES}^s(t)) \leq P_{RIES}^{max} \quad (23)$$

$$0 \leq P_{UG}^b(t) \leq P_{UG}^{\max} \quad (24)$$

式中:  $P_{RIES}^{\max}$  表示 RIES 与 ADN 间联络线功率的最大值;  $P_{UG}^{\max}$  表示 ADN 与大电网间联络线功率的最大值。

(6) 发电机组出力上下限约束

$$P_{DG,m}^{\min} \leq P_{DG,m}(t) \leq P_{DG,m}^{\max} \quad (25)$$

式中,  $P_{DG,m}^{\max}$ 、 $P_{DG,m}^{\min}$  分别表示发电机组  $m$  出力的上限和下限。

(7) 发电机组爬坡约束

$$-\gamma_{down,m} \leq P_{DG,m}(t) - P_{DG,m}(t-1) \leq \gamma_{up,m} \quad (26)$$

式中,  $r_{up,m}$ 、 $r_{down,m}$  分别表示发电机组  $m$  向上、向下爬坡率。

### 3.2.2 博弈从体 RIES 联盟优化模型

1) 博弈从体 RIES 联盟目标函数

RIES 的博弈策略为: 多 RIES 间以合作联盟的形式参与主从博弈, 根据 ADN 制定的购售电价调整购售电量策略, 目标函数为 RIES 联盟经济效益最大, 如式(27)所示。

$$\max F_{RIES} = \sum_{t=1}^T [C_{RIES}(t) - \sum_{i=1}^I (C_{E,i}(t) + C_{H,i}(t) + C_{G,i}(t))] \quad (27)$$

式中:  $C_{E,i}(t)$ 、 $C_{H,i}(t)$ 、 $C_{G,i}(t)$  分别为  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 电力系统、热力系统和天然气系统的成本; RIES<sub>*i*</sub> 的购售电收益  $C_{RIES}(t)$  计算方式如式(14)所示。

(1) RIES 电力部分总运行成本

电力部分总运行成本包括新能源机组运维成本、需求响应负荷成本、燃气轮机成本和蓄电池成本, 如式(28)所示。

$$C_{E,i}(t) = C_{N,i}(t) + C_{CL,i}(t) + C_{GT,i}(t) + C_{ES,i}(t) \quad (28)$$

① 新能源机组运维成本

$$C_{N,i}(t) = c_{new,i} P_{new,i}(t) \quad (29)$$

式中:  $c_{new,i}$  表示 RIES<sub>*i*</sub> 新能源机组单位运维成本系数;  $P_{new,i}(t)$  表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 新能源机组出力。

② 可控负荷成本

$$C_{CL,i}(t) = \varpi_{1,i} P_{IL,i}(t) + \varpi_{2,i} P_{EL,i}(t) \quad (30)$$

式中:  $\varpi_{1,i}$ 、 $\varpi_{2,i}$  分别表示 RIES<sub>*i*</sub> 可中断负荷和激励负荷的成本系数;  $P_{IL,i}(t)$ 、 $P_{EL,i}(t)$  分别表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 可中断负荷量和激励负荷量。

③ 燃气轮机发电运行成本

$$C_{GT,i}(t) = \lambda_{gas} \sum_{k=1}^K (a_{GT,i} (P_{GT,i}^k(t))^2 + b_{GT,i} P_{GT,i}^k(t) + c_{GT,i}) \quad (31)$$

式中:  $\lambda_{gas}$  表示天然气价格;  $K$  表示 RIES<sub>*i*</sub> 燃气轮机数量;  $a_{GT,i}$ 、 $b_{GT,i}$ 、 $c_{GT,i}$  表示燃气轮机发电系数。

④ 蓄电池运行成本

$$C_{ES,i}(t) = a_{es,i} |P_{ES,i}(t)| + b_{es,i} \quad (32)$$

式中:  $P_{ES,i}(t)$  为  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 蓄电池充放电功率,  $P_{ES,i}(t) > 0$  时表示蓄电池充电,  $P_{ES,i}(t) < 0$  时表示蓄电池放电;  $a_{es,i}$ 、 $b_{es,i}$  为成本系数。

(2) RIES 热力部分总运行成本

热力部分总运行成本包括燃气锅炉成本、蓄热槽成本、可控负荷成本, 如式(33)所示为热力系统  $t$  时段的总成本。

$$C_{H,i}(t) = \lambda_{gas} G_{GB,i}(t) + a_{hs,i} |H_{HS,i}(t)| + b_{hs,i} + \varpi_{3,i} H_{IL,i}(t) + \varpi_{4,i} H_{EL,i}(t) \quad (33)$$

式中:  $H_{HS,i}(t)$  表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 蓄热槽的储、放热功率,  $H_{HS,i}(t) > 0$  时表示蓄热槽储热,  $H_{HS,i}(t) < 0$  时表示蓄热槽放热;  $a_{hs,i}$ 、 $b_{hs,i}$  为 RIES<sub>*i*</sub> 蓄热槽的成本系数;  $H_{IL,i}(t)$ 、 $H_{EL,i}(t)$  分别表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 可中断、可激励热负荷量;  $\varpi_{3,i}$ 、 $\varpi_{4,i}$  分别表示 RIES<sub>*i*</sub> 可中断负荷和激励负荷的成本系数。

(3) RIES 天然气系统总运行成本

天然气系统总运行成本包括 P2G 成本、储气罐成本、可控负荷成本及向气网购气成本, 如式(34)和式(35)所示。

$$G_{G,i}(t) = C_{P2G,i}(t) + \lambda_{gas} G_{buy,i}(t) + \varpi_{5,i} G_{IL,i}(t) + \varpi_{6,i} G_{EL,i}(t) + a_{gs,i} |G_{GS,i}(t)| + b_{gs,i} \quad (34)$$

$$C_{P2G,i}(t) = \alpha C_M P_{P2G,i}(t) - \lambda_{gas} G_{P2G,i}(t) \quad (35)$$

式中:  $C_{P2G,i}(t)$  表示 P2G 消纳弃风的等效收益;  $\alpha$  表示单位天然气所需二氧化碳系数;  $C_M$  表示二氧化碳价格;  $G_{buy,i}(t)$  表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 向气网的购气量;  $\varpi_{5,i}$ 、 $\varpi_{6,i}$  分别表示 RIES<sub>*i*</sub> 可中断负荷和激励负荷的成本系数;  $G_{IL,i}(t)$ 、 $G_{EL,i}(t)$  分别表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 可中断、可激励气负荷量;  $G_{GS,i}(t)$  表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 储气罐的储、放气功率,  $G_{GS,i}(t) > 0$  时表示储气罐充气,  $G_{GS,i}(t) < 0$  时表示储气罐放气;  $a_{gs,i}$ 、 $b_{gs,i}$  表示储气罐的成本系数。

