

基于异步动态事件触发通信策略的综合能源系统 分布式协同优化运行方法

李玉帅¹ 李天义² 高炜¹ 高文忠¹

摘要 研究综合能源系统的协同能源管理问题, 并提出了一种基于异步动态事件触发通信策略的分布式梯度算法来解决该问题. 通过引入外部辅助变量并设计有效的触发机制, 该方法可以使得每个参与者仅在必要时刻以离散且异步的方式与邻居产生通信交互, 实现了连续通信的离散替代化. 同时, 该方法并不要求全局同步时钟, 具有更强的灵活性. 此外, 本文也在理论上证明了算法的全局收敛性. 最后, 仿真结果验证了所提方法的有效性.

关键词 综合能源系统, 异步通信, 动态事件触发, 分布式算法

引用格式 李玉帅, 李天义, 高炜, 高文忠. 基于异步动态事件触发通信策略的综合能源系统分布式协同优化运行方法. 自动化学报, 2020, 46(9): 1831-1843

DOI 10.16383/j.aas.c200172

Distributed Collaborative Optimization Operation Approach for Integrated Energy System Based on Asynchronous and Dynamic Event-Triggering Communication Strategy

LI Yu-Shuai¹ LI Tian-Yi² GAO Wei¹ GAO Wen-Zhong¹

Abstract This paper investigates the collaborative energy management problem for integrated energy system, where an asynchronous and dynamic event-triggering communication strategy based distributed gradient algorithm is proposed to solve this problem. By introducing external auxiliary variable and designing effective triggering mechanism, this method can enable each participant sharing information with neighbors in a discrete and asynchronous communication fashion if only necessary. In this way, the continuous algorithm can be implemented in a discrete communication fashion. Meanwhile, this method does not rely on global clock synchronization, resulting in enhanced flexibility. In addition, the global convergence of the proposed algorithm is also proved in theory. Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words Integrated energy system, asynchronous communication, dynamic event-triggering, distributed algorithm

Citation Li Yu-Shuai, Li Tian-Yi, Gao Wei, Gao Wen-Zhong. Distributed collaborative optimization operation approach for integrated energy system based on asynchronous and dynamic event-triggering communication strategy. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(9): 1831-1843

能源是人类生存和发展的基础保障. 近年来伴随着能源危机和环境污染问题的日益凸显, 开发高效、可持续、清洁的能源利用形式势在必行^[1-2]. 在此背景下, 综合能源系统应运而生. 其本质可以理解为利用先进的能源信息技术与创新管理模型, 整合区域内包含电、热、气等多种能源在内的能源资源, 实现多种能源子系统之间的协同优化、管理、控制与互补互济, 并有效提高能源综合利用率、促进能

源可持续发展的新型一体化能源系统^[3-6]. 不同于单个能源网络(如电网), 在综合能源系统中, 各能源网络存在强的耦合关系, 其能源管理问题在建模和优化策略上更加复杂. 开发有效的能源管理策略和稳定性分析方法^[7]是推进综合能源系统发展的关键核心所在, 具有重要的理论和实际应用价值. 概括的来讲, 能源管理问题是以最大化社会福利为目标, 满足多种安全、稳定操作约束的一种系统优化问题. 当前, 用于寻找全局最优运行点的方法主要包括集中式方法和分布式方法. 集中式方法主要包括传统的迭代法^[8]、Newton 法^[9]和混合非线性规划法^[10]等. 虽然集中式方法可以准确的获知全局最优点, 但在实施过程中要求极高带宽的通讯基础设施来实现全系统铺设来搜集信息, 这将导致极高的成本代价.

收稿日期 2020-03-31 录用日期 2020-08-27

Manuscript received March 31, 2020; accepted August 27, 2020

本文责任编辑 孙秋野

Recommended by Associate Editor SUN Qiu-Ye

1. 丹佛大学电气与计算机工程系 丹佛 80208, 美国 2. 奥尔堡大学计算机系 奥尔堡 9220, 丹麦

1. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Denver, Denver 80208, USA 2. Department of Computer Science, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark

此外,集中式方法对系统单点故障极其敏感,若集中控制器发生故障,整个系统将面临瘫痪的风险,带来严重的经济损失^[11]。作为一种可行替代,分布式方法可以有效地利用稀疏的分布式通信网络结构来实现网络内各能源设备的分布式协同操作,并有效克服系统规模庞大、海量数据及避免集中信息采集。当前,研究基于分布式方法的能源管理策略已经成为当今电力系统和智能控制领域的热点研究方向^[12]。Chow等^[13]首次提出了一种增长率一致性算法用于解决电力系统的分布式经济调度问题。该方法要求一个领导者来预估全局的供需不匹配程度,并不能视为是完全分布式算法。随后,文献^[14]提出了一种完全分布式的迭代算法,可有效避免对于领导者智能体或集中控制器的依赖。在此基础上,近年来多种分布式优化方法被广泛提出,并用于解决电力系统的能源管理或者经济调度问题。其中,主要的研究话题聚焦于非凸性分析^[15],延时影响^[16-17],频率调节^[18-19],网络攻击^[20-21],对等优化^[22],初始自由^[23]和事件触发通信策略^[24-25]等。

虽然上述研究已从不同角度以分布式的方式较好地解决了电力系统的能源管理问题,但局限于单一的电能网络的协同优化上。多种能源网络的相互耦合作用并未考虑在其中。为了实现多种能源网络的协同优化,Zhang等^[26]提出了一种新颖的分布式能源管理框架,定义了能源体作为一种集成的能源单元,较好地描述了综合能源系统多元耦合、多样化能源角色和对等能源供需等特点。进而提出了一种分布式一致性交替方向乘子法,有效地解决电-热-气三种能源网络间的协同优化调度问题。类似于能源体,文献^[27]提出了一种“自能源”理念,并提出了一种双一致性算法用于实现多个自能源间的协同操作。然而,该方法仅适用于二次规划问题,并不适用于含有非二次型成本函数和复杂约束的优化问题。文献^[28-29]将基于动态神经的分布式算法应用于解决综合能源的能源管理问题,并考虑了更多的网络约束限制。文献^[30]首次提出了一种具有低复杂性的最优电气流模型,并设计了两种两阶段的凸化方法来解决模型中所涉及的非线性问题。文献^[31]提出了一种带有广义噪声的分布式优化算法,用于解决智能船舶综合能源系统的调度问题。虽然文献^[26-31]已经在综合能源系统的模型建立和优化算法设计上取得了卓越的贡献,但这些方法均建立在同步的周期通信基础之上。而周期同步通信依赖于全局的同步时钟,并要求全部参与者在同一时刻进行通信交互。在未来的综合能源系统中,不论是系统规模的庞杂性,还是地域的分散性,都限制了同步周期通信策略的大规模使用。因此,开

发兼容非周期且异步执行功能的分布式能源管理策略对推进未来综合能源系统的发展具有重要的研究价值。

基于上述启发,本文在能源体模型基础之上,提出了一种基于异步动态事件触发通信策略的分布式梯度优化算法,有效地解决了综合能源系统的协同能源管理问题。所提出算法可同时兼具离散通信、异步执行和分布式实施等特点。在所设计的触发机制下,每个参与者仅需要在必要的时刻与邻居节点异步地分享部分辅助变量的信息,便可计算出本地的最优操作和全局的能源市场成交价格。因此,该方法有效提高了系统的灵活性、隐私性和可拓展性并规避了依赖全局同步时钟这一强的限制约束,适用于大规模综合能源系统的分布式拓展。此外,本文采用李雅普诺夫稳定性理论,在强连通有向平衡图下,给出了算法的全局收敛性,在理论上验证了其正确性。最后,本文在一个由5个能源体构成的综合能源测试系统下进行仿真分析,进一步验证了所提算法的可行性和有效性。

1 综合能源系统的能源管理模型

在多能源体构成的综合能源系统中,每一个能源体可视为一个集成的能源单元。每个能源体中至少存在以下四类能源设备中的一类,分别是:1)仅发电设备,包括分布式可再生发电机(如光伏和风力发电机)、分布式燃料发电机和分布式电储能装置;2)仅发热装置,包括分布式可再生制热装置、分布式燃料制热装置和分布式热储能装置;3)分布式热电联产装置;4)分布式燃气供应商。本文规定每一个能源负载可以包含电、热和气三种成分(该能源负载可以是纯电、纯热或者纯气负载,也可以是电、热和气中二种或三种的任意组合形式),且每一个能源负载包括必须运行部分和可控部分。也就是说,每一个能源负载由6部分组成,分别是必须运行电负载部分、必须运行热负载部分、必须运行气负载部分、可控电负载部分、可控热负载部分和可控气负载部分,相应的符号定义参见表1。若任意一个能源负载仅含有6个组成部分的某些部分(如只含有必须运行和可控的电负载),只需将其余部分对应的负载变量值设置为零。根据应用场景的不同,每个能源体可以大到表示一个城市,或者小到表示单个的能源设备。

1.1 能源体模型

每个能源体的能源管理模型如下所述^[26]:

1) 约束条件

表 1 符号定义
Table 1 Symbol definition

符号	定义	符号	定义
i	能源体编号	j	能源体中的参与者编号
T	调度周期		(即各类能源设备和能源负载)
$p_{i,T}^{exch}, h_{i,T}^{exch}, g_{i,T}^{exch}$	能源体与外界交换的电、热和气的功率或流量	$p_{ij,T}^{rg}, p_{ij,T}^{fg}, p_{ij,T}^{chp}$	可再生发电机、燃料发电机和热电联产装置的功率输出
$h_{ij,T}^{rg}, h_{ij,T}^{fg}, h_{ij,T}^{chp}$	可再生制热装置, 燃料制热装置和热电联产装置的热能输出	$p_{ij,T}^{es}, h_{ij,T}^{es}, g_{ij,T}^{gas}$	电、热储能与外界功率交换值 燃气供应商所提供的燃气体积
$lp_{ij,T}^m, lh_{ij,T}^m, lg_{ij,T}^m$	第 i 个能源体第 j 个能源负载中的必须运行电负载部分、热负载部分和气负载部分	$lp_{ij,T}^c, lh_{ij,T}^c, lg_{ij,T}^c$	第 i 个能源体第 j 个能源负载中的可控电负载部分、热负载部分和气负载部分
$\Lambda_i^{p,rg}, \Lambda_i^{p,fg}, \Lambda_i^{p,es}$	第 i 个能源体中可再生发电机的集合, 燃料发电机的集合和电储能装置的集合	$\Lambda_i^{h,rg}, \Lambda_i^{h,fg}, \Lambda_i^{h,es}$	第 i 个能源体中可再生制热装置的集合、燃料制热装置的集合和热储能装置的集合
Λ_i^{chp}	第 i 个能源体中热电联产装置的集合	Λ_i^{gas}	第 i 个能源体中燃气供应商的集合
上标 min, max	下界和上界	Λ_i^l	第 i 个能源体中能源负载的集合
$p_{ij,T}^{fg,ramp}, p_{ij,T}^{chp,ramp}$	爬坡率	$\rho_{ij,k,1}, \rho_{ij,k,2}, \rho_{ij,k,3}$	热电联产装置第 k ($k = 1, \dots, 4$) 个线性约束的系数
$g_{ij,T}^p, g_{ij,T}^h, g_{ij,T}^{chp}$	燃料发电机、燃料制热装置和热电联产装置的燃气消耗量	$\eta_{ij}^{p,1}, \eta_{ij}^{p,2}, \eta_{ij}^{p,3}, \eta_{ij}^h, \eta_{ij}^{chp}$	热率系数
$p_{ij,T}^{es,ch}, p_{ij,T}^{es,ds}$	最大充、放电速率	$SOC_{ij,T}^p$	电储能装置的剩余容量
$\alpha_{ij}^{ch}, \alpha_{ij}^{ds}$	充、放电系数	$\beta_{ij,T-1}^{ch}, \beta_{ij,T-1}^{ds}$	上一调度周期的充、放电状态
$h_{ij,g-p}^{\min}, h_{ij,g-p}^{\max}$	电负载与气负载之间最小和最大的转换百分比	$h_{ij,h-p}^{\min}, h_{ij,h-p}^{\max}$	热负载与电负载之间最小和最大的转换百分比
$h_{ij,g-h}^{\min}, h_{ij,g-h}^{\max}$	气负载与热负载之间最小和最大的转换百分比	$B_{i,T}(\cdot)$	能源体 i 的总收益
$U_{ij,T}$	能源负载的使用函数	$C_{i,T}(\cdot)$	能源体 i 的总成本
$C(h_{ij,T}^{rg})$	可再生制热装置的成本函数	$C(p_{ij,T}^{rg})$	可再生发电机的成本函数
$C(h_{ij,T}^{fg})$	燃料制热装置的成本函数	$C(p_{ij,T}^{fg})$	燃料发电机的成本函数
$C(p_{ij,T}^{es})$	电储能的成本函数	$C(p_{ij,T}^{chp}, h_{ij,T}^{chp})$	热电联产装置的成本函数
$C(g_{ij,T}^{gas})$	燃气供应商的成本函数	$C(h_{ij,T}^{es})$	热储能的成本函数
$b_{ij}^{rg}, d_{ij}^{rg}, a_{ij}^{fg}, b_{ij}^{fg}, c_{ij}^{fg}, d_{ij}^{fg}, e_{ij}^{fg}, a_{ij}^p, b_{ij}^p, a_{ij}^h, b_{ij}^h, c_{ij}^{chp}, d_{ij}^{chp}, a_{ij}^{es}, a_{ij}^{gas}, b_{ij}^{gas}, c_{ij}^{gas}, d_{ij}^{gas}$	正的成本系数	$\varphi_{ij}^p, \gamma_{ij}^p, \varphi_{ij}^h, \gamma_{ij}^h, \varphi_{ij}^g, \gamma_{ij}^g, l_{ij}^{rg}$	正的使用系数
1_d	全部元素为 1 的 d 维列向量	$price_T^p, price_T^h, price_T^g$	电、热和气市场成交价格
0_d	全部元素为 0 的 d 维列向量	$b_{1,ij}, b_{2,ij}, b_{3,ij}, b_{4,ij}, b_{5,ij}, b_{6,ij}$	触发系数
diag(\cdot)	对角矩阵	q_i	第 i 个能源体中参与者总数
col(\cdot)	向量的列堆栈	上标 *	平衡点
$\Upsilon = \times \Upsilon_{ij}$	Υ_{ij} 的笛卡尔积	\otimes	克罗内克积

a) 每个能源体的功率平衡约束, 即在任意调度区间 T , 每个能源体内部各能源设备总的生产与总负载之差与外界交换值保持相等:

$$p_{i,T}^{exch} = \sum_{j \in \Lambda_i^{p,rg}} p_{ij,T}^{rg} + \sum_{j \in \Lambda_i^{p,fg}} p_{ij,T}^{fg} + \sum_{j \in \Lambda_i^{chp}} p_{ij,T}^{chp} + \sum_{j \in \Lambda_i^{p,es}} p_{ij,T}^{es} - \sum_{j \in \Lambda_i^l} (lp_{ij,T}^m + lp_{ij,T}^c) \quad (1)$$

$$h_{i,T}^{exch} = \sum_{j \in \Lambda_i^{h,rg}} h_{ij,T}^{rg} + \sum_{j \in \Lambda_i^{h,fg}} h_{ij,T}^{fg} + \sum_{j \in \Lambda_i^{chp}} h_{ij,T}^{chp} + \sum_{j \in \Lambda_i^{h,es}} h_{ij,T}^{es} - \sum_{j \in \Lambda_i^l} (lh_{ij,T}^m + lh_{ij,T}^c) \quad (2)$$

$$g_{i,T}^{exch} = \sum_{j \in \Lambda_i^{gas}} g_{ij,T}^{gas} - \sum_{j \in \Lambda_i^l} (lg_{ij,T}^m + lg_{ij,T}^c) \quad (3)$$

其中, 本文规定 $p_{ij,T}^{es}$ (或 $h_{ij,T}^{es}$) 为正表示放电 (或热), 反之为充电 (或储热).

b) 考虑可再生能源间歇性因素影响的最优性和可能性的权衡约束:

$$p_{ij,T}^{rg,\min} \leq p_{ij,T}^{rg} \leq p_{ij,T}^{rg,\max} \quad (4)$$

$$h_{ij,T}^{rg,\min} \leq h_{ij,T}^{rg} \leq h_{ij,T}^{rg,\max} \quad (5)$$

其中, 式 (5) 中对于上下限的设计中考虑了预测误差和置信区间等因素, 用于揭示可再生能源的不确定性, 其建模过程详见文献 [26].

c) 对于燃料电机、燃料制热装置的装机容量约束:

$$p_{ij,T}^{fg,\min} \leq p_{ij,T}^{fg} \leq p_{ij,T}^{fg,\max} \quad (6)$$

$$h_{ij,T}^{fg,\min} \leq h_{ij,T}^{fg} \leq h_{ij,T}^{fg,\max} \quad (7)$$

d) 热电联产操作可行域, 一般由 4 个线性约束共同构成, 其数学表达如下:

$$\rho_{ij,k,1} p_{ij,T}^{chp} + \rho_{ij,k,2} h_{ij,T}^{chp} + \rho_{ij,k,3} \geq 0 \quad (8)$$

e) 发电机组的爬坡上下限约束:

$$-p_{ij,T}^{fg,ramp} \leq p_{ij,T}^{fg} - p_{ij,T-1}^{fg} \leq p_{ij,T}^{fg,ramp} \quad (9)$$

$$-p_{ij,T}^{chp,ramp} \leq p_{ij,T}^{chp} - p_{ij,T-1}^{chp} \leq p_{ij,T}^{chp,ramp} \quad (10)$$

f) 分布式燃气供应商所提供的最大燃气上限约束:

$$0 \leq g_{ij,T}^{gas} \leq g_{ij,T}^{gas,\max} \quad (11)$$

g) 对于由消耗天然气作为能量来源的燃料发电机、燃料制热装置和热电联产装置, 其燃气消耗量的近似计算式如下:

$$g_{ij,T}^p = \Phi \left(\eta_{ij}^{p,1} \|p_{ij,T}^{fg}\|^2 + \eta_{ij}^{p,2} p_{ij,T}^{fg} + \eta_{ij}^{p,3} \right) \leq g_{ij,T}^{p,\max} \quad (12)$$

$$g_{ij,T}^h = \Phi \left(\frac{h_{ij,T}^{fg}}{\eta_{ij}^h} \right) \leq g_{ij,T}^{h,\max} \quad (13)$$

$$g_{ij,T}^{chp} = \Phi \left(\frac{p_{ij,T}^{fg} + h_{ij,T}^{chp}}{\eta_{ij}^{chp}} \right) \leq g_{ij,T}^{chp,\max} \quad (14)$$

其中, $\Phi \approx 84$ 表示从单位 MW 到 SCM/h 的变化比率.

h) 电、热储能约束:

$$-p_{ij,T}^{es,ch} \leq p_{ij,T}^{es} \leq p_{ij,T}^{es,ds} \quad (15)$$

$$SOC_{ij}^{p,\min} \leq SOC_{ij,T}^p \leq SOC_{ij}^{p,\max} \quad (16)$$

$$SOC_{ij,T}^p = SOC_{ij,T-1}^p - \left(\alpha_{ij}^{ch} \beta_{ij,T-1}^{ch} + \frac{1}{\alpha_{ij}^{ds}} \beta_{ij,T-1}^{ds} \right) p_{ij,T-1}^{es} \Delta T \quad (17)$$

其中, $SOC_{ij}^{p,\min}$ 和 $SOC_{ij}^{p,\max}$ 一般情况分别设定为额定容量的 0.2 和 0.8 倍; $\beta_{ij,T-1}^{ch}, \beta_{ij,T-1}^{ds} \in \{0, 1\}$, 且规定 $\beta_{ij,T-1}^{ch}$ (或 $\beta_{ij,T-1}^{ds}$) 等于 1 表示充 (或放) 电状态. 式 (15)~(17) 表示的是电储能的操作约束, 对于热储能具有相似的约束, 在此不再赘述.

i) 能源负载约束及其转换比率

$$0 \leq lp_{ij,T}^m + lp_{ij,T}^c \leq lp_{ij,T}^{\max} \quad (18)$$

$$0 \leq lh_{ij,T}^m + lh_{ij,T}^c \leq lh_{ij,T}^{\max} \quad (19)$$

$$0 \leq lg_{ij,T}^m + lg_{ij,T}^c \leq lg_{ij,T}^{\max} \quad (20)$$

$$h_{ij,g-p}^{\min} \leq \frac{lp_{ij,T}^c}{lp_{ij,T}^c + \frac{lg_{ij,T}^c}{\Phi}} \leq h_{ij,g-p}^{\max} \quad (21)$$

$$h_{ij,h-p}^{\min} \leq \frac{lp_{ij,T}^c}{lp_{ij,T}^c + lh_{ij,T}^c} \leq h_{ij,h-p}^{\max} \quad (22)$$

$$h_{ij,g-h}^{\min} \leq \frac{lh_{ij,T}^c}{lh_{ij,T}^c + \frac{lg_{ij,T}^c}{\Phi}} \leq h_{ij,g-h}^{\max} \quad (23)$$

2) 利益函数

每个能源体的利益函数由总的收益 $B_{i,T}(\cdot)$ 和总的成本 $C_{i,T}(\cdot)$ 两部分构成, 其数学表达如下:

$$W_{i,T} = B_{i,T}(\cdot) - C_{i,T}(\cdot) \quad (24)$$

其中,

$$B_{i,T}(\cdot) = \sum_{j \in \Lambda_i^l} U_{ij,T} + price_T^p p_{i,T}^{\text{exch}} + price_T^h h_{i,T}^{\text{exch}} + price_T^g g_{i,T}^{\text{exch}} \quad (25)$$

$$C_{i,T}(\cdot) = \sum_{j \in \Lambda_i^{p,rg}} C(p_{ij,T}^{rg}) + \sum_{j \in \Lambda_i^{h,rg}} C(h_{ij,T}^{rg}) + \sum_{j \in \Lambda_i^{p,fg}} C(p_{ij,T}^{fg}) + \sum_{j \in \Lambda_i^{h,fg}} C(h_{ij,T}^{fg}) + \sum_{j \in \Lambda_i^{chp}} C(p_{ij,T}^{chp}, h_{ij,T}^{chp}) + \sum_{j \in \Lambda_i^{es}} C(p_{ij,T}^{es}) + \sum_{j \in \Lambda_i^{h,es}} C(h_{ij,T}^{es}) + \sum_{j \in \Lambda_i^{gas}} C(g_{ij,T}^{gas}) \quad (26)$$

$$U_{ij,T} = -\varphi_{ij}^p (lp_{ij,T}^c + lp_{ij,T}^m)^2 + \gamma_{ij}^p (lp_{ij,T}^c + lp_{ij,T}^m) - \varphi_{ij}^h (lh_{ij,T}^c + lh_{ij,T}^m)^2 + \gamma_{ij}^h (lh_{ij,T}^c + lh_{ij,T}^m) - \varphi_{ij}^g (lg_{ij,T}^c + lg_{ij,T}^m)^2 + \gamma_{ij}^g (lg_{ij,T}^c + lg_{ij,T}^m) \quad (27)$$

$$C(p_{ij,T}^{rg}) = b_{ij}^{rg} p_{ij,T}^{rg} + d_{ij}^{rg} \exp\left(\frac{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg}}{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg, \min}}\right) \quad (28)$$

$$C(p_{ij,T}^{fg}) = a_{ij}^{fg} (p_{ij,T}^{fg})^2 + b_{ij}^{fg} p_{ij,T}^{fg} + d_{ij}^{fg} \exp\left(e_{ij}^{fg} p_{ij,T}^{fg}\right) + c_{ij}^{fg} \quad (29)$$

$$C(p_{ij,T}^{\text{chp}}, h_{ij,T}^{\text{chp}}) = a_{ij}^p (p_{ij,T}^{\text{chp}})^2 + b_{ij}^p p_{ij,T}^{\text{chp}} + a_{ij}^h (h_{ij,T}^{\text{chp}})^2 + b_{ij}^h h_{ij,T}^{\text{chp}} + d_{ij}^{\text{chp}} p_{ij,T}^{\text{chp}} h_{ij,T}^{\text{chp}} + c_{ij}^{\text{chp}} \quad (30)$$

$$C(p_{ij,T}^{\text{es}}) = a_{ij}^{\text{es}} (p_{ij,T}^{\text{es}} + b_{ij}^{\text{es}})^2 \quad (31)$$

$$C(g_{ij,T}^{\text{gas}}) = a_{ij}^{\text{gas}} (g_{ij,T}^{\text{gas}})^3 + b_{ij}^{\text{gas}} (g_{ij,T}^{\text{gas}})^2 d + d_{ij}^{\text{gas}} g_{ij,T}^{\text{gas}} + c_{ij}^{\text{gas}} \quad (32)$$

其中, 成本函数 $C(h_{ij,T}^{rg})$, $C(h_{ij,T}^{fg})$ 和 $C(h_{ij,T}^{\text{es}})$ 的具体形式分别与成本函数 $C(p_{ij,T}^{rg})$, $C(p_{ij,T}^{fg})$ 和 $C(p_{ij,T}^{\text{es}})$ 相同. 为减少冗余, 本文未列出其详细的成本函数模型. $price_T^p$, $price_T^h$ 和 $price_T^g$ 均为未知量, 并由后续分布式算法所求解.

综合能源系统的主要目的是实现不同种类能源间的协同互补, 以全面提高社会能源的综合使用效率, 降低综合产能成本 (经济成本和环境成本). 由于电、热、气三种能源可以被直接地传输、转换和消费, 本文主要对这三种能源系统在能源的生产侧和消费侧进行协同优化和管理. 作为电力系统和热力系统耦合关联的主要枢纽之一, 热电联产装置同时生产电和热两种能源. 其成本函数也由电、热两种能源的生产输出同时决定 (如式 (30) 所示), 且电、热能源的输出需要限制在相应的操作域内 (如式 (8) 所示). 在独立的电力系统和热力系统运行操作情况下, 热电联产装置往往操作在以电定热或者以热定电的两种典型运行方式下. 而综合能源系统是从全局视角出发, 热电联产装置的输出情况完全由当前的系统负载情况, 以最大化整个综合能源系统总利益为目标而决定, 而并不是由单一能源系统的局

部最优利益而决定. 同时, 燃气是电、热生产的能量来源之一, 如式 (12)~(14) 所示. 只有当电、热能源生产得以合理的规划, 我们才可以获得更加经济的燃气分配方案. 此外, 在能源的消费侧, 电、热、气负载需求在某些情况下可以相互替代, 并由用户根据当前的能源价格而自由选择. 本文采用与文献 [22] 相同的能源转换比模型来量化这一思想, 如式 (21)~(23) 所示. 这三种能源在消费侧的灵活性、互补性及可替代性只有在对等并综合考虑的情况下才能发挥其作用和优势. 因此, 相比于电、热和气三种能源子系统独立运行情况下, 综合能源系统可以同时协同调用全局内所有能源装置和负载, 以全局最优的方式提高系统整体的经济性和灵活性并充分发挥多种能源间的互补性.

1.2 综合能源系统的能源管理模型

基于上述能源体模型, 本文研究的综合能源管理问题是以最大化所有能源体的总利益, 并满足电、热和气三种能量的全局供需平衡及第 1.1 节中全部的操作约束限制. 具体计算式化表达如下:

$$\max \text{Object} = \sum_{i=1}^n W_{i,T} \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^n p_{i,T}^{\text{exch}} = 0, \sum_{i=1}^n h_{i,T}^{\text{exch}} = 0, \sum_{i=1}^n g_{i,T}^{\text{exch}} = 0 \quad (34)$$

及约束 (4)~(23). 其中, n 为能源体总个数.

在上式中, 本文旨在综合地考虑集成的电、热和气系统中多种能源设备和可控负载间 (参与者) 的协同优化, 并开发一种具有非周期异步通信功能的分布式算法, 使每个参与者仅在利用本地通信情况下获取到其相应的最优操作运行点. 由于本文考虑的设备种类繁多, 为了简化符号表达并益于后续分布式算法的设计表达, 令 $y_{ij} \in \mathbf{R}^3$ 统一表示第 i 个能源体中第 j 个参与者的本地决策变量. y_{ij} 是一个三维的决策变量, 其三维的排列顺序依次为电、热和气. 对于仅有一种或两种类型变量的设备来说, 可以用零来填补缺失维的变量. 同时, 本文规定 $F(y_{ij})$ 表示成本函数或者负的使用函数, 进而令其统一作为每个参与者新的本地目标函数. 对于变量 $y_{ij} \in \mathbf{R}^3$, 其本地的操作约束可用本地的闭凸集 Υ_{ij} 来表示. 另外, 对于能源负载的必须运行部分, 本文用 $\mathfrak{S}_{ij} = [lp_{ij,T}^m, lh_{ij,T}^m, lg_{ij,T}^m]^T \in \mathbf{R}^3$ 进行统一表示. 目标函数 (33) 物理意义为总的最大化利益函数. 根据式 (25) 和 (34), 可得 $\sum_{i=1}^n B_{i,T}(\cdot) = \sum_i \sum_{j \in \Lambda_i} U_{ij,T}$. 结合 $F(y_{ij})$ 的定义, 进一步可得到

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^n W_{i,T} = & \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j \in \Lambda_i^!} U_{ij,T} - \sum_{j \in \Lambda_i^{rg}} C(p_{ij,T}^{rg}) - \right. \\
& \sum_{j \in \Lambda_i^{h,rg}} C(h_{ij,T}^{rg}) - \sum_{j \in \Lambda_i^{fg}} C(p_{ij,T}^{fg}) - \\
& \sum_{j \in \Lambda_i^{h,fg}} C(h_{ij,T}^{fg}) - \sum_{j \in \Lambda_i^{chp}} C(p_{ij,T}^{chp}, h_{ij,T}^{chp}) - \\
& \sum_{j \in \Lambda_i^{p,es}} C(p_{ij,T}^{es}) - \sum_{j \in \Lambda_i^{h,es}} C(h_{ij,T}^{es}) - \\
& \left. \sum_{j \in \Lambda_i^{gas}} C(g_{ij,T}^{gas}) \right) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} F(y_{ij}) \quad (35)
\end{aligned}$$

由于求解最大化优化问题可以等价转化为求解负的最小化问题, 为此上述能源管理问题可进一步改写为以下形式:

$$\min \text{ Object} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} F(y_{ij}) \quad (36)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} D_{ij} y_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} \mathfrak{S}_{ij}, \quad y_{ij} \in \Upsilon_{ij} \quad (37)$$

其中, 当 y_{ij} 表示能源设备 (或能源负载) 时, $D_{ij} = I_3$ (或 $D_{ij} = -I_3$); I_3 为三维单位矩阵.

2 基于异步动态事件触发的分布式能源管理策略

2.1 基于图的通信网络拓扑和凸分析

综合能源系统的通信网络结构可以用一个由节点和边组成的有向图 $\mathcal{G} = (\mathbb{V}, \mathbb{E}, \mathbb{A})$ 来表示, 其中, $\mathbb{V} = \{\nu_{ij} | i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, \varrho_i\}$ 表示节点 (参与者) 集合, $\mathbb{E} \subset \mathbb{V} \times \mathbb{V}$ 表示通信边集, $\mathbb{A} = \{a_{ij}\} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 表示邻接矩阵. 总的节点个数定义为 N . 在一个有向图中, 若节点 ij 可从 (或向) 节点 $\bar{i}\bar{j}$ 接受 (或发送) 信息, 则称 $\bar{i}\bar{j}$ 为 ij 的入 (或出) 邻居节点, 此时 $a_{ij, \bar{i}\bar{j}} = 1$ (或 $a_{\bar{i}\bar{j}, ij} = 1$; 否则, $a_{ij, \bar{i}\bar{j}} = 0$ (或 $a_{\bar{i}\bar{j}, ij} = 0$). 节点 ij 的入邻居和出邻居节点集分别定义为 \mathcal{N}_{ij}^+ 和 \mathcal{N}_{ij}^- , 相应的入度和出度定义为 ϖ_{ij}^+ 和 ϖ_{ij}^- . 图的入拉普拉斯定义为 $L = \varpi^+ - \mathbb{A}$, 其中, $\varpi^+ = \text{diag}\{\varpi_{ij}^+\}$. 定义 $\check{L} = (L + L^T)/2$. 本文假设图 \mathcal{G} 是一个强连通平衡图. 根据文献 [32] 中定理 2 可知, 在强连通平衡图下, 矩阵 \check{L} 的各特征值中仅有一个零特征值且其余特征值均为正的, 其最小的正特征值定义为 λ_2 .

根据强凸函数定义 [33] 可知, $F(y_{ij})$ 为强凸函数, 若存在正常数 $\varphi_{ij} > 0$, 对于任意的 $y_{ij}, \tilde{y}_{ij} \in \Upsilon_{ij}$, 不等式 $(y_{ij} - \tilde{y}_{ij})^T (\nabla F(y_{ij}) - \nabla F(\tilde{y}_{ij})) \geq \varphi_{ij} \|y_{ij} - \tilde{y}_{ij}\|^2$

成立. 接下来, 我们逐一验证所研究问题的强凸特性. 在式 (27) 中, 本文采用的使用函数 $U_{ij,T}$ 是一个标准的二次型函数, 且二次项系数为负. 回顾先前定义, $F(y_{ij})$ 表示成本函数或者负的使用函数. 因此, 需要验证 $-U_{ij,T}$ 的强凸性. 根据式 (27) 可得, 对于任意一组变量 $(lp_{ij,T}^c, lh_{ij,T}^c, lg_{ij,T}^c)$ 和 $(\tilde{l}p_{ij,T}^c, \tilde{l}h_{ij,T}^c, \tilde{l}g_{ij,T}^c)$ 及其对应的负的使用函数 $-U_{ij,T}$ 和 $-\tilde{U}_{ij,T}$, 可以得到

$$\begin{aligned}
& \left([lp_{ij,T}^c, lh_{ij,T}^c, lg_{ij,T}^c] - \right. \\
& \left. [\tilde{l}p_{ij,T}^c, \tilde{l}h_{ij,T}^c, \tilde{l}g_{ij,T}^c] \right) \left(-\nabla U_{ij,T} + \nabla \tilde{U}_{ij,T} \right) = \\
& 2\varphi_{ij}^p \|lp_{ij,T}^c - \tilde{l}p_{ij,T}^c\|^2 + 2\varphi_{ij}^h \|lh_{ij,T}^c - \tilde{l}h_{ij,T}^c\|^2 + \\
& 2\varphi_{ij}^g \|lg_{ij,T}^c - \tilde{l}g_{ij,T}^c\|^2 \geq \\
& \varphi_{ij}^c \| [lp_{ij,T}^c, lh_{ij,T}^c, lg_{ij,T}^c] - \\
& [\tilde{l}p_{ij,T}^c, \tilde{l}h_{ij,T}^c, \tilde{l}g_{ij,T}^c] \|^2 \quad (38)
\end{aligned}$$

其中, $\varphi_{ij}^c = \min\{2\varphi_{ij}^p, 2\varphi_{ij}^h, 2\varphi_{ij}^g\}$. 因为 $\varphi_{ij}^p, \varphi_{ij}^h$ 和 φ_{ij}^g 均为正的使用系数, 所以 $\varphi_{ij}^c > 0$. 因此, $-U_{ij,T}$ 为强凸函数. 也就是说当编号 ij 表示能源负载时, $F(y_{ij})$ 为强凸函数.

根据式 (28), 对于任意一组变量 $p_{ij,T}^{rg}$ 和 $\tilde{p}_{ij,T}^{rg}$ 及其对应的成本函数 $C(p_{ij,T}^{rg})$ 和 $C(\tilde{p}_{ij,T}^{rg})$, 可以得到

$$\begin{aligned}
& \left(p_{ij,T}^{rg} - \tilde{p}_{ij,T}^{rg} \right) \left(\nabla C(p_{ij,T}^{rg}) - \nabla C(\tilde{p}_{ij,T}^{rg}) \right) = \\
& \frac{-d_{ij}^{rg} l_{ij}^{rg}}{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg, \min}} \left(\exp \left(l_{ij}^{rg} \frac{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg}}{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg, \min}} \right) - \right. \\
& \left. \exp \left(l_{ij}^{rg} \frac{p_{ij,T}^{rg, \max} - \tilde{p}_{ij,T}^{rg}}{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg, \min}} \right) \right) \left(p_{ij,T}^{rg} - \tilde{p}_{ij,T}^{rg} \right) \geq \\
& \varphi_{ij}^{rg} \|p_{ij,T}^{rg} - \tilde{p}_{ij,T}^{rg}\|^2 \quad (39)
\end{aligned}$$

其中, $\varphi_{ij}^{rg} = \frac{-d_{ij}^{rg} l_{ij}^{rg}}{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg, \min}} \mathfrak{f}_{ij}^{rg} > 0$, 因为 $d_{ij}^{rg} < 0$ 且其余系数为正; \mathfrak{f}_{ij}^{rg} 表示指数函数 $\exp \left(l_{ij}^{rg} \frac{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg}}{p_{ij,T}^{rg, \max} - p_{ij,T}^{rg, \min}} \right)$

的偏导数在约束 (4) 范围内的最小值. 式 (39) 意指 $C(p_{ij,T}^{rg})$ 为强凸函数. 式 (29) 中成本函数 $C(p_{ij,T}^{fg})$ 的强凸特性证明过程与上述 $C(p_{ij,T}^{rg})$ 的强凸特性证明过程相类似, 本文不再赘述.

对于热电联产装置, 本文沿用对于成本函数系数满足 $4a_{ij}^p a_{ij}^h - (d_{ij}^{chp})^2 > 0$ 这一假设 [26]. 选取

$$\mathfrak{f}_{ij}^{chp} = \arg \min_{\mathfrak{f}_{ij}^{chp} > 0} \left\{ \left(2a_{ij}^p - \mathfrak{f}_{ij}^{chp} \right) \left(2a_{ij}^h - \mathfrak{f}_{ij}^{chp} \right) - \left(d_{ij}^{chp} \right)^2 \geq 0 \right\}$$

其存在性可以被保障因为 $4a_{ij}^p a_{ij}^h - (d_{ij}^{\text{chp}})^2 > 0$. 进而根据式 (30), 对于任意一组变量 $(p_{ij,T}^{\text{chp}}, h_{ij,T}^{\text{chp}})$ 和 $(\tilde{p}_{ij,T}^{\text{chp}}, \tilde{h}_{ij,T}^{\text{chp}})$ 及其相应成本函数 $C(p_{ij,T}^{\text{chp}}, h_{ij,T}^{\text{chp}})$ 和 $C(\tilde{p}_{ij,T}^{\text{chp}}, \tilde{h}_{ij,T}^{\text{chp}})$, 可以得到

$$\begin{aligned} & \left(\left[p_{ij,T}^{\text{chp}}, h_{ij,T}^{\text{chp}} \right] - \left[\tilde{p}_{ij,T}^{\text{chp}}, \tilde{h}_{ij,T}^{\text{chp}} \right] \right) \left(\nabla C \left(p_{ij,T}^{\text{chp}}, h_{ij,T}^{\text{chp}} \right) - \right. \\ & \left. \nabla C \left(\tilde{p}_{ij,T}^{\text{chp}}, \tilde{h}_{ij,T}^{\text{chp}} \right) \right) - \\ & \mathbf{f}_{ij}^{\text{chp}} \left\| \left[p_{ij,T}^{\text{chp}}, h_{ij,T}^{\text{chp}} \right] - \left[\tilde{p}_{ij,T}^{\text{chp}}, \tilde{h}_{ij,T}^{\text{chp}} \right] \right\|^2 = \\ & \left[p_{ij,T}^{\text{chp}}, h_{ij,T}^{\text{chp}} \right] \begin{bmatrix} 2a_{ij}^p - \mathbf{f}_{ij}^{\text{chp}} & d_{ij}^{\text{chp}} \\ d_{ij}^{\text{chp}} & 2a_{ij}^h - \mathbf{f}_{ij}^{\text{chp}} \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} p_{ij,T}^{\text{chp}} \\ h_{ij,T}^{\text{chp}} \end{bmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (40)$$

根据上述对于系数 $\mathbf{f}_{ij}^{\text{chp}}$ 的选取, 可知 $\mathbf{f}_{ij}^{\text{chp}} > 0$. 因此, 结合式 (40) 可知 $C(p_{ij,T}^{\text{chp}}, h_{ij,T}^{\text{chp}})$ 为强凸函数. 根据式 (31), 对于任意一组 $p_{ij,T}^{\text{es}}$ 和 $\tilde{p}_{ij,T}^{\text{es}}$ 以及相应成本函数 $C(p_{ij,T}^{\text{es}})$ 和 $C(\tilde{p}_{ij,T}^{\text{es}})$, 可以得到

$$\begin{aligned} & (p_{ij,T}^{\text{es}} - \tilde{p}_{ij,T}^{\text{es}}) \left(\nabla C(p_{ij,T}^{\text{es}}) - \nabla C(\tilde{p}_{ij,T}^{\text{es}}) \right) \geq \\ & a_{ij}^{\text{es}} \|p_{ij,T}^{\text{es}} - \tilde{p}_{ij,T}^{\text{es}}\|^2 \end{aligned} \quad (41)$$

a_{ij}^{es} 为正的系数, 也就是说 $a_{ij}^{\text{es}} > 0$. 因此, $C(p_{ij,T}^{\text{es}})$ 为强凸函数. 根据式 (32) 和式 (11), 对于任意一组 $g_{ij,T}^{\text{gas}}$ 和 $\tilde{g}_{ij,T}^{\text{gas}}$ 以及相应成本函数 $C(g_{ij,T}^{\text{gas}})$ 和 $C(\tilde{g}_{ij,T}^{\text{gas}})$, 可以得到

$$\begin{aligned} & (g_{ij,T}^{\text{gas}} - \tilde{g}_{ij,T}^{\text{gas}}) \left(\nabla C(g_{ij,T}^{\text{gas}}) - \nabla C(\tilde{g}_{ij,T}^{\text{gas}}) \right) = \\ & \left(3a_{ij}^{\text{gas}} (g_{ij,T}^{\text{gas}} + \tilde{g}_{ij,T}^{\text{gas}}) + 2b_{ij}^{\text{gas}} \right) \|g_{ij,T}^{\text{gas}} - \tilde{g}_{ij,T}^{\text{gas}}\|^2 \geq 2b_{ij}^{\text{gas}} \|g_{ij,T}^{\text{gas}} - \tilde{g}_{ij,T}^{\text{gas}}\|^2 \end{aligned} \quad (42)$$

b_{ij}^{gas} 为正的系数, 也就是说 $b_{ij}^{\text{gas}} > 0$. 因此, 在约束 (11) 范围内, $C(g_{ij,T}^{\text{gas}})$ 为强凸函数. 基于上述讨论, 每一个成本函数在相应的闭凸域内均为强凸函数. 因此, $F(y_{ij})$ 在表示成本函数时也是强凸函数. 综上所述, $F(y_{ij})$ 在相应的闭凸域内是强凸函数.

此外, 本文采用微分投影操作来处理不等式约束, 并用 $\Pi_{\Upsilon_{ij}}(y_{ij}, \mathfrak{h})$ 表示 y_{ij} 在闭凸集 Υ_{ij} 对于 \mathfrak{h} 的微分投影, 其详细定义可参见文献 [34]. 根据文献 [34] 中引理 2.1 可知,

$$\Pi_{\Upsilon_{ij}}(y_{ij}, \mathfrak{h}) = \mathfrak{h} - o_{ij}(y_{ij})\pi_{ij}(y_{ij}) \quad (43)$$

其中, $o_{ij}(y_{ij}) \geq 0$ 表示一个伴随着变量 y_{ij} 变化而

变化的非负数, $\pi_{ij}(y_{ij}) \in \mathbf{c}_{\Upsilon_{ij}}(y_{ij})$, $\mathbf{c}_{\Upsilon_{ij}}(y_{ij})$ 为 y_{ij} 在 Υ_{ij} 上的法锥.

2.2 算法设计

在分布式的综合能源系统中, 每一个参与者均会配备一个微型的处理器. 而微型处理器往往仅具有有限的通信带宽能力. 因此, 连续的通信方式难以实现. 而周期的通信则需要依赖一个全局的同步时钟. 对于一个地域广泛分布的大规模分布式系统而言, 要求全局同步时钟是一个较强的条件, 因此极大地降低了这种类型算法执行的灵活性和可靠性. 为解决该问题, 本文针对连续时间优化算法, 设计异步的动态事件触发策略并将其嵌入到每个参与者的优化执行过程中. 进而实现了连续通信的离散替代化, 且通信仅要求在必要时刻发生, 有效地避免了对全局同步时钟要求的依赖. 分布式算法的执行过程为

$$\dot{y}_{ij} = \Pi_{\Upsilon_{ij}}(y_{ij}, -\nabla F(y_{ij}) + D_{ij}^T \hat{\mu}_{ij}) \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mu}_{ij} = & - \sum_{\bar{i}\bar{j} \in \mathcal{N}_{ij}^+} a_{ij,\bar{i}\bar{j}} (\hat{\mu}_{ij} - \hat{\mu}_{\bar{i}\bar{j}}) - \\ & \sum_{\bar{i}\bar{j} \in \mathcal{N}_{ij}^+} a_{ij,\bar{i}\bar{j}} (\hat{v}_{ij} - \hat{v}_{\bar{i}\bar{j}}) + \mathfrak{S}_{ij} - D_{ij} y_{ij} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\dot{v}_{ij} = \sum_{\bar{i}\bar{j} \in \mathcal{N}_{ij}} a_{ij,\bar{i}\bar{j}} (\hat{\mu}_{ij} - \hat{\mu}_{\bar{i}\bar{j}}) \quad (46)$$

其中, $\mu_{ij} \in \mathbf{R}^3$ 和 $v_{ij} \in \mathbf{R}^3$ 为两个不同的辅助变量; μ_{ij} 是原始问题 (36) 在等式约束 (37) 下预估的拉格朗日因子, 其物理含义是预估的能源 (电、热和气) 市场交易价格; 令 $\hat{\mu}_{ij} \approx \mu_{ij}(t_{ij}^k)$ 和 $\hat{v}_{ij} \approx v_{ij}(t_{ij}^k)$, $t \in [t_{ij}^k, t_{ij}^{k+1})$, 表示当前最新的更新状态. $\{t_{ij}^k | k = 1, 2, \dots\}$ 表示触发时刻, 且仅在这一时刻参与者 ij 与其邻居节点产生通信交互.

在不影响算法收敛性能的基础上, 如何恰当的设计触发机制来决定触发时刻的发生是其关键所在. 此外, 为了尽可能地增大触发间隙 (即, 相邻两次触发时刻之间的时间间隔 $t_{ij}^{k+1} - t_{ij}^k$), 并有效避免奇诺行为 (即在有限时间内进行无限次触发) 的发生, 本文引入一个外部的辅助变量 $z_{ij} \in \mathbf{R}^3$. 其动态行为设计如下:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{ij} = & -b_{1,ij} z_{ij} + b_{2,ij} \left(b_{3,ij} \sum_{\bar{i}\bar{j} \in \mathcal{N}_{ij}^+} a_{ij,\bar{i}\bar{j}} \|\hat{\mu}_{ij} - \hat{\mu}_{\bar{i}\bar{j}}\|^2 - \right. \\ & \left. b_{4,ij} \|(\hat{\mu}_{ij} - \mu_{ij})\|^2 - b_{5,ij} \|(\hat{v}_{ij} - v_{ij})\|^2 \right) \end{aligned} \quad (47)$$

其中, 触发系数满足 $b_{1,ij} > 0$, $0 < b_{2,ij} < 1$, $b_{3,ij} = h_1/4$, $b_{4,ij} = h_1/2\varrho_{ij} + 5h_1\varpi_{ij}^+ + 4h_2\varpi_{ij}^+$, $b_{5,ij} = 5h_2\varpi_{ij}^+ + 4h_1\varpi_{ij}^+$; 参数 $h_1, h_2 > 0$ 满足 $3h_1\lambda_2 - h_2\lambda_2 - 4 > 0$, $3h_2\lambda_2 - h_1\lambda_2 - 4 > 0$, $h_1\varrho_{ij} - h_2^2 > 0$. 令 z_{ij} 的初值 $z_{ij}(t_0) > 0$.

结合式 (44)~(47), 在本文采用的触发函数如下:

$$\aleph_{ij} = b_{6,ij} \left(b_{4,ij} \|(\hat{\mu}_{ij} - \mu_{ij})\|^2 + b_{5,ij} \|(\hat{v}_{ij} - v_{ij})\|^2 - b_{3,ij} \sum_{\bar{ij} \in \mathcal{N}_{ij}^+} a_{ij,\bar{ij}} \|\hat{\mu}_{ij} - \hat{\mu}_{\bar{ij}}\|^2 \right) - z_{ij} \quad (48)$$

其中, 触发系数 $b_{6,ij} > (1 - b_{2,ij})/b_{1,ij}$.

对于每一个参与者, 时刻监视触发函数的变化, 一旦 $\aleph_{ij} > 0$ 便触发通信, 并利用与邻居交互的信息及自身采样信息来更新本地的相关变量. 采用这种通信方式, 每个参与者仅需要在必要的时刻与邻居进行通信, 且通信的变量仅包括设计的辅助变量, 并不涉及决策变量 y_{ij} 的信息. 因此, 所提出方法并不依赖于全局同步时钟的要求, 且兼具有较高的隐私性, 适用于综合能源系统的大规模推广.

注 1. 算法 (44)~(46) 适用于解决一般的凸优化问题, 其形式如式 (36) 和式 (37) 所示. 在综合能源系统中, 网络拓扑因素对整体的协同优化结果产生影响. 若考虑这些因素后系统的模型仍然可以被抽象建模为式 (36) 和式 (37) 的形式, 那么算法 (44)~(46) 可以进一步被拓展用于解决含网络拓扑因素的协同能源管理问题. 如, 可以将部分网络拓扑限制建模并归结为本地的不等式约束. 本地不等式约束则可以转换成 $y_{ij} \in \Upsilon_{ij}$ 的形式, 进而可以利用所提算法加以解决.

注 2. 与文献 [26–30] 相对比, 本文所提方法同样可以以完全分布式方式解决综合能源系统的协同能源管理问题. 但不同的是, 文献 [26–30] 中所提方法建立在同步周期的通信策略基础之上. 而本文所提方法嵌入了异步动态事件触发通信策略, 可以使得每个参与者仅在必要的触发时刻与邻居产生通信交互, 并不依赖于全局同步时钟这一强的假设条件. 因此, 所提出方法具有更强的灵活性. 与文献 [24–25] 相比, 尽管这些研究将事件触发策略引入到电力系统的经济调度问题中, 但其所采用的方法仅适用于含有单一电力网络的协同优化上, 并不适用于解决含有多种耦合特点的综合能源系统的协同能源管理问题. 此外, 本文通过设计辅助变量 z_{ij} (如式 (47) 所示), 提出的是一种动态的事件通信策略. 而文献 [24–25] 采用的是静态的事件触发通信策略. 若

将 z_{ij} 设置为零, 那么本文方法将退化为一种静态的触发形式. 由于 $z_{ij} > 0$, 动态的事件通信方式相比静态的方式具有更长的触发间隙, 可以进一步减少通信触发次数.

2.3 最优性和收敛性分析

本节首先验证算法 (44)~(46) 的平衡点即为最优点, 进而基于李雅普诺夫稳定理论进一步验证该算法的收敛性.

首先, 令 $Y, U, V, \hat{U}, \hat{V}$ 分别表示 $y_{ij}, \mu_{ij}, v_{ij}, \hat{\mu}_{ij}$ 和 \hat{v}_{ij} 的列向量形式. 算法 (44)~(46) 可以改写为以下矩阵形式

$$\dot{Y} = \Pi_{\Upsilon}(Y, -\nabla F(Y) + D^T \hat{V}) \quad (49)$$

$$\dot{U} = -(L \otimes I_3) \hat{U} - (L \otimes I_3) \hat{V} + \mathfrak{S} - DY \quad (50)$$

$$\dot{V} = (L \otimes I_3) \hat{U} \quad (51)$$

其中, $\nabla F(Y)$ 和 \mathfrak{S} 分别表示 $\nabla F(y_{ij})$ 和 \mathfrak{S}_{ij} 的列向量形式.

在平衡点处, 我们有

$$0_{3N} = \Pi_{\Upsilon}(Y^*, -\nabla F(Y^*) + D^T V^*) \quad (52)$$

$$0_{3N} = -(L \otimes I_3) U^* - (L \otimes I_3) V^* + \mathfrak{S} - DY^* \quad (53)$$

$$0_{3N} = (L \otimes I_3) U^* \quad (54)$$

本文假设 \mathcal{G} 为强连通平衡图. 因此, 根据文献 [32] 中定理 6 可知, $1_N^T L = L 1_N = 0_N$. 进而根据式 (54), 可得

$$U^* = 1_N \otimes \mu^* \quad (55)$$

其中, $\mu^* \in \mathbf{R}^3$ 为所有 μ_{ij} 在平衡点时的值.

式 (53) 左乘 $1_N^T \otimes I_3$ 可以得到

$$(1_N^T \otimes I_3) \mathfrak{S} = (1_N^T \otimes I_3) DY^* \Rightarrow$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} D_{ij} y_{ij}^* = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} \mathfrak{S}_{ij} \quad (56)$$

根据文献 [34] 中引理 2.1, 式 (52) 意指

$$-F(y_{ij}^*) + D_{ij}^T \mu_{ij}^* \in c_{\Upsilon_{ij}}(y_{ij}^*), y_{ij}^* \in \Upsilon_{ij} \quad (57)$$

式 (55)~(57) 即为最优化问题 (36) 和 (37) 的最优性条件. 最优性条件详细参见文献 [35] 中定理 3.34. 基于上述分析可知, 算法 (44)~(46) 的平衡点即为最优点. 因此, 只要算法收敛, 收敛时的值即为最优解.

接下来, 我们进一步验证所提算法的收敛性.

为了便于分析, 采用如下坐标变换:

$$\mathcal{Y} := Y - Y^*, \theta := ([r, \mathcal{R}]^T \otimes I_3)\mathcal{Y}$$

$$\mathcal{U} := U - U^*, \zeta := ([r, \mathcal{R}]^T \otimes I_3)\mathcal{U}, e = \hat{\zeta} - \zeta$$

$$\mathcal{V} := V - V^*, \delta := ([r, \mathcal{R}]^T \otimes I_3)\mathcal{V}, f = \hat{\delta} - \delta$$

其中, θ , ζ 和 δ 表示新的变量; e 和 f 为定义的辅助变量; 为了便于收敛性分析, 我们进一步将这些变量分块表示为 $\theta = \text{col}(\theta_1, \theta_{2:N})$, $\zeta = \text{col}(\zeta_1, \zeta_{2:N})$, $\delta = \text{col}(\delta_1, \delta_{2:N})$, $e = \text{col}(e_1, e_{2:N})$ 和 $f = \text{col}(f_1, f_{2:N})$, $r = \frac{1}{\sqrt{N}}1_N$, $r^T \mathcal{R} = 0_N^T N^T$, $\mathcal{R} \mathcal{R}^T = I_N - \frac{1}{n}1_N 1_N^T$ 及 $\mathcal{R}^T \mathcal{R} = I_{N-1}$.

结合式 (43) 和动态方程 (44)~(46), 新变量下的状态方程可描述为

$$\dot{\theta}_1 = D^T(\zeta_1 + e_1) - (r^T \otimes I_3)\Omega \quad (58)$$

$$\dot{\theta}_{2:N} = D^T(\zeta_{2:N} + e_{2:N}) - (\mathcal{R}^T \otimes I_3)\Omega \quad (59)$$

$$\dot{\zeta}_1 = -\theta_1 \quad (60)$$

$$\dot{\zeta}_{2:N} = -D