

# 计及网络安全约束和多能协同交互的多园区 综合能源系统分散协调调度

李鹏<sup>1</sup>, 陈博<sup>1</sup>, 王子轩<sup>1</sup>, 周逢权<sup>2</sup>, 吴迪凡<sup>1</sup>, 刘洋<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:**多园区接入区域配电网与配气网构成多园区综合能源系统(MCIES),可有效提高其经济效益。针对配电网、配气网和不同园区等多利益主体,提出一种计及网络安全约束和多能协同交互的MCIES分散协调调度双层模型。区域调度层为多主体调度层,配电网和配气网在满足网络安全约束的前提下向园区运营商供能,三者分别以各自利益最大化为目标,协调配网-园区联络线功率;局域调度层为园区利益分配层,各园区互联以实现彼此间电能和天然气支撑,并基于区域层决策得到的配网-园区交互能量,分别以各自经济最优为目标参与利益分配,优化内部设备出力计划,协调园区间多能交互功率。采用双层目标级联分析法解耦协调变量,分别将各层优化调度主问题构建为上下两级优化调度子问题,进而对调度子问题独立建模、协调求解。天津某地MCIES算例分析表明,所提方法兼顾了网络运行安全性和不同主体利益诉求,并通过发挥园区间多能协同交互优势,实现了MCIES的安全经济优化运行。

**关键词:**综合能源系统;网络安全约束;能量交互;分散协调调度;双层目标级联分析法

**中图分类号:**TM 73;TK 01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202011006

## 0 引言

能源互联网和综合能源系统的快速发展,使得不同能源形式间的耦合更加紧密,对建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。园区型综合能源系统是一个复杂的多能耦合系统,可向终端用户提供灵活的冷/热/电/气等多品位能源<sup>[1]</sup>。随着经济社会的发展,同一区域内多个园区互联,并接入上级配网形成多园区综合能源系统(MCIES)。园区间的能量交互将对园区优化运行以及配网安全经济调度产生较大影响<sup>[4]</sup>,亟需对MCIES的优化调度问题展开研究。

已有文献研究中,园区型综合能源系统多以冷热电联供型微网的形式呈现。针对单园区系统的优化经济调度,文献[5]建立了能源集线器模型,分析了其内部冷/热/电/气能流的传输及转化关系;文献[6]研究了热电联供型微网的经济调度问题,并应用线性化技术处理其中的非线性项,提出了微网能量优化的混合整数规划方法。针对多园区互联系统,已有较多文献考虑了园区间的能量交互问题<sup>[4,7-10]</sup>。如文献[4,7]研究了多微网间电能交互对冷热电联供型多微网系统优化调度的影响;文献[8]针对高可再生能源渗透率下的区域多微网系统,研

究了各微网间的电功率支援问题。但文献[4,7-8]仅计及了园区间电能交互,而多园区互联系统引入其他能量交互形式可更好地利用不同园区的资源禀赋与用能特性差异,从而提升系统整体的经济性<sup>[9]</sup>。如文献[9]针对含园区间电-热协同互济的多园区进行规划设计,优化了系统经济与环境效益。文献[10]研究了电-气互联多园区系统的协同优化问题,但仅考虑了园区能量输入端的互联,未计及电能和天然气在园区间的协同互济。

MCIES优化经济调度需计及配网的影响,原因是配网和园区从属于不同主体,配网的利益诉求以及网络运行安全性将影响MCIES的实际调度决策。对于不同利益主体的协同优化调度问题可采用分散协调调度模型处理,目标级联分析法(ATC)<sup>[11-12]</sup>因其具有灵活性强、参数易于选择且收敛性经过严格理论证明等优点而常用作求解此类问题的分解协调算法。如文献[12-13]将配电网(EPS)和多园区分别视为一个利益主体,基于ATC解耦二者间联络线功率,实现其独立并行求解;文献[14]将ATC应用于多电-气互联系统求解其高低渗透率区域间的分散协调调度策略。对于网络运行安全性问题,现有文献大多是直接引入配网-园区联络线功率上下限约束,较少考虑配网整体的安全性<sup>[4,7,9,12-13]</sup>,而后的求解关键在于计算网络潮流<sup>[15-17]</sup>。如文献[15]基于牛顿-拉夫逊法建立了配气网(NGS)的稳态潮流求解模型;文献[16]研究了电-气耦合综合能源系统的天然气暂态潮流与电力稳态潮流;文献[17]研究了区域综合能源系统的电-气-热能量流综合求解

收稿日期:2020-04-23;修回日期:2020-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577068);国家电网公司科技项目(5204BB19000N)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577068) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5204BB19000N)

问题。分析上述研究可发现以下3个有待进一步探究的问题:①MCIES的优化调度较少考虑园区间多能协同交互对多园区优化运行以及配网经济性的影响;②针对配网安全性的处理仅将配网-园区联络线功率限值加入配网调度模型的约束条件中,较少考虑调度过程中配网整体运行状态的实时变化,难以保证所得调度方案实际执行的可行性;③MCIES多主体分散协调调度中考虑的利益主体不全面,未计及NGS的利益,同时也未考虑不同园区间的利益分配问题。

为此,本文提出一种计及网络安全约束和多能协同交互的MCIES分散协调调度双层模型。区域调度层兼顾网络安全约束,实现对EPS、NGS和园区运营商等不同利益主体的协调调度,并决策出配网-园区交互功率;局域调度层基于区域层决策结果,对各园区进行利益分配,优化其内部设备出力,并协调园区间多能交互功率。针对分散协调调度双层模型,采用双层ATC分别解耦其中的协调变量,实现对各层各主体的独立建模、协调求解。

## 1 MCIES

### 1.1 MCIES分散协调调度双层架构

图1为MCIES分散协调调度双层架构。在整体结构上分为区域调度层和局域调度层。EPS和NGS通过配网-园区联络线向各园区供能,各园区通过电力通道和天然气管道串联,由于热力管道损耗较大,因此不考虑园区间热力交互。EPS、NGS和园区属于不同的利益主体,考虑到EPS和NGS之间无直接能量交易,二者的利益冲突体现为对售能收益的竞争,故将EPS和NGS归为配网侧;园区侧各园区在与EPS和NGS进行能量交易时倾向于结成联盟,即形成园区运营商(COP)。区域调度层为多主体调度层,EPS和NGS分别在满足自身网络运行安全约束的前提下追求售能收益最大化,同时COP追求总成本最优;局域调度层为园区利益分配层,COP将区域

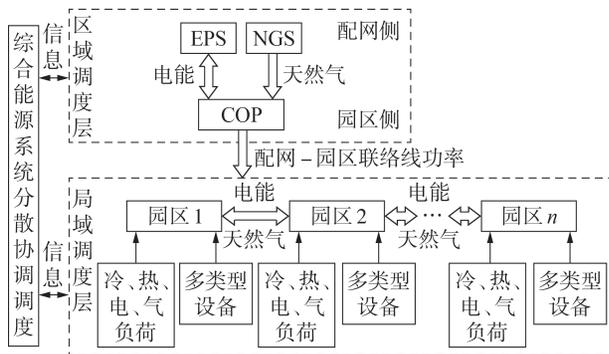


图1 MCIES分散协调调度双层架构

Fig.1 Two-layer framework of decentralized coordinated dispatch for MCIES

层决策出的配网-园区联络线功率下发给各园区,各园区在此基础上安排内部设备出力计划,协调园区间功率交互,追求各自利益最大化。

### 1.2 园区架构与数学模型

单个园区的架构如图2所示,其中冷/热/电/气能流的汇集和分配由集冷器、集热器、集电器和集气器等环节<sup>[5]</sup>实现。园区的主要设备有:风机(WT)、光伏(PV)、微燃机(MT)、余热锅炉(WH)、燃气锅炉(GB)、电制冷机(EC)、吸收式制冷机(AC)、储电装置(ES)、储热装置(HS)和储气装置(GS)。GB、EC、AC模型见文献[7],ES、HS、GS模型见文献[5,18],MT、WH模型见文献[4,6-7],其中MT采用热电联产工作模式,其发电效率-输出功率拟合函数为:

$$\eta^{MT} = a \left( \frac{P_{e,t}^{MT}}{P_{e,max}^{MT}} \right)^3 - b \left( \frac{P_{e,t}^{MT}}{P_{e,max}^{MT}} \right)^2 + c \frac{P_{e,t}^{MT}}{P_{e,max}^{MT}} + d \quad (1)$$

其中,下标 $t$ 表示 $t$ 时段; $\eta^{MT}$ 为MT的发电效率; $P_{e,t}^{MT}$ 和 $P_{e,max}^{MT}$ 分别为MT的输出电功率及其上限; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 为正的常数,由MT的容量与类型确定。

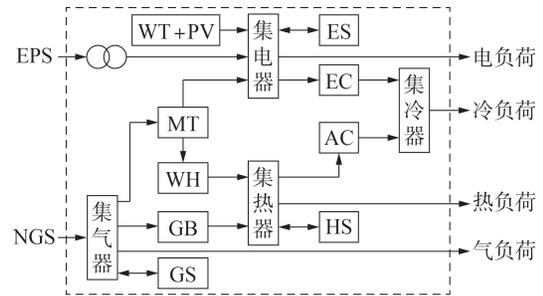


图2 园区架构

Fig.2 Community framework

## 2 MCIES分散调度模型

### 2.1 区域调度层

#### 2.1.1 配网侧

##### (1) 目标函数。

配网层包括EPS与NGS,二者均以向园区售能收益最大化为目标。EPS的目标函数为:

$$\max F_{EPS} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m c_e P_t^{EPS,i} \quad (2)$$

其中, $F_{EPS}$ 为一个调度周期 $T$ 内EPS向园区售能的收益; $m$ 为接入EPS的园区总数; $P_t^{EPS,i}$ 为EPS与园区交互的电功率,其值为正时表示园区从EPS购电,为负时表示园区向EPS售电; $c_e$ 为对应的购售电价。

NGS目标函数为:

$$\max F_{NGS} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m c_g P_t^{NGS,i} / L_{NG} \quad (3)$$

其中, $F_{NGS}$ 为一个调度周期 $T$ 内NGS向园区售能的收益,接入NGS的园区总数也为 $m$ 个; $P_t^{NGS,i}$ 为园区从NGS购买的天然气量,不考虑园区向NGS售气的情况; $c_g$ 为对应的购气价格; $L_{NG}$ 为天然气低热值。

(2)网络运行安全约束。

EPS 和 NGS 的优化运行需计及网络运行安全性,本文采用灵活且易于扩展的分立模型求解其稳态潮流<sup>[17]</sup>。对 EPS 和 NGS 分别采用前推回代法和牛顿-拉夫逊法进行求解<sup>[15]</sup>。

EPS 的运行安全约束包括功率平衡、节点电压、支路容量以及 EPS-园区交互功率约束。

$$\begin{cases} P_{e,t}^{G,i} - P_{e,t}^{L,i} - E_t^{\text{EPS},i} = \sum_{j \in \Omega_i} P_{e,t}^{i-j} \\ Q_{e,t}^{G,i} - Q_{e,t}^{L,i} = \sum_{j \in \Omega_i} Q_{e,t}^{i-j} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{e,t}^{i-j} = R_{i-j} [(P_{e,t}^{G,j})^2 + (Q_{e,t}^{G,j})^2] / V_{j,t}^2 + P_{e,t}^{G,j} \\ Q_{e,t}^{i-j} = X_{i-j} [(P_{e,t}^{G,j})^2 + (Q_{e,t}^{G,j})^2] / V_{j,t}^2 + Q_{e,t}^{G,j} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} V_{j,t} = V_{i,t} - \frac{P_{e,t}^{G,j} - jQ_{e,t}^{G,j}}{V_{j,t}^*} (R_{i-j} + jX_{i-j}) \\ |V_{j,t}| \leq V_{j,t}^* \leq V_{j,t} \end{cases} \quad (5)$$

$$S_t^{i-j} = P_{e,t}^{i-j} + jQ_{e,t}^{i-j}, \quad |S_t^{i-j}| \leq S_{\max}^{i-j} \quad (6)$$

$$E_{\min}^{\text{EPS},i} \leq E_t^{\text{EPS},i} \leq E_{\max}^{\text{EPS},i} \quad (7)$$

其中,  $P_{e,t}^{G,i}$ 、 $P_{e,t}^{G,j}$  分别为源节点注入节点  $i$ 、 $j$  的有功功率;  $Q_{e,t}^{G,i}$ 、 $Q_{e,t}^{G,j}$  分别为源节点注入节点  $i$ 、 $j$  的无功功率;  $P_{e,t}^{L,i}$ 、 $Q_{e,t}^{L,i}$  分别为节点  $i$  有功、无功负荷;  $E_t^{\text{EPS},i}$  为 EPS 的节点  $i$  与园区交互功率,  $E_{\max}^{\text{EPS},i}$ 、 $E_{\min}^{\text{EPS},i}$  分别为其上、下限;  $\Omega_i$  为节点  $i$  的关联节点的集合;  $P_{e,t}^{i-j}$ 、 $Q_{e,t}^{i-j}$  分别为支路  $(i, j)$  首端的有功、无功功率;  $R_{i-j} + jX_{i-j}$  为支路  $(i, j)$  的等效阻抗;  $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压;  $V_{j,t}^*$ 、 $V_{j,t}^{\min}$  分别为  $|V_{j,t}|$  上、下限;  $V_{j,t}^*$  表示  $V_{j,t}$  的共轭;  $S_t^{i-j}$  为支路  $(i, j)$  首端的复功率,  $S_{\max}^{i-j}$  为其上限。

NGS 的运行安全约束包括流量平衡、节点气压、管道流量以及 NGS-园区交互流量约束。

$$\begin{cases} F_t^{s,i} - F_t^{L,i} - F_t^{\text{NGS},i} = \sum_{j \in \Omega_i} F_t^{i-j} \\ F_t^{i-j} = \text{sgn}(p_i^i - p_j^j) K_{i-j} \sqrt{|p_i^i - p_j^j|} \end{cases} \quad (8)$$

$$p_{\min}^i \leq p_i^i \leq p_{\max}^i \quad (9)$$

$$F_{\min}^{i-j} \leq F_t^{i-j} \leq F_{\max}^{i-j} \quad (10)$$

$$0 \leq F_t^{\text{NGS},i} \leq F_{\max}^{\text{NGS},i} \quad (11)$$

其中,  $F_t^{s,i}$  为气源注入节点  $i$  的天然气流流量;  $F_t^{L,i}$  为节点  $i$  的天然气负荷;  $F_t^{\text{NGS},i}$  为节点  $i$  与园区交互气流量,  $F_{\max}^{\text{NGS},i}$  为其上限;  $F_t^{i-j}$  为管道  $(i, j)$  的天然气流流量,  $F_{\max}^{i-j}$ 、 $F_{\min}^{i-j}$  分别为其上、下限;  $\text{sgn}(p_i^i - p_j^j)$  表示管道  $(i, j)$  流量流动方向,  $p_i^i$ 、 $p_j^j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  压力, 当  $p_i^i - p_j^j > 0$  时  $\text{sgn}(p_i^i - p_j^j) = 1$ , 当  $p_i^i - p_j^j < 0$  时  $\text{sgn}(p_i^i - p_j^j) = -1$ ;  $K_{i-j}$  为关于管道  $(i, j)$  特性的参数, 与其直径、长度、温度和气体密度等有关;  $p_{\max}^i$ 、 $p_{\min}^i$  分别为  $p_i^i$  上、下限。

### 2.1.2 园区侧

(1)目标函数。

园区侧的优化对象为 COP, 其目标函数为所有园区的总成本  $F_{\text{COP}}$  最小, 包括运行维护成本  $F_{\text{om}}$ 、购能成本  $F_{\text{net}}$  和碳排放成本  $F_{\text{ec}}$ , 表示如下:

$$\min F_{\text{COP}} = F_{\text{om}} + F_{\text{net}} + F_{\text{ec}} \quad (12)$$

运行维护成本:

$$F_{\text{om}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m \sum_{\xi} \lambda_{\xi} P_{\text{out},t}^{\xi,i} \quad (13)$$

其中,  $P_{\text{out},t}^{\xi,i}$  为园区  $i$  设备  $\xi$  的输出功率;  $\lambda_{\xi}$  为设备  $\xi$  在单位时段内单位功率的运行维护费用;  $\xi \in \{\text{WT}, \text{PV}, \text{MT}, \text{WH}, \text{GB}, \text{AC}, \text{EC}, \text{ES}, \text{HS}, \text{GS}\}$ 。

购能成本为 COP 从 EPS 和 NGS 购能成本之和:

$$F_{\text{net}} = F_{\text{EPS}} + F_{\text{NGS}} \quad (14)$$

碳排放成本<sup>[5]</sup>包括 COP 从 EPS 购电等效排放成本和从 NGS 购气等效排放成本:

$$F_{\text{ec}} = \varepsilon \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m (\beta_e P_t^{\text{EPS},i} + \beta_g P_t^{\text{NGS},i}) \quad (15)$$

其中,  $\beta_e$  和  $\beta_g$  分别为购电和购气的等效排放系数;  $\varepsilon$  为单位  $\text{CO}_2$  的处理费用。

(2)约束条件。

功率平衡约束:

$$L_{e,t}^i = P_{e,t}^{\text{WT},i} + P_{e,t}^{\text{PV},i} + P_{e,t}^{\text{MT},i} + P_{e,t}^{\text{ES},i} + P_{e,t}^{\text{EPS},i} + P_{e,t}^{\text{eh},i} - P_{e,t}^{\text{EC},i} \quad (16)$$

$$L_{e,t}^i = \lambda^{\text{EC}} P_{e,t}^{\text{EC},i} + \lambda^{\text{AC}} P_{h,t}^{\text{AC},i} \quad (17)$$

$$L_{h,t}^i = \eta^{\text{WH}} (1 - \eta^{\text{MT}} - \eta^{\text{loss}}) P_{e,t}^{\text{MT},i} / \eta^{\text{MT}} +$$

$$\eta^{\text{GB}} P_{g,t}^{\text{GB},i} + P_{h,t}^{\text{HS},i} - P_{h,t}^{\text{AC},i} \quad (18)$$

$$L_{g,t}^i = P_{g,t}^{\text{GS},i} + P_{g,t}^{\text{NGS},i} + P_{g,t}^{\text{eh},i} - P_{g,t}^{\text{MT},i} / \eta^{\text{MT}} - P_{g,t}^{\text{GB},i} \quad (19)$$

其中,  $L_{e,t}^i$ 、 $L_{h,t}^i$ 、 $L_{g,t}^i$  分别为园区  $i$  的电、冷、热、气负荷需求;  $P_{e,t}^{\text{WT},i}$ 、 $P_{e,t}^{\text{PV},i}$  分别为园区  $i$  的 WT、PV 出力;  $P_{e,t}^{\text{ES},i}$ 、 $P_{e,t}^{\text{HS},i}$ 、 $P_{e,t}^{\text{GS},i}$  分别为园区  $i$  的 ES、HS、GS 功率, 其值为正时表示放能, 为负时表示充能;  $P_{e,t}^{\text{EC},i}$  为园区  $i$  的 EC 消耗电量;  $P_{h,t}^{\text{AC},i}$  为园区  $i$  的 AC 消耗热量;  $P_{g,t}^{\text{GB},i}$  为园区  $i$  的 GB 消耗天然气量;  $P_{e,t}^{\text{eh},i}$ 、 $P_{g,t}^{\text{eh},i}$  分别为园区  $i$  与其他园区交互的电量、天然气量;  $\eta^{\text{loss}}$  为 MT 的热损失系数;  $\eta^{\text{WH}}$ 、 $\eta^{\text{GB}}$  分别为 WH、GB 的能量转换效率;  $\lambda^{\text{EC}}$ 、 $\lambda^{\text{AC}}$  分别为 EC、AC 的能效比。

配网-园区联络线功率约束:

$$P_{t,\min}^{\phi,i} \leq P_t^{\phi,i} \leq P_{t,\max}^{\phi,i} \quad (20)$$

其中,  $P_t^{\phi,i}$  为园区  $i$  与配网  $\phi$  交互的能量,  $P_{t,\max}^{\phi,i}$ 、 $P_{t,\min}^{\phi,i}$  分别为其上、下限;  $\phi \in \{\text{EPS}, \text{NGS}\}$ 。

能量转换设备出力上下限约束:

$$P_{\text{out},\min}^{\psi,i} \leq P_{\text{out},t}^{\psi,i} \leq P_{\text{out},\max}^{\psi,i} \quad (21)$$

其中,  $P_{\text{out},t}^{\psi,i}$  为园区  $i$  能量转换设备  $\psi$  的输出功率,  $P_{\text{out},\max}^{\psi,i}$ 、 $P_{\text{out},\min}^{\psi,i}$  分别为其上、下限;  $\psi \in \{\text{MT}, \text{WH}, \text{GB}, \text{AC}, \text{EC}\}$ 。

燃料机组<sup>[6]</sup>爬坡约束:

$$R_{\text{down}}^{\omega} \Delta t \leq P_{\text{out},t}^{\omega,i} - P_{\text{out},t-1}^{\omega,i} \leq R_{\text{up}}^{\omega} \Delta t \quad (22)$$

其中,  $P_{\text{out},t}^{\omega,i}$  为园区  $i$  燃料机组  $\omega$  的出力;  $R_{\text{down}}^{\omega}$ 、 $R_{\text{up}}^{\omega}$  分别为燃料机组  $\omega$  的滑坡速度、爬坡速度;  $\Delta t$  为时间间隔;  $\omega \in \{\text{MT}, \text{GB}\}$ 。

储能设备约束:

$$\begin{cases} S_t^{x,i} = (1 - \delta^{x,i}) S_{t-1}^{x,i} + P_{cha,t}^{x,i} \eta_{cha}^{x,i} - P_{dis,t}^{x,i} / \eta_{dis}^{x,i} \\ S_{min}^{x,i} \leq S_t^{x,i} \leq S_{max}^{x,i} \\ 0 \leq P_{cha,t}^{x,i} \leq P_{cha,max}^{x,i} \tau_{cha,t}^{x,i}, 0 \leq P_{dis,t}^{x,i} \leq P_{dis,max}^{x,i} \tau_{dis,t}^{x,i} \\ \tau_{cha,t}^{x,i} + \tau_{dis,t}^{x,i} \leq 1, \tau_{cha,t}^{x,i}, \tau_{dis,t}^{x,i} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (23)$$

其中,  $S_t^{x,i}$  为园区  $i$  储能设备  $x$  的储能容量,  $S_{max}^{x,i}$ 、 $S_{min}^{x,i}$  分别为其上、下限; 为给下一调度周期预留一定的调节裕量<sup>[19]</sup>, 储能设备  $x$  在一个调度周期的始末时刻应满足  $S_0^{x,i} = S_{end}^{x,i}$ ;  $\delta^{x,i}$  为园区  $i$  储能设备  $x$  的能量损失率;  $\eta_{cha}^{x,i}$ 、 $\eta_{dis}^{x,i}$  分别为园区  $i$  储能设备  $x$  的充、放能效率;  $P_{cha,t}^{x,i}$ 、 $P_{dis,t}^{x,i}$  分别为园区  $i$  储能设备  $x$  的充、放能功率;  $P_{cha,max}^{x,i}$ 、 $P_{dis,max}^{x,i}$  分别为  $P_{cha,t}^{x,i}$ 、 $P_{dis,t}^{x,i}$  上限;  $\tau_{cha,t}^{x,i}$ 、 $\tau_{dis,t}^{x,i}$  为 0-1 变量, 表示园区  $i$  储能设备  $x$  的充放能标志位, 由于初始时刻储能无充放能过程, 故有  $\tau_{cha,0}^{x,i} = \tau_{dis,0}^{x,i} = 0$ ;  $x \in \{ES, HS, GS\}$ 。

## 2.2 局域调度层

(1) 目标函数。

局域调度层的优化对象为各园区, 优化目标为各园区自身成本  $F_{EH}^i$  最优, 由于已知配网-园区联络线功率, 故单个园区的成本仅包含运行维护和园区间交互功率成本, 决策变量为园区内各设备出力 and 园区间交互能量。以园区  $i$  为例, 其目标函数为:

$$\min F_{EH}^i = F_{om}^i + F_{eh}^i \quad (24)$$

园区运行维护成本  $F_{om}^i$  见式(13)。园区间交互功率包括电交互和天然气交互, 由于园区距离较近, 忽略园区间能量传输损耗, 故交互成本  $F_{eh}^i$  为:

$$F_{eh}^i = \sum_{t=1}^T (k_e P_{e,t}^{eh,i} + k_g P_{g,t}^{eh,i} / L_{NG}) = \sum_{t=1}^T \sum_{j \in \Theta_i} (k_e P_{e,t}^{eh,i-j} + k_g P_{g,t}^{eh,i-j} / L_{NG}) \quad (25)$$

其中,  $k_e$ 、 $k_g$  分别为园区间电交互、天然气交互的价格;  $P_{e,t}^{eh,i-j}$ 、 $P_{g,t}^{eh,i-j}$  分别为园区  $i$  与园区  $j$  交互的电量、天然气量, 其值为正时表示园区  $i$  购能, 为负时表示售能;  $\Theta_i$  为与园区  $i$  相关联的园区集合。

(2) 约束条件。

园区间交互功率约束:

$$\begin{cases} P_{e,min}^{eh,i-j} \leq P_{e,t}^{eh,i-j} \leq P_{e,max}^{eh,i-j} \\ P_{g,min}^{eh,i-j} \leq P_{g,t}^{eh,i-j} \leq P_{g,max}^{eh,i-j} \end{cases} \quad (26)$$

其中,  $P_{e,max}^{eh,i-j}$ 、 $P_{e,min}^{eh,i-j}$  分别为  $P_{e,t}^{eh,i-j}$  的上、下限;  $P_{g,max}^{eh,i-j}$ 、 $P_{g,min}^{eh,i-j}$  分别为  $P_{g,t}^{eh,i-j}$  的上、下限。

局域调度层约束条件还包括功率平衡、能量转换设备上下限、燃料机组爬坡以及储能设备约束, 见式(16)–(19)、(21)–(23)。

## 3 基于 ATC 的分散协调调度

### 3.1 双层 ATC

本文采用 ATC 实现对 MCIES 优化问题的分散

协调调度, 首先通过 ATC 解耦不同利益主体间的协调变量, 将原优化调度主问题构建为上下两级优化调度子问题, 对各级子问题进行独立建模, 通过在各级调度模型的目标函数中引入协调优化乘子项实现上下级调度的协调联系。

对于区域调度层, EPS、NGS 和 COP 分属不同的利益主体, 根据其源荷属性划分配网侧与园区侧, 此时 EPS-COP 联络线功率和 NGS-COP 联络线功率即为协调变量, 配网侧与园区侧即为区域调度主问题的上下两级。对于局域调度层, 各园区属于不同利益主体, 为简化模型方便求解, 本文分析 3 个园区串联的情况。此时, 将串联的首末端园区视为局域调度主问题的上级, 中间园区视为下级。两级间的协调变量为多园区间的交互能量。

针对区域调度层和局域调度层的优化问题, 设计了双层 ATC, 分别将两层的协调变量解耦成一对虚拟负荷和虚拟电源, 继而对各层上下级调度子问题进行独立建模、协调求解。将引入协调优化乘子项的区域调度层上级目标函数修正为:

$$\min -F_{EPS} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m \left[ \omega_{e,t}^i \left| P_{DS,t}^{EPS,i} - \bar{P}_{GD,t}^{EPS,i} \right| + \gamma_{e,t}^i \left( P_{DS,t}^{EPS,i} - \bar{P}_{GD,t}^{EPS,i} \right)^2 \right] \quad (27)$$

$$\min -F_{NGS} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m \left[ \omega_{g,t}^i \left| P_{DS,t}^{NGS,i} - \bar{P}_{GD,t}^{NGS,i} \right| + \gamma_{g,t}^i \left( P_{DS,t}^{NGS,i} - \bar{P}_{GD,t}^{NGS,i} \right)^2 \right] \quad (28)$$

其中,  $P_{DS,t}^{EPS,i}$  和  $\bar{P}_{GD,t}^{EPS,i}$  分别为 EPS 的虚拟负荷和 COP 优化所得虚拟电源, 分别对应协调变量在上级和下级的分量; 将上标 EPS 替换为 NGS 则表示 NGS 场景下的相关变量, 式(29)类似;  $\omega_e^i$  和  $\gamma_e^i$  为协调优化的乘子, 用下标 e 和 g 区分 EPS 和 NGS 的不同场景。

下级目标函数修正为:

$$\min F_{COP} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m \left[ \omega_{e,t}^i \left| P_{GD,t}^{EPS,i} - \bar{P}_{DS,t}^{EPS,i} \right| + \gamma_{e,t}^i \left( P_{GD,t}^{EPS,i} - \bar{P}_{DS,t}^{EPS,i} \right)^2 \right] + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m \left[ \omega_{g,t}^i \left| P_{GD,t}^{NGS,i} - \bar{P}_{DS,t}^{NGS,i} \right| + \gamma_{g,t}^i \left( P_{GD,t}^{NGS,i} - \bar{P}_{DS,t}^{NGS,i} \right)^2 \right] \quad (29)$$

其中,  $P_{GD,t}^{EPS,i}$  和  $\bar{P}_{DS,t}^{EPS,i}$  分别为 COP 的虚拟电源和 EPS 优化所得虚拟负荷。

文献[11]对 ATC 的收敛性进行了严格的理论证明, 区域调度层 ATC 的收敛判据为:

$$\begin{cases} \left| P_{GD,t}^{EPS,i,k} - P_{DS,t}^{EPS,i,k} \right| \leq \varepsilon_1, \left| P_{GD,t}^{NGS,i,k} - P_{DS,t}^{NGS,i,k} \right| \leq \varepsilon_2 \\ \left| \frac{(F_{EPS}^k + F_{NGS}^k + F_{COP}^k) - (F_{EPS}^{k-1} + F_{NGS}^{k-1} + F_{COP}^{k-1})}{F_{EPS}^k + F_{NGS}^k + F_{COP}^k} \right| \leq \varepsilon_3 \end{cases} \quad (30)$$

其中,  $\varepsilon_1$ — $\varepsilon_3$  为收敛阈值。

在第  $k$  次迭代中, 若不收敛, 则按式(31)更新

乘子。

$$\begin{cases} \omega_{e,t}^{i,k+1} = \omega_{e,t}^{i,k} + 2(\gamma_{e,t}^{i,k} | P_{GD,t}^{EPS,i,k} - P_{DS,t}^{EPS,i,k} | \\ \gamma_{e,t}^{i,k+1} = \beta \gamma_{e,t}^{i,k} \end{cases} \quad (31)$$

其中,  $\beta$  为常数,一般  $2 < \beta < 3$ <sup>[12]</sup>。乘子  $\omega_{e,t}^i$  和  $\gamma_{g,t}^i$  的更新原则与式(31)类似。局域调度层的目标函数、收敛判据和乘子更新原则与区域调度层类似,不再赘述。

上述双层 ATC 求解流程见图 3。

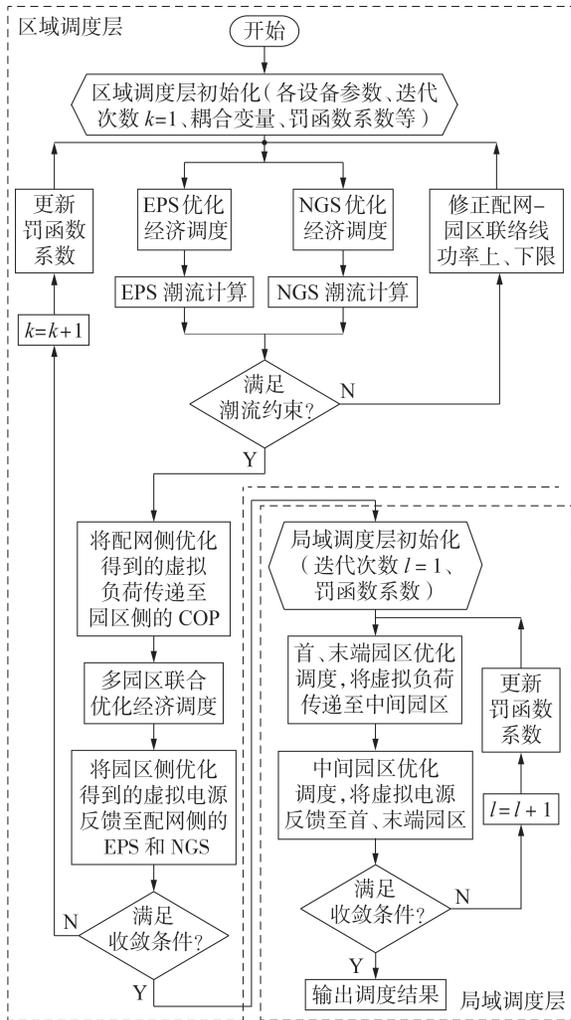


图 3 分散协调调度的双层 ATC 求解流程图

Fig.3 Flowchart for solving two-layer ATC of decentralized coordinated dispatch

### 3.2 模型线性化处理

MCIES 的分散协调调度模型属于混合整数非线性规划问题,非线性项主要来自 MT,其输出热量满足  $P_{h,t}^{MT} = P_{g,t}^{MT} (1 - \eta^{MT} - \eta_{loss}^{MT}) = (1 - \eta_{loss}^{MT}) P_{g,t}^{MT} - P_{e,t}^{MT}$ ,其中  $P_{h,t}^{MT}$  和  $P_{g,t}^{MT}$  分别为 MT 的输出热量和消耗燃气量。因此,只需对消耗燃气量  $P_{g,t}^{MT} = P_{e,t}^{MT} / \eta^{MT}$  进行处理即可。采用文献[6]的方法将其分段线性化,将园区优化模型转化为混合整数线性规划问题,从而使用 YALMIP 调用商业求解器 GUROBI 完成求解。

## 4 算例分析

### 4.1 算例系统

本文将天津某地的多园区系统作为算例<sup>[7,13]</sup>,并对其进行改造与结合,其拓扑结构见附录图 A1,包含以下 3 个部分。

(1)IEEE 33 节点 EPS。各节点负荷及参数配置参考文献[20],为匹配园区负荷,将各节点负荷乘以 0.6。节点 1 为平衡节点,电压幅值为 12.66 kV,通过变压器与发电厂相连,其余节点电压幅值标么值满足  $0.95 \text{ p.u.} \leq V \leq 1.05 \text{ p.u.}$ 。

(2)11 节点低压 NGS<sup>[17]</sup>。其中节点 1 为气源点,与天然气站相连,压力为定值 75 mbar,其余节点压力不低于 22.5 mbar,管道 12-14 流量上限取  $150 \text{ m}^3 / \text{h}$ 。

(3)多园区系统。算例中园区以能量枢纽 EH (Energy Hub) 的形式表示,其中 EH<sub>1</sub> 为冷热电联供型园区,结构如图 2 所示;EH<sub>2</sub> 为冷电联供型园区,无 GB 与 HS;EH<sub>3</sub> 为热电联供型园区,无 EC 与 AC。园区间有电能和天然气通道。园区负荷及风光预测出力<sup>[7]</sup>见附录图 A2,各设备的效率及运行维护费见文献[19],其他相关参数见附录表 A1。

园区与 EPS 间、多园区间的交易电价如附录表 A2 所示。为保护 EPS 利益,园区从 EPS 购电电价高于园区向 EPS 售电电价,多园区间购售电价与园区向 EPS 售电电价相同<sup>[7]</sup>。园区从 NGS 购气价格为  $2.2 \text{ 元} / \text{m}^3$ 。多园区间购售天然气价为  $1.8 \text{ 元} / \text{m}^3$ 。为保护配网侧利益,EPS 从发电厂购电电价和 NGS 从天然气站购气价格分别设为  $0.35 \text{ 元} / (\text{kW} \cdot \text{h})$  和  $1.2 \text{ 元} / \text{m}^3$ 。

### 4.2 区域调度层结果分析

为验证本文 MCIES 分散协调调度方法的有效性,设置表 1 所示的 5 种场景进行对比分析。表中,“√”表示有;“×”表示没有。取 ATC 收敛阈值为 0.01,乘子初值为 1.5,  $\beta = 2.9$ ,协调变量初值为各园区独立优化调度结果。

表 1 场景设置

Table 1 Scenario construction

场景	调度模型	网络运行安全约束	配网-园区联络线功率约束	电能交互通道	天然气交互通道
1	分散协调	√	√	×	×
2	分散协调	√	√	√	×
3	分散协调	√	√	√	√
4	集中式	√	√	√	×
5	分散协调	×	√	√	×

#### 4.2.1 MCIES 各主体经济性

(1)园区间不同能量交互组合方式对比。

场景 1—3 对比了园区间不同能量交互组合方式,配网-园区联络线功率结果见图 4,各主体利益见表 2。

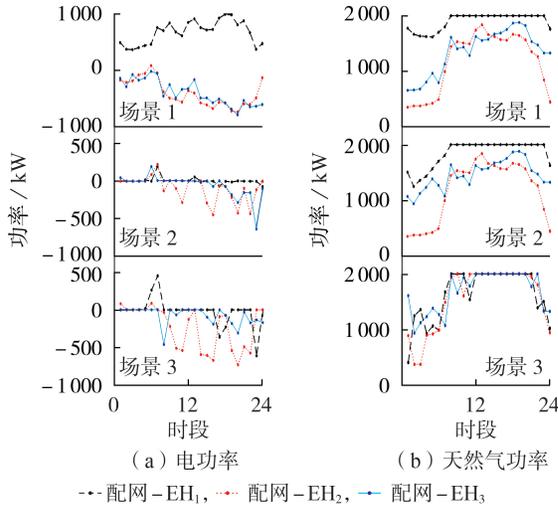


图4 不同能量交互组合下配网-园区联络线功率  
Fig.4 Electricity and natural gas along network-community tie line under different interaction combinations

表2 不同场景下各主体的利益

Table 2 Stakeholder interests under different scenarios  
单位:万元

场景	EPS售能收益	EPS总成本	NGS售能收益	NGS总成本	COP总成本	系统总成本
1	-0.0056	1.6318	2.4100	2.7614	2.9318	7.3250
2	-0.3115	1.9191	2.4361	2.7496	2.6511	7.3198
3	-0.7324	2.1749	2.6554	2.6499	2.4577	7.2825
4	-0.3335	1.9381	2.4314	2.7521	2.6189	7.3091

由图4可知,场景1园区间无能量交互,此时EH<sub>1</sub>从EPS购电满足自身电力缺额,EH<sub>2</sub>和EH<sub>3</sub>电力供应充沛从而向EPS售电;场景2引入园区间电能交互,此时EH<sub>2</sub>和EH<sub>3</sub>将原来售给EPS的电能转售给EH<sub>1</sub>,弥补EH<sub>1</sub>的电力缺额,使其减小从EPS购电量;场景3在园区间电能交互的基础上继续引入天然气交互,此时EH<sub>2</sub>和EH<sub>3</sub>从NGS购气量增加,各园区燃气供应充足,园区内燃气设备增大出力,使得园区电力供应进一步充沛从而增大向EPS售电量。

由表2可知,EPS(NGS)总成本由其售能收益以及从发电厂(天然气站)购能成本构成(根据图4,园区向EPS返送电能高于EPS售电量,因此EPS售能收益为负)。对比场景1—3,EPS总成本依次升高,NGS总成本依次降低,与图4分析相符;由于园区间能量交互相比园区从配网购能更经济,同时园区间电能交互和天然气交互的协同进一步优化了园区设备出力计划,因此COP总成本和系统总成本也依次降低。从而,证明了园区间电能和天然气的协同交互具有可行性和经济性。

#### (2)系统不同建模方式对比。

场景4以EPS、NGS和COP整体利益最优为目标,建立集中式调度模型,各主体利益见表2。对比场景2和场景4可知,采用集中式调度方法时系统总成本更优,但EPS和NGS总成本均增大。说明集中

式调度模型为了系统总体利益最优而牺牲了配网的利益。而分散协调调度模型可细化不同主体的利益诉求,通过对EPS、NGS和COP的分散建模、协调求解,使得3个不同主体间通过利益博弈达到协同经济最优运行。从而,证明了分散协调调度方法的合理性。

#### 4.2.2 MCIES配网运行安全性

为验证计及网络运行约束的分散协调调度模型的有效性,对比场景2和5,结果见表3和图5。根据表3,考虑配网运行约束的MCIES优化调度具有更高的系统总成本,说明系统为满足配网运行安全约束将牺牲一部分经济效益,这与实际情况相符。图5展示了EPS电压越线工况最严重的节点33电压水平。根据图5,场景5中节点电压在时段7越下限,而场景2中EPS在该时段实时削减售电量,从而使节点电压恢复至安全正常状态。可见本文方法虽牺牲了一部分系统经济效益,但能够根据网络整体运行状态实时调整配网-园区联络线功率,使配网在安全范围之内运行。从而,证明了计及网络安全约束的分散协调调度方法的有效性。

表3 不同网络约束下各主体的利益

Table 3 Stakeholder interests under different network constraints  
单位:万元

场景	EPS总成本	NGS总成本	COP总成本	系统总成本
2	1.9191	2.7496	2.6511	7.3198
5	1.9376	2.7567	2.6131	7.3074

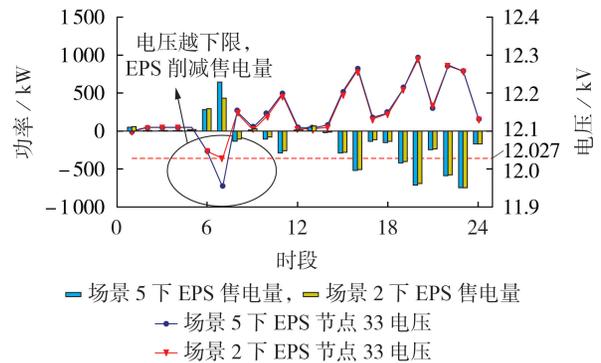


图5 EPS售电量及电压水平

Fig.5 Power consumption and voltage level of EPS

#### 4.3 局域调度层结果分析

4.2节证明了多园区间电能和天然气协同交互的可行性,本节在此基础上进一步对多园区系统进行利益分配。取ATC收敛阈值为0.01,乘子初值为1.5, $\beta=2.9$ ,下级协调变量初值为上级优化调度结果。

##### (1)园区优化调度结果分析。

以园区1为例,设备出力及园区间能量交互见附录图A3。由图A3(a)可知,EH<sub>1</sub>电力需求主要由内部风光、MT机组出力以及其他园区的电能支撑来满足。EC出力和ES的充放电状态受分时电价的影响。

响。园区在电价谷时从 EPS 购入一部分电能,在自身电能充沛时或电价平时段向 EPS 返送电能。由图 A3(b)可知,AC 在电价峰时和平时段出力,弥补此时 EC 出力短缺造成的冷功率缺额。由图 A3(c)和图 A3(d)可知,电价低谷时 MT 承担的电负荷较小,此时 MT 的热出力也低,热负荷需求由 MT 和 GB 同时满足;而电价非低谷时 MT 需增大出力以承担更多的电负荷需求,同时满足了热力供应,故此时 GB 不出力,园区增大从 NGS 购气量。

### (2)各园区利益分配分析。

将本文采用的多园区分散协调调度方法与多园区集中式调度方法进行对比,其中集中式调度将多园区视为一个利益主体,不考虑园区间利益分配,结果如表 4 所示。可见分散协调调度和集中式调度的结果差距不大,因此基于 ATC 的多园区分散协调调度能接近全局最优解,且兼顾了不同园区的利益诉求,各园区通过相互竞争达成利益分配,更符合实际情况。

表 4 不同建模方式下各园区的利益分配

Table 4 Benefit allocation under different modeling ways  
单位:万元

建模方式	EH <sub>1</sub> 成本	EH <sub>2</sub> 成本	EH <sub>3</sub> 成本	COP 总成本
分散协调	2.2210	0.0374	0.2069	2.4653
集中式	2.2027	0.0414	0.2136	2.4577

## 5 结论

本文针对 MCIES,提出一种计及网络安全约束和多能协同交互的分散协调调度方法,并得到结论如下:综合考虑 EPS、NGS 和不同园区等多主体利益,完善综合能源系统多主体建模,使模型更符合实际;配网的经济调度问题引入网络运行安全约束是必要的,本文方法可根据 EPS 和 NGS 的整体运行状态分别实时调整对应的配网-园区联络线功率,与传统的只计及联络线功率约束方法相比,调度方案更具可行性;多园区间引入天然气交互是可行的,且电能和天然气在园区间的协同交互将使得系统经济性更优;MCIES 分散协调调度框架及双层 ATC 经算例验证是有效的,且算例分析表明采用双层 ATC 可有效实现对配网-园区联络线功率和园区间交互功率的分散协调调度,兼顾网络运行安全性和不同主体的利益诉求,使各主体经过区域调度和局域调度两阶段的利益博弈,最终达到协同经济最优运行。

未来的研究将进一步考虑用户侧的利益,并针对多园区间更复杂的互联方式研究其博弈论求解。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

[1] WANG D, LIU L, JIA H, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 130-145.

[2] LI P, YU X, ZHANG J, et al. The  $H_{\infty}$  control method of grid-tied photovoltaic generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1670-1677.

[3] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.

LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of micro-grid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.

[4] 王守相, 吴志佳, 庄剑. 考虑微网间功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7185-7194, 7432.

WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian. Optimal dispatching model of CCHP type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and output coordination among micro-sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7185-7194, 7432.

[5] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.

MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 179-186.

[6] 吴雄, 王秀丽, 王建学, 等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-9.

WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-9.

[7] 徐青山, 李淋, 蔡霖霖, 等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 36-46.

XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 36-46.

[8] 王守相, 张齐, 王瀚, 等. 高可再生能源渗透率下的区域多微网系统优化规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 33-38, 52.

WANG Shouxiang, ZHANG Qi, WANG Han, et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 33-38, 52.

[9] 王丹, 孟政吉, 贾宏杰, 等. 考虑多区域互联协同的分布式能源站设备配置及站间管线规划[J/OL]. 电网技术. [2020-09-03]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0343>.

[10] SALIMI M, GHASEMI H, ADELPOUR M, et al. Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(8): 695-707.

[11] MICHELENA N, PARK H, PAPALAMBROS P Y. Convergence properties of analytical target cascading[J]. Aiaa Journal, 2002, 41(5): 897-905.

[12] 谢敏, 吉祥, 柯少佳, 等. 基于目标级联分析法的多微网主动配电网自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4911-4921, 5210.

XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target cascading theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4911-4921, 5210.

[13] 徐青山, 李淋, 盛业宏, 等. 冷热电联供型多微网主动配电网系统日前优化经济调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1726-1735.

XU Qingshan, LI Lin, SHENG Yehong, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of active distribution power system with combined cooling, heating and power-based microgrids[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1726-1735.

- [14] 魏震波,黄宇涵. 计及需求侧管理的多电-气互联综合能源系统分散协调调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):277-285.  
WEI Zhenbo, HUANG Yuhuan. Decentralized coordinated dispatch for multiple integrated electricity-gas energy systems considering demand side management[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 277-285.
- [15] ABEYSEKERA M, WU J, JENKINS N, et al. Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas[J]. Applied Energy, 2016, 164: 991-1002.
- [16] FANG J, ZENG Q, AI X, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(1): 188-198.
- [17] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(24):7108-7120,7425.  
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy considering operational constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7108-7120, 7425.
- [18] 刘天琪,卢俊,何川,等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. 电力自动化设备, 2019,39(8):261-268.  
LIU Tianqi, LU Jun, HE Chuan, et al. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 261-268.
- [19] 周灿煌,郑杰辉,荆朝霞,等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J]. 电网技术,2018,42(6):1687-1697.  
ZHOU Canhuang, ZHENG Jiehui, JING Zhaoxia, et al. Multi-objective optimal design of integrated energy system for park-level microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1687-1697.
- [20] 李鹏,王子轩,侯磊,等. 基于重复博弈的区域综合能源系统优化运行分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(14):81-93.  
LI Peng, WANG Zixuan, HOU Lei, et al. Analysis of repeated game based optimal operation for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 81-93.

#### 作者简介:



李鹏

李鹏(1965—),男,河北保定人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源发电与微电网、综合能源系统和主动配电网的规划、运行与控制等(E-mail: ncepulp@ncepu.edu.cn);

陈博(1998—),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电与微电网技术、综合能源系统(E-mail: chenbo@ncepu.cn);

王子轩(1996—),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为新能源发电与微电网技术、综合能源系统(E-mail: ncepupwx@ncepu.cn)。

(编辑 李玮)

## Decentralized coordinated dispatch of multi-community integrated energy system considering network security constraints and multi-energy collaborative interaction

LI Peng<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, WANG Zixuan<sup>1</sup>, ZHOU Fengquan<sup>2</sup>, WU Difan<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** MCIES (Multi-Community Integrated Energy System) with multiple communities connected to the regional EPS (Electric Power distribution System) and NGS (Natural Gas distribution System) can effectively improve the economic benefits. For multi-stakeholders such as EPS, NGS and different communities, a decentralized coordinated dispatch model with two layers of MCIES considering network security constraints and multi-energy collaborative interaction is proposed. Specifically, the regional dispatch layer is a multi-stakeholder dispatch layer, in which both EPS and NGS provide energy supply to the community operator in the condition that all network security constraints are satisfied. At the same time, the three stakeholders aim at maximizing their respective interests and coordinate the network-community tie-line power. The local dispatch layer is a benefit allocation layer of communities, where communities are interconnected to enable additional support of electricity and natural gas with each other. Based on the network-community interactive energy determined by the regional layer, each park participates in the benefit allocation with their own economic optimal goals by optimizing the internal equipment output and coordinating the multi-energy interactive power among communities. The two-layer analytical target cascading is developed to decouple the coordination variables. As a result, the master problem of optimal dispatch in each layer is reformulated as two-layer optimal dispatch sub-problems, which can be modeled independently and solved collaboratively. Numerical results on a realistic MCIES in Tianjin show that the proposed method realizes the safe and economical operation of MCIES by considering the network security and the interests of different stakeholders, and taking advantage of the multi-energy collaborative interaction among communities.

**Key words:** integrated energy system; network security constraints; energy interaction; decentralized coordinated dispatch; two-layer analytical target cascading

# 附录

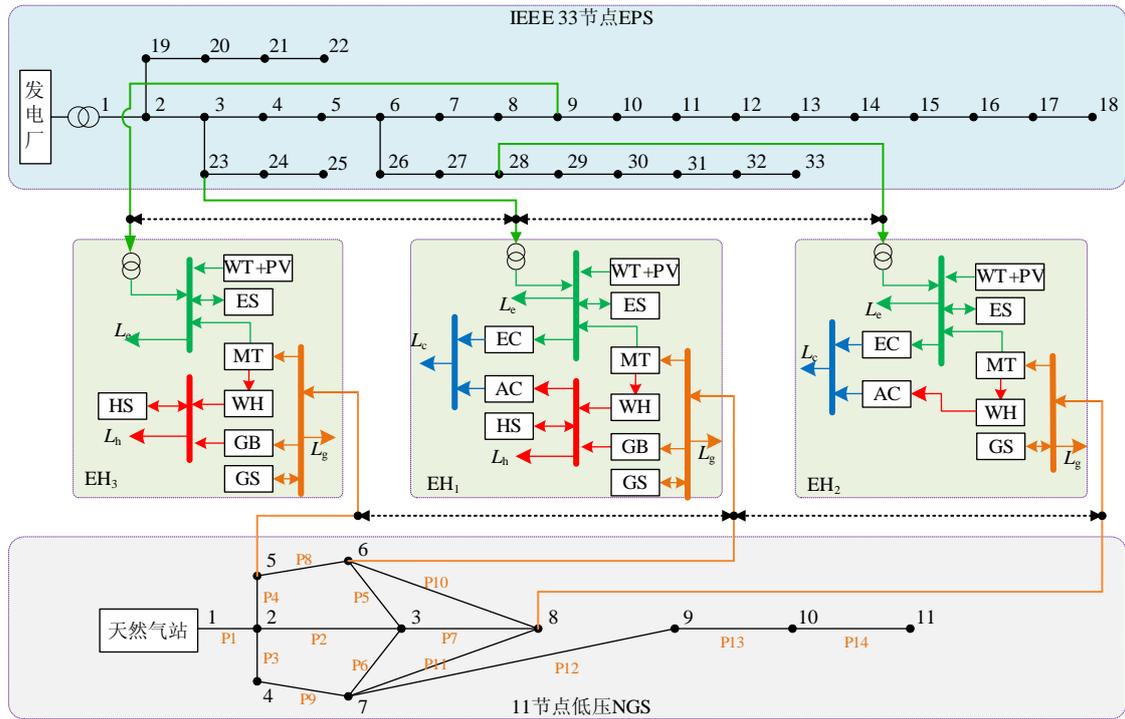


图 A1 MCIES 拓扑  
Fig.A1 Topology of MCIES

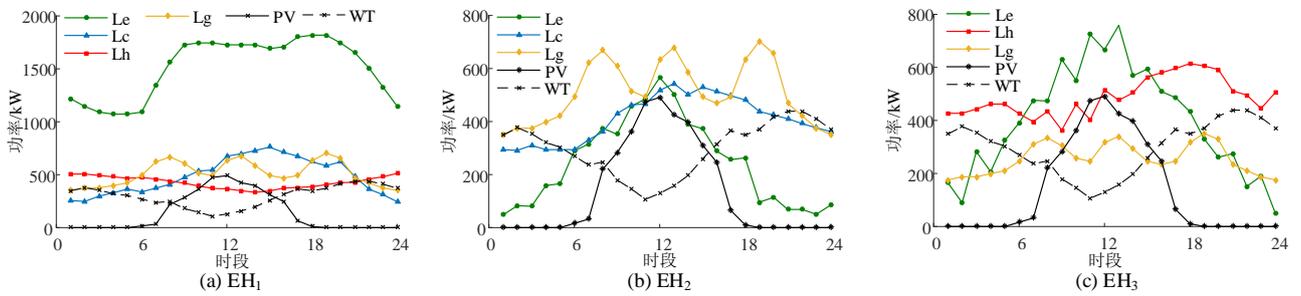


图 A2 负荷及 PV、WT 预测功率  
Fig.A2 Load and forecast power of PV and WT

表 A1 园区的技术参数

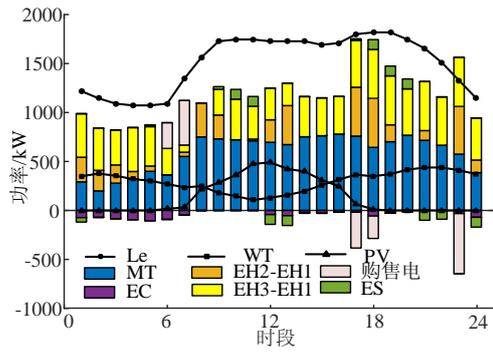
Table A1 Technical parameters of community

参数	数值
MT 最大发电功率	1000 kW
WH 最大出力	1500 kW
GB 最大出力	500 kW
AC 最大出力	1000 kW
EC 最大出力	800 kW
MT 滑坡/爬坡速度	$\pm 200$ kW/h
GB 滑坡/爬坡速度	$\pm 100$ kW/h
EPS-园区联络线功率上限	1 500 kW
NGS-园区联络线功率上限	2000 kW
园区间交互电功率上限	500 kW
园区间交互天然气上限	500 kW
储能设备的额定容量	1000 kW
ES 的能量损失率	0.01
HS/GS 的能量损失率	0.02
ES 的充/放能效率	0.98
HS/GS 的充/放能效率	0.95
MT 参数 $a$	0.0753
MT 参数 $b$	0.3095
MT 参数 $c$	0.4174
MT 参数 $d$	0.1068
天然气低热值	$9.78 \text{ (kW} \cdot \text{h) / m}^3$

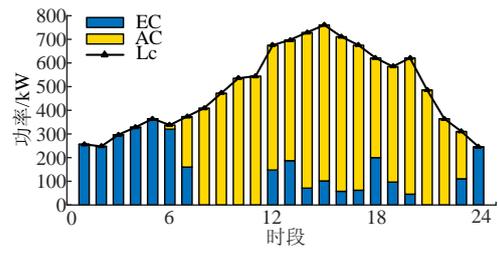
表 A2 分时电价

Table A2 Time-of-use price

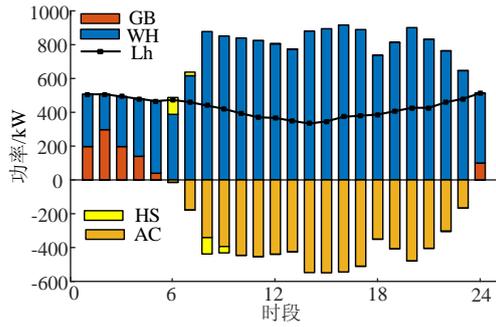
时段	购电电价/[元 $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$ ]	售电电价/[元 $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$ ]
峰时段	1.36	1.08
平时段	0.82	0.65
谷时段	0.37	0.28



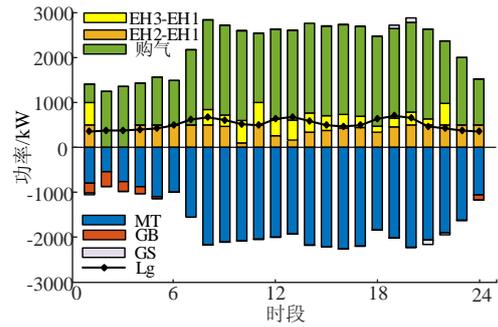
(a) 电功率平衡



(b) 冷功率平衡



(c) 热功率平衡



(d) 气功率平衡

图 A3 EH<sub>1</sub> 电/冷/热/气功率平衡

Fig.A3 Electricity/cooling/heating/gas balance of EH<sub>1</sub>