2) 博弈从体 RIES 联盟优化模型的约束条件

(1) 功率平衡约束

① 电功率平衡约束

$$P_{RIES,i}^b(t) + P_{EL,i}(t) + P_{LD,i}(t) + P_{ES,i}(t) + P_{P2G,i}(t) = P_{RIES,i}^s(t) + P_{IL,i}(t) P_{new,i}(t) + \sum_{k=1}^K P_{GT,i}^k(t) + \Delta P_{ij}(t) \quad (36)$$

② 热功率平衡约束

$$H_{load,i}(t) + H_{HS,i}(t) + H_{EL,i}(t) = H_{GB,i}(t) + \sum_{k=1}^K H_{GT,i}^k(t) + H_{IL,i}(t) \quad (37)$$

## ③ 天然气功率平衡约束

$$G_{\text{load},i}(t) + G_{\text{GB},i}(t) + \sum_{k=1}^K G_{\text{GT},i}^k(t) + G_{\text{GS},i}(t) + G_{\text{EL},i}(t) = G_{\text{IL},i}(t) + G_{\text{P2G},i}(t) + G_{\text{buy},i}(t) \quad (38)$$

## (2) 需求响应负荷约束

$$0 \leq P_{\text{IL},i}(t) \leq \rho_{1,i} P_{\text{LD},i}(t) \quad (39)$$

$$0 \leq P_{\text{EL},i}(t) \leq \rho_{2,i} P_{\text{LD},i}(t) \quad (40)$$

式中,  $\rho_{1,i}$ 、 $\rho_{2,i}$  分别表示 RIES<sub>*i*</sub> 可中断及激励负荷占总负荷量的比例, 本文取 10%。热负荷和气负荷的需求响应负荷约束同理, 此处不再赘述。

## (3) 各系统可控机组出力上下限约束

$$P_{n,i}^{\min} \leq P_{n,i}(t) \leq P_{n,i}^{\max} \quad (41)$$

式中:  $P_{n,i}(t)$  表示  $t$  时段 RIES<sub>*i*</sub> 各机组的出力;  $P_{n,i}^{\max}$ 、 $P_{n,i}^{\min}$  分别表示出力的上下限。

## (4) 各系统可控机组爬坡约束

$$-\gamma_{\text{down},i} \leq P_{n,i}(t) - P_{n,i}(t-1) \leq \gamma_{\text{up},i} \quad (42)$$

式中:  $r_{\text{up},i}$ 、 $r_{\text{down},i}$  分别表示 RIES<sub>*i*</sub> 机组向上爬坡率、向下爬坡率。

## (5) 储能装置约束

储能装置约束是为了保证储能装置的充放功率在充放功率上下限之内, 储存的能量在设备容量的上下限之内, 且保证每日始末的储能量相同。

$$-\omega_{\text{dis},i} C_i \leq P_{\delta,i}(t) \leq \omega_{\text{cha},i} C_i \quad (43)$$

$$SOC_{\min,i} C_i \leq E_{\delta,i}(t) \leq SOC_{\max,i} C_i \quad (44)$$

$$E_{\delta,i}(0) = E_{\delta,i}(T) \quad (45)$$

式中:  $\omega_{\text{dis},i}$ 、 $\omega_{\text{cha},i}$  分别表示 RIES<sub>*i*</sub> 储能装置的最大充放倍率;  $C_i$  为储能装置总容量;  $P_{\delta,i}(t)$  为储能装置充放功率,  $P_{\delta,i}(t) > 0$  时表示储能装置充电,  $P_{\delta,i}(t) < 0$  时表示储能装置放电;  $SOC$  为荷电状态。

## 3.3 下层 RIES 联盟成员合作博弈与收益分配

## 3.3.1 合作博弈模型

在上层主从博弈阶段, 多个 RIES 之间形成合作联盟, 共同响应 ADN 制定的电价, 实现效益的最大化。与独立运行不同, RIES 合作联盟具有集体理性和个体理性, 联盟下整体获得的收益大于各 RIES 独立运行收益之和, 并且联盟下各 RIES 获得的收益大于独立运行收益。合作联盟模式下, RIES 之间通过功率流动达到机组出力的合理利用, 从而获得剩余利润, 并按照各 RIES 的边际贡献分配剩余利润<sup>[25]</sup>。由此可得合作博弈模型如式(46)所示。

$$\mu(S) = \nu(S) - \sum_{a_i \in S} f_i \quad (46)$$

式中: 联盟  $S$  表示博弈者集合  $A$  的任意子集;  $\nu(S)$  表示联盟  $S$  的效用函数, 即形成联盟后获得的集体收益;  $f_i$  表示博弈者合作前的收益;  $\mu(S)$  表示联盟后的合作剩余。博弈者集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$ ,  $i$  表示博弈者数量,

## 3.3.2 Shapley 值收益分

将获得的合作剩余按各博弈者的边际贡献进行分配, 边际贡献及收益分配的计算式如式(47)和式(48)所示。

$$\phi_i(\mu) = \sum_{S \subseteq A} R(|S|) \cdot [\mu(S) - \mu(S - \{a_i\})] \quad (47)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

$$R(|S|) = \frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!} \quad (48)$$

式中:  $\phi_i(\mu)$  表示各博弈者分配到的收益;  $|S|$  表示联盟  $S$  的博弈者数量;  $R(|S|)$  表示联盟  $S$  出现的概率;  $\mu(S) - \mu(S - \{a_i\})$  表示博弈者  $a_i$  的边际贡献。

## 4 基于粒子群算法的博弈模型求解

本文采用粒子群算法对双层博弈模型进行求解, 上层 ADN 侧先制定一个初始电价作为初始均衡解, 下层 RIES 侧将初始均衡解作为已知条件代入内部调度模型进行合作博弈的求解, 直到满足 RIES 合作联盟整体效益最大, 此时各 RIES 根据 Shapley 值分配得到的效益最大, 即为达到合作博弈均衡, 将均衡解代入上层进行电价的更新, 上下层据此不断更新策略, 直至迭代到博弈收敛点稳定在极小的范围内, 即为 Nash 均衡解( $\gamma_1^*$ ,  $\gamma_2^*$ )。

具体的博弈流程如图 3 所示。

## 5 算例分析

## 5.1 算例参数

算例选取改进的 IEEE14 节点系统, 如附录 A 中图 A1 所示, RIES 内部配置如图 1 所示。以 3 个 RIES 为例, 各个 RIES 中各单元参数如附录 A 中表 A1 所示, 各个 RIES 中储能装置参数如附录 A 中表 A2 所示, ADN 电负荷预测曲线及新能源出力曲线如附录 A 中图 A2 所示, 各 RIES 日前电、气、热负荷预测曲线及新能源出力预测曲线如图 A3 所示。大电网售电电价为 0.65 元/kW, 各 RIES 与 ADN 的联络线功率上限为 2 MW。

## 5.2 结果分析

## 5.2.1 双层博弈仿真结果分析

根据上述博弈模型及相关参数, 仿真得到博弈均衡结果如下所示。

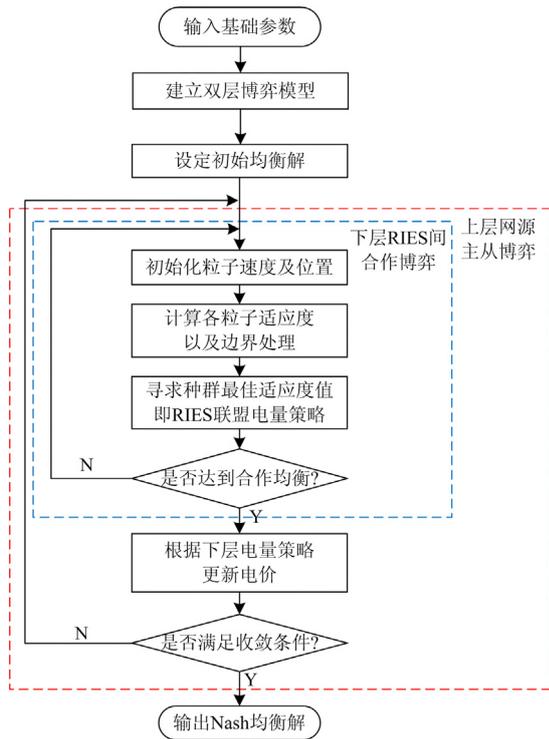


图 3 双层博弈模型求解流程图

Fig. 3 Flowchart of two-layer game planning model

1) 配电网电价优化结果

表 1 为达到均衡时配网制定的购售电价策略, 配网售电电价始终高于购电电价, 从而获得相应收益。在 00:00—08:00 以及 23:00—24:00, 配网风力发电较大, 相对于内部负荷而言有剩余, 此时配网处于净负荷谷时段, 制定谷时电价; 在 08:00—10:00、15:00—18:00 以及 20:00—23:00, 此时配网新能源出力与其负荷相差不大, 处于净负荷平时段, 制定平时电价; 10:00—15:00 以及 18:00—20:00, 配网的新能源出力小于负荷差额较大, 净负荷处于峰值, 制定峰时电价。

表 1 配网分时购售电价均衡解

Table 1 Equilibrium solution of ADN time-of-use price

	时段	售电电价/ (元/kWh)	购电电价/ (元/kWh)
峰时	10:00—15:00、 18:00—20:00	0.904 3	0.768 7
平时	08:00—10:00、15:00— 18:00、20:00—23:00	0.602 9	0.512 4
谷时	00:00—8:00、 23:00—24:00	0.301 4	0.256 2

达到博弈均衡后各 RIES 内部元件的出力情况以及与配网的购售电量策略如图 4—图 6 所示。

2) RIES1 响应主动配电网削峰填谷调度结果如图 4 所示。

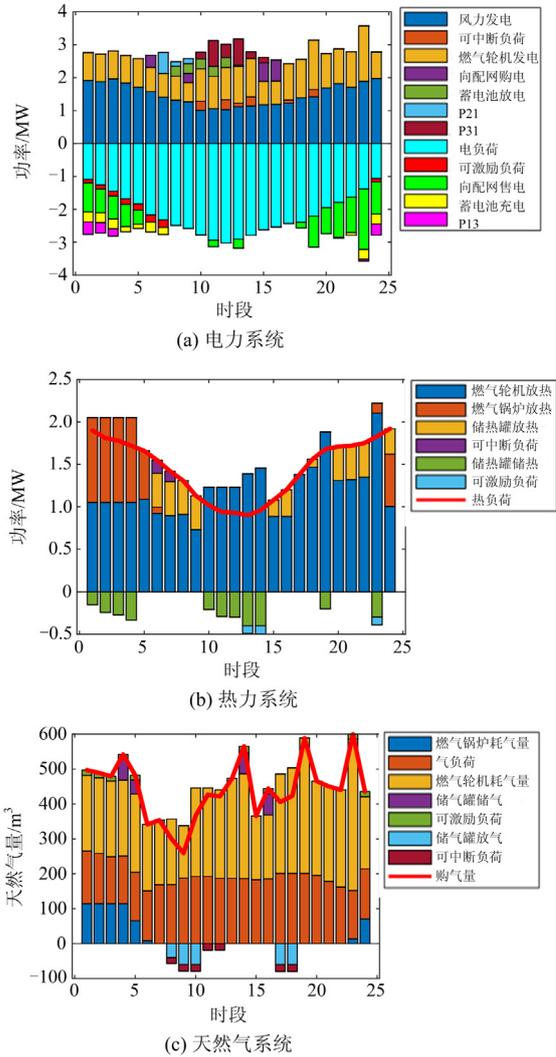


图 4 RIES1 各元件出力优化情况

Fig. 4 Output optimization of RIES1 components

配网谷电价时段: 00:00—08:00 和 23:00—24:00, RIES1 响应配网填谷调度, “电—气—热”配合多用电少发电。电系统: 如图 4(a)所示, 优先消纳新能源, 尽量多地支撑负荷, 包括激励负荷(如图 4(a)中的 01:00—7:00 和 24:00), 多余的电量向蓄电池充电(如图 4(a)中的 0:00—8:00 和 23:00—24:00), 还有多余的部分传递给 RIES3(RIES3 处于缺电状态, 如图 4(a)中的 1:00—3:00 和 23:00—24:00), 剩余电量向配网售电(如图 4(a)中的 1:00—5:00 和 23:00—24:00)。热系统: 如图 4(b)所示, 由于此时电价较低, 引导燃气轮机少发电, 因此通过激励负荷多用热以及储热罐储热来激励燃气轮机所带热负荷增加。气系统: 如图 4(c)所示, 通过激励气负荷

以及储气罐充气的行为减少燃气轮机的使用。

配网平电价时段：08：00—10：00、15：00—18：00 以及 20：00—23：00，RIES1 内部根据自身负荷情况进行响应。电系统：如图 4(a)所示，基于优先消纳新能源的原则，部分时段有少量的功率缺额(如图 4(a)中的 8：00—10：00 和 15：00—18：00)，燃气轮机出少量的力平衡，不足的电量由蓄电池放电平衡(如图 4(a)中的 08：00—10：00)，由于 RIES2 此时有新能源剩余，RIES1 接收 RIES2 传递的电量，剩余的负荷缺额向配网购电获得；部分时段有少量的发电余量(如图 4(a)中的 20：00—23：00)，此时将发电余量售给配网以获取收益。热系统：如图 4(b)所示，由于此时热负荷较高，燃气轮机产热不足，通过储热罐放热以及中断负荷达到负荷平衡。气系统：如图 4(c)所示，此时通过储气罐放气以及中断负荷来减少气负荷压力，以获得更高的效益。

配网峰电价时段：10：00—15：00 以及 18：00—20：00，RIES1 响应配网削峰调度，“电-气-热”配合多发电少用电。电系统：如图 4(a)所示，RIES1 此时内部负荷达到峰值，新能源尽可能出力以平衡中断部分负荷后的负荷量(如图 4(a)中的 10：00—14：00)，仍有较大缺额的部分由燃气轮机尽可能大的出力满足，不足的由蓄电池放电平衡(如图 4(a)中的 10：00—12：00)，由于此时 RIES3 光伏出力最大，有剩余的电量，还不足的电量由 RIES3 传递给 RIES1 补上缺额；18：00—20：00，燃气轮机出力较大，余电售给配网赚取利润。热系统：如图 4(b)所示，由于热负荷过小，燃气轮机提供的热功率超出负荷值，剩余的热功率由储热罐储热以及激励负荷来平衡。气系统：如图 4(c)所示，中断部分气负荷，满足燃气轮机的供气充足。

3) RIES2 响应主动配电网削峰填谷调度结果如图 5 所示。

配网谷电价时段：00：00—08：00 以及 23：00—24：00，RIES2 响应配网填谷调度，“电-气-热”配合多用电少发电。电系统：如图 5(a)所示，存在风电过剩的情况，RIES2 优先消纳风电，配网制定的

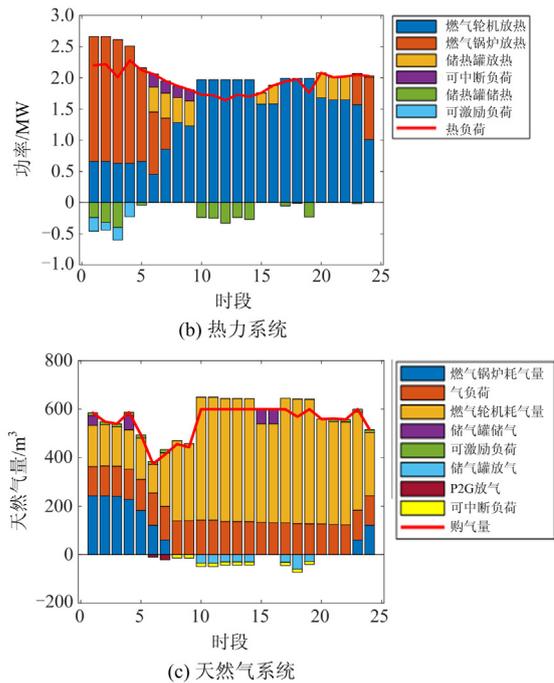
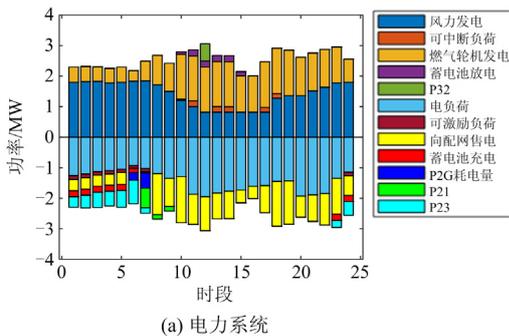


图 5 RIES2 各元件出力优化情况！！

Fig. 5 Output optimization of RIES2 components

谷时电价激励负荷多用电以消纳新能源(如图 5(a)中的 00：00—07：00 和 24：00)，此时燃气轮机以最小出力运行，剩余的电量由蓄电池通过充电消纳(如图 5(a)中的 00：00—06：00 和 23：00—24：00)，00：00—07：00 和 23：00—24：00，RIES3 光伏发电为 0，负荷压力较大，RIES2 将多余的电量传递给 RIES3，由于 P2G 成本较高，在风电过剩不大的情况下，RIES2 优先考虑将余电售给配网(如图 5(a)中的 00：00—05：00 和 23：00—24：00)，06：00—07：00 时段风力过剩较大，P2G 将电能转化成天然气供给气负荷，剩余电量向配网售电。热系统：如图 5(b)所示，燃气轮机供热较少，剩余热负荷由燃气锅炉提供，包括激励的热负荷(如图 5(b)中的 00：00—05：00 和 23：00—24：00)，多的热负荷储存在储热罐中(如图 5(b)中的 00：00—04：00)。气系统：如图 5(c)所示，为了减少燃气轮机的使用，激励气负荷用气(如图 5(c)中的 00：00—05：00 和 23：00—24：00)，P2G 提供部分气负荷(如图 5(c)中的 06：00—07：00)。

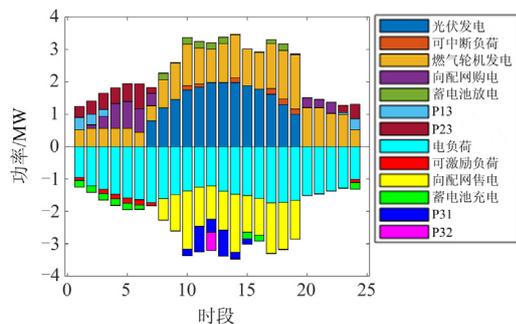
配网平电价时段：08：00—10：00、15：00—18：00 以及 20：00—23：00 时段，电系统：燃气轮机单位发电成本与平时电价相比较小，因此发电量增加，多余的电量传递给 RIES1(如图 5(a)中的 08：00—09：00)，剩余部分向配网售电(如图 5(a)中的 08：00—10：00、15：00—18：00 和 20：00—23：00)。热系统：少量热负荷中断及储热罐放热(如图 5(b)中的 06：00—

09:00、15:00—16:00 和 20:00—23:00), 保证燃气轮机的发电出力。气系统: RIES2 消纳新能源后的净负荷较大(如图 5(c)中的 08:00—10:00 和 17:00—18:00), 因此中断部分气负荷及储气罐放气以充分供给燃气轮机运行。

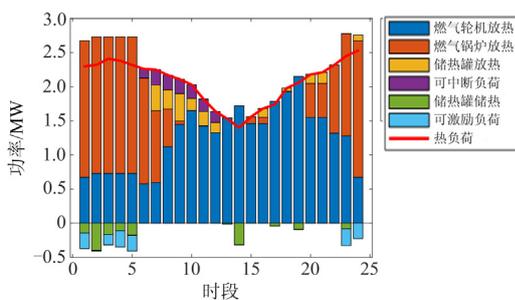
配网峰电价时段: 10:00—15:00 以及 18:00—20:00, RIES2 响应配网削峰调度, “电-气-热”配合多发少用电。电系统: 充分消纳风电后燃气轮机以最大出力运行保证内部的电负荷需求, 部分电负荷中断(如图 5(a)中的 10:00—14:00 和 18:00), 不足的负荷需求由蓄电池放电提供(如图 5(a)中的 10:00—15:00), RIES3 此时光伏出力较大, 向 RIES2 提供部分电能(如图 5(a)中的 11:00), 将平抑负荷后的余电以峰价卖给配网赚取利润。热系统: 如图 5(b)所示, 由于燃气轮机发电量较大, 产生的余热较多, 余热存入储热罐备用。气系统: 如图 5(c)所示, 燃气轮机较大的耗气量导致天然气管网压力较大, 此时通过储气罐放气以及中断气负荷减少负荷压力, 保证燃气轮机的正常运行。

4) RIES3 响应主动配电网削峰填谷调度结果如图 6 所示。

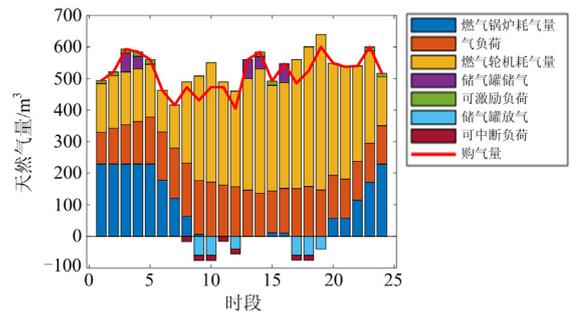
配网谷电价时段: 00:00—08:00 以及 23:00—24:00, RIES3 响应配网填谷调度, “电-气-热”配合多用电少发电。电系统: 如图 6(a)所示, 光伏发电较小甚至为 0, 配网制定的谷价引导燃气轮机以较小的出力运行, 激励负荷用电以及蓄电池充电(如图 6(a)中的 00:00—07:00 和 24:00), 不足的电量



(a) 电力系统



(b) 热力系统



(c) 天然气系统

图 6 RIES3 各元件出力优化情况!

Fig. 6 Output optimization of RIES3 components

由 RIES1(如图 6(a)中的 00:00—03:00 和 23:00—24:00)、RIES2(如图 6(a)中的 00:00—07:00 和 23:00—24:00)供给, 剩余不足的部分向配网购电以平衡(如图 6(a)中的 02:00—06:00)。热系统: 如图 6(b)所示, 为了激励燃气轮机所带热负荷增加, 通过激励负荷多用热以及储热罐储热来增加用热水平。气系统: 如图 6(c)所示, 通过激励负荷多用气以及储气罐储气来增加用气水平, 引导燃气轮机以较低水平运行。

配网平电价时段: 08:00—10:00、15:00—18:00 以及 20:00—23:00, 电系统: RIES3 的购售电以及蓄电池充放电情况根据自身净负荷情况进行适当的规划, 净负荷为正时蓄电池放电(如图 6(a)中的 08:00—10:00 和 17:00—18:00), 不足的向配网购电(如图 6(a)中的 20:00—23:00), 净负荷为负时蓄电池充电(如图 6(a)中的 15:00—16:00), 剩余电量向配网售电获得效益(如图 6(a)中的 08:00—10:00 和 15:00—18:00)。热系统: 如图 6(b)所示, 中断部分热负荷, 储热罐通过放热平衡负荷, 减少热水管道压力。气系统: 如图 6(c)所示, 08:00—10:00 和 15:00—18:00, 通过中断气负荷以及储气罐储气, 保证燃气轮机的较大出力, 从而多售电给配网, 20:00—23:00 电负荷需求较大, 通过激励气负荷用气减少燃气轮机的出力, 确保电功率缺额由向配网购电满足, 从而减小用电成本。

配网峰电价时段: 10:00—15:00 以及 18:00—20:00, RIES3 响应配网削峰调度, “电-气-热”配合多发少用电。电系统: 此时光伏出力最大, 优先消纳新能源满足电负荷需求, 为了增加售电量, 燃气轮机以最大出力运行, 中断部分负荷以减少负荷压力(如图 6(a)中的 10:00—14:00 和 18:00—20:00 时段), 蓄电池放电(如图 6(a)中的 10:00—15:00 和 18:00—20:00), 多余的电量一部分传递给 RIES1(如

图 6(a)中的 10:00—15:00)及 RIES2(如图 6(a)中的 11:00)。热系统:如图 6(b)所示,激励部分热负荷用热,储热罐储热激励燃气轮机多发电。气系统:如图 6(c)所示,中断部分气负荷和储气罐储气以保证燃气轮机的正常运行,从而获得 RIES3 的最优效益。

5) RIES 与配网的总交易电量如图 7 所示。

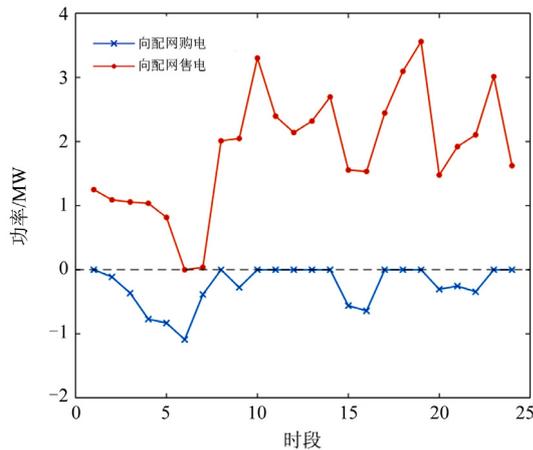


图 7 RIES 与配网总交易电量情况!

Fig. 7 Total sale and purchase in RIES to ADN

从图 7 可以看出:在部分时段,存在同一时段部分 RIES 售电和部分 RIES 购电的情况,而在配网的负荷高峰期,即 10:00—14:00 及 17:00—19:00, RIES 全部向配网售电以响应配网侧负荷需求。00:00—10:00,由于部分 RIES 新能源出力过剩,因此出现向配网售电的情况,谷时电价激励 RIES 向配网少售电甚至多购电,此时段 RIES 的购电量是最大的;14:00—17:00 及 19:00—23:00,配网制定平时电价,相对于谷价时段而言, RIES 的购电量减小,售电量增加以获取更高的利益;10:00—14:00 及 17:00—19:00,峰时电价激励 RIES 以最大出力供给配网负荷,各 RIES 停止向配网购电,向配网售电量增加。

由此可见,通过 RIES 的需求响应行为可以看出,配网的分时电价有效激励了 RIES 的交易行为,提高了配网的调峰能力和消纳新能源的能力,达到了配网削峰填谷的目的。

### 5.2.2 场景对比分析

为了验证 RIES 内部耦合关系及博弈对 RIES 调度的影响,本文设置 4 种场景进行对比研究。

1) 场景 1:与场景 4 相比,仅不考虑燃气轮机的热电联产,即燃气轮机只提供电能,热负荷由燃

气锅炉供给,不足的通过购热平衡;

2) 场景 2:考虑燃气轮机的热电联产,电价以固定电价进行优化调度,此时无法进行双层博弈;

3) 场景 3:与场景 4 相比,仅不考虑合作博弈;

4) 场景 4:本文提出的考虑燃气轮机的热电联产、电价设定为分时电价以及考虑合作博弈的双层博弈调度。

按照上述 4 种场景进行模型的构建,得到的各 RIES 效益对比如表 2 所示。

表 2 4 种场景下各 RIES 成本对比

Table 2 Comparison of RIES costs under 4 scenarios

场景	万元			合计
	RIES1	RIES2	RIES3	
1	4.233 6	4.112 5	4.436 9	12.783 0
2	3.606 0	4.082 1	4.908 0	12.596 1
3	4.032 9	3.945 5	4.305 3	12.283 7
4	4.027 4	3.941 5	4.297 1	12.266 0

从表 2 的 3 个 RIES 效益对比可以看出,相对于场景 4,场景 1 没有余热回收装置,燃气轮机的制热量直接弃用,热力系统缺失的制热量只能靠燃气锅炉和向热网购热填补,造成了资源的浪费和成本的升高;场景 2 与场景 4 相比,实施固定电价无法激励柔性负荷进行削峰填谷,亦无法引导各 RIES 制定合理的购售电量策略, RIES 与配网的交互量完全由 RIES 内部的负荷峰谷情况以及各设备出力情况进行决定,对配网侧的效益和负荷的平衡也有较大的影响;场景 3 相对于场景 4 而言未考虑合作博弈,在场景 4 的情况下,3 个 RIES 之间进行能量的互济,各 RIES 之间的合作联盟优化了机组的出力,提高了能源的利用率,因此各 RIES 的成本更低,成本总和更低,验证了合作博弈对 RIES 经济效益提高的有效性。

### 5.2.3 各场景对配网削峰填谷的影响

为了对比 4 种场景下 RIES 对配网侧削峰填谷的影响,将各场景削峰填谷后的负荷标准差值及峰谷差率进行对比,得到的结果如图 8 所示。

由图 8 可知,场景 2 情况下, RIES 联盟削峰填谷后的负荷标准差值最大,峰谷差率最大,削峰填谷水平最低,固定电价致使 RIES 根据自身能量流动水平决定与配网的交互量,因此无法达到削峰填谷的效果。相对于场景 4,场景 1 的负荷标准差较大,峰谷差率更高,由于不考虑热电联产,燃气轮机产热未直接利用,能源的浪费导致 RIES 热力系统无法与电力系统产生互通,对配网侧分时电价的

响应能力下降, 从而降低削峰填谷能力。场景 3 与场景 4 的负荷标准差与峰谷差率相近, 可知合作博弈为 RIES 联盟成员内部利益分配及机组出力优化, 对 RIES 削峰填谷能力影响不大。

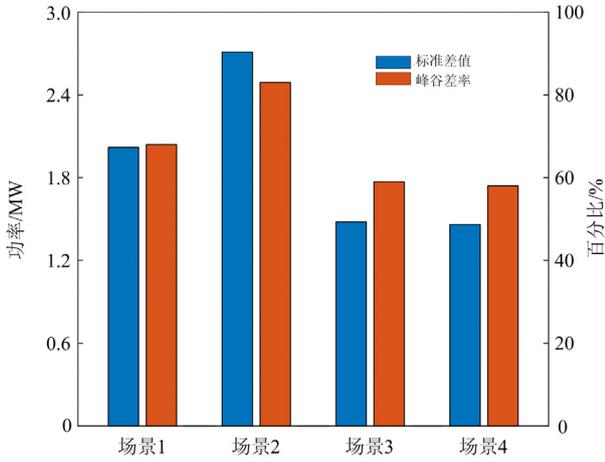


图 8 各场景削峰填谷后标准差值及峰谷差率对比图

Fig. 8 Comparison of standard difference and peak valley difference rate after peak shaving and valley filling in each scene

## 6 结论

本文根据 RIES 在主动配电网中的需求响应能力, 并考虑 RIES 之间的合作行为, 建立了含多区域综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度模型, 运用粒子群算法进行求解, 得到了满足收敛条件的 Nash 均衡解, 确定了配网的购售电价以及各 RIES 的购售电量策略。通过理论及算例分析得到如下结论:

1) RIES 考虑了电、气、热之间的多能协同, 在与 ADN 交互的过程中, 热力系统和天然气系统配合电力系统完成购售电量的制定, 实现了异质能源之间的耦合交互, 提高了能源利用率。

2) RIES 作为电力产消者, 根据 ADN 的电价浮动调整自身的电量策略, 配网侧负荷峰时激励 RIES 多售电, 谷时激励 RIES 多购电, 有效降低了配网侧负荷标准差值及峰谷差率, 提高了 ADN 的削峰填谷能力以及新能源消纳能力。

3) 各 RIES 之间进行合作博弈, 通过功率流动实现电量的互济, 达到联盟最优效益后运用 Shapley 值进行效益分配, 有效促进了机组出力的优化, 与未考虑合作博弈的策略相比, RIES 联盟及各 RIES 获得的效益最优。

4) 本文思想可为含综合能源系统的主动配电网的高效运行提供参考。

## 附录 A

表 A1 RIES 各单元参数

Table A1 Parameter of equipments within each RIES

设备	参数	RIES1	RIES2	RIES3
WT	容量/MW	2	2	—
	$c_{new,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	0.027 4	0.023 6	—
PV	容量/MW	—	—	2
	$c_{new,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	—	—	0.030 5
GT	$P_{max,i}/\text{MW}$	3	2	3
	$P_{min,i}/\text{MW}$	0.4	0	0
	$r_{up,i}/(\text{MW}/\text{h})$	1.2	0.6	1
	$r_{down,i}/(\text{MW}/\text{h})$	1.2	0.6	1
	$\eta_c/\%$	40	30	35
	$\eta_h/\%$	50	40	45
	$a_{GT,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	$3.9 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$5.2 \times 10^{-5}$
GB	$b_{GT,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	$4.8 \times 10^{-2}$	$3.94 \times 10^{-2}$	$5.68 \times 10^{-2}$
	$c_{GT,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	21.8	18.7	28.3
	$P_{max,i}/\text{MW}$	1	2	2
P2G	$P_{min,i}/\text{MW}$	—	0.5	—
	$\alpha/(\text{t}/\text{MWh})$	—	0.2	—
IL(电/热/气)	$\varpi_{1,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	—	0.3/0.25/0.2	—
	$\varpi_{2,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	—	0.08/0.06/0.05	—

表 A2 各 RIES 储能装置参数

Table A2 Parameter of energy storage devices within each RIES

设备	参数	RIES1	RIES2	RIES3
ES/	$C_i/\text{MWh}$	3/2/200( $\text{m}^3$ )	2/2/200( $\text{m}^3$ )	2/2/200( $\text{m}^3$ )
	$E_{\delta,i}(0)/\text{MW}$	1.2/0.8/80( $\text{m}^3$ )	0.8/0.8/80( $\text{m}^3$ )	0.8/0.8/80( $\text{m}^3$ )
	$SOC_{min,i}$	0.1/0.2/0.1	0.1/0.1/0.2	0.1/0.1/0.1
HS/	$SOC_{max,i}$	0.9/0.8/0.9	0.9/0.9/0.8	0.9/0.9/0.9
	$\sigma_{\delta,i}/\%$	0.1/1/1	0.1/1/1	0.1/1/1
GS	$\eta_{\delta,cha,i}/\%$	95/90/95	95/95/95	90/95/95
	$\eta_{\delta,dis,i}/\%$	95/90/95	95/95/95	90/95/95
	$a_{cs,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	0.018/0.016/	0.016/0.016/	0.016/0.016/
GS	$b_{cs,i}/(\text{元}/\text{kWh})$	0	0	0

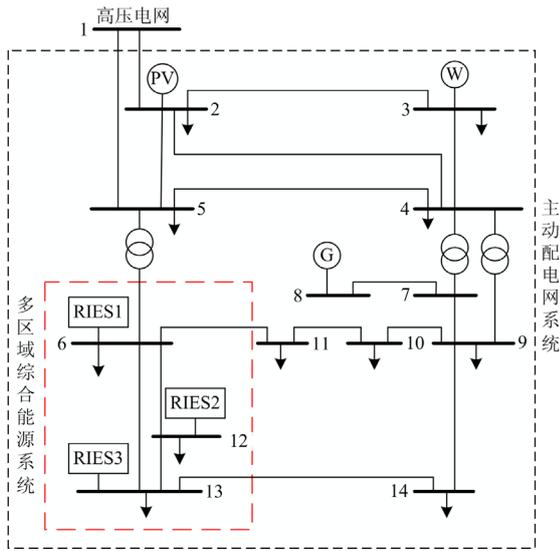
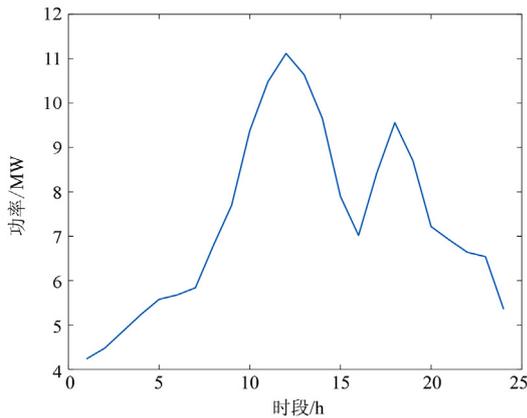
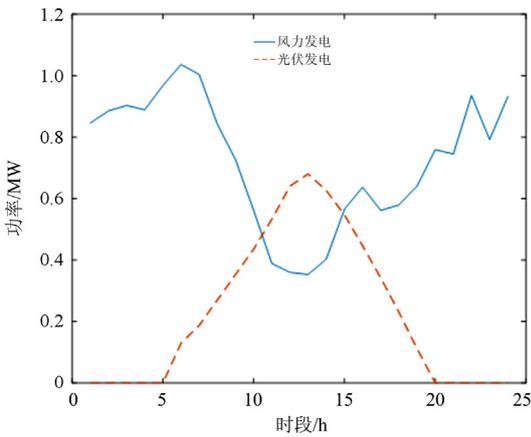


图 A1 改进的 IEEE14 节点系统图  
Fig. A1 The improved IEEE14 system



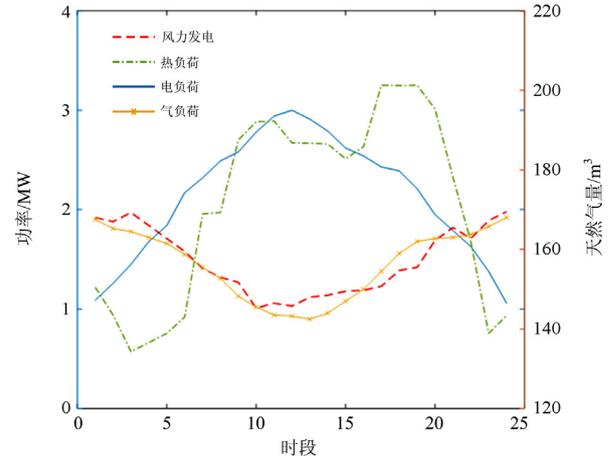
(a) 配网电负荷预测曲线



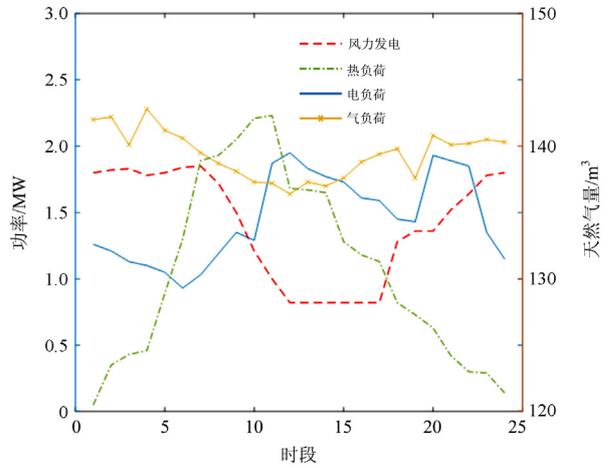
(b) 配网新能源预测曲线

图 A2 配网电负荷及新能源预测曲线

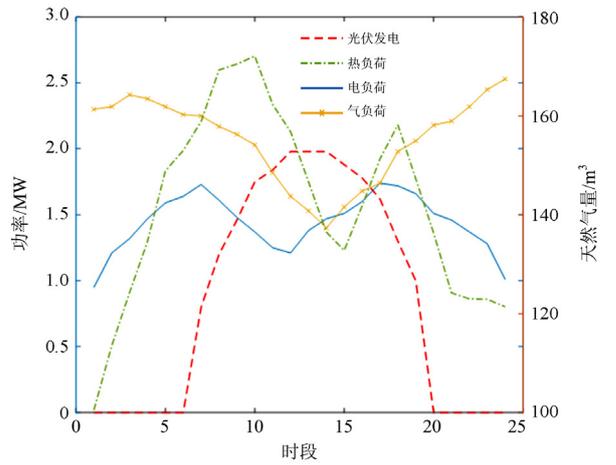
Fig. A2 Forecast curve of ADN load and new energy



(a) RIES1电、气、热负荷及新能源预测曲线



(b) RIES2电、气、热负荷及新能源预测曲线



(c) RIES3电、气、热负荷及新能源预测曲线

图 A3 RIES1、RIES2 和 RIES3 电、气、热负荷及  
新能源预测曲线

Fig. A3 Electricity, gas, heat loads and new energy prediction  
curve of RIES1, RIES2 and RIES3

## 参考文献

- [1] 丁涛, 牟晨璐, 别朝红, 等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4318-4328, 4632.  
DING Tao, MOU Chenlu, BIE Chaohong, et al. A review of energy internet and optimized operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4318-4328, 4632.
- [2] ZHU Mengting, XU Chengsi, DONG Shufeng, et al. An integrated multi-energy flow calculation method for electricity-gas-thermal integrated energy systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 65-76.
- [3] MOGHADDAM I G, SANIEI M, MASHHOUR E. A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building[J]. Energy, 2016, 94: 157-170.
- [4] 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.
- [5] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.  
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A review on steady-state analysis of typical regional integrated energy systems in the context of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.
- [6] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.  
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [7] LI Peng, WANG Zixuan, YANG Weihong, et al. Hierarchically partitioned coordinated operation of distributed integrated energy system based on a master-slave game[J]. Energy, 2021, 214.
- [8] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.  
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. Double-layer optimal dispatching of multi-microgrid considering interactive power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.
- [9] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.  
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [10] PAN Ersheng, LI Hui, WANG Zhidong, et al. Operation optimization of integrated energy systems based on heat storage characteristics of heating network[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 9(2): 223-238.
- [11] 谢峥, 刘随阳, 周冬. 基于博弈理论的电力系统扩展规划方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 86-91.  
XIE Zheng, LIU Suiyang, ZHOU Dong. Power system expansion planning method based on game theory[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 86-91.
- [12] 白牧可, 王越, 唐巍, 等. 基于区间线性规划的区域综合能源系统日前优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3963-3970.  
BAI Muke, WANG Yue, TANG Wei, et al. Day-ahead optimal scheduling of regional integrated energy systems based on interval linear programming[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3963-3970.
- [13] 赵长伟, 张慧颖, 刘春玲, 等. 面向综合能源系统可靠性评估的最优负荷削减量分层解耦计算方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6): 538-546.  
ZHAO Changwei, ZHANG Huiying, LIU Chunling, et al. Hierarchical decoupling optimal load curtailment algorithm for integrated energy systems reliability evaluation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 538-546.
- [14] QURESHY A, DINCER I. Energy and exergy analyses of an integrated renewable energy system for hydrogen production[J]. Energy, 2020, 204.
- [15] 周长城, 马溪原, 刘育权, 等. 基于合作博弈的工业园区综合能源系统成本分摊及收益分配方法[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 60-65.  
ZHOU Changcheng, MA Xiyuan, LIU Yuquan, et al. Cost allocation and revenue distribution method of integrated energy system in industrial park based on cooperative game[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 60-65.
- [16] 吴利兰, 荆朝霞, 吴青华, 等. 基于 Stackelberg 博弈模型的综合能源系统均衡交互策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 142-150, 207.  
WU Lilan, JING Zhaoxia, WU Qinghua, et al. Equilibrium interaction strategy of integrated energy system based on

Stackelberg game model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 142-150, 207.

[17] WU Q H, ZHENG Jiehui, JING Zhaoxia, et al. Coordinated scheduling of energy resources for distributed DHCs in an integrated energy grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(1): 95-103.

[18] 王进, 李欣然, 杨洪明, 等. 与电力系统协同区域型分布式冷热电联供能源系统集成方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 16-21.  
WANG Jin, LI Xinran, YANG Hongming, et al. An integration scheme for DES/CCHP coordinated with power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 16-21.

[19] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 697-707.  
QU Kaiping, HUANG Linni, YU Tao, et al. Decentralized dispatching of multi-regional integrated energy system under carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 697-707.

[20] 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. Optimal scheduling of multi-region integrated energy systems considering heat network constraints and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24.

[21] 张磊, 秦光宇, 刘亚玲. 含电转气的多能源中心协调优化运行策略[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 113-122.  
ZHANG Lei, QIN Guangyu, LIU Yaling. Coordinated optimization operation strategy for multi-energy center with power-to-gas devices[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 113-122.

[22] HEINISCH V, LE A T. Effects of power-to-gas on power systems: a case study of Denmark[C] // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, June 29-July 2, 2015, Eindhoven, Netherlands: 1-6.

[23] 陈磊, 牛玉刚, 贾廷纲. 基于主从博弈的多微网能量调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 35-42.  
CHEN Lei, NIU Yugang, JIA Tinggang. Multi-microgrid energy scheduling strategy based on master-slave game[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 35-42.

[24] 杨国清, 罗航, 王德意, 等. 分时电价与电动汽车优化调度的主从博弈模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 55-60.  
YANG Guoqing, LUO Hang, WANG Deyi, et al. Master-slave game model of TOU electricity price and optimal scheduling of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(10): 55-60.

[25] 刘念, 赵璟, 王杰, 等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1903-1910.  
LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. Group transaction model of photovoltaic microgrid based on cooperative game theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1903-1910.

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-08-26

作者简介:

李咸善(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为微电网运行与控制、综合能源系统优化调度、电力系统运行与控制、水电站仿真与控制; E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn

马凯琳(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化调度。E-mail: makailin72@163.com

(编辑 周金梅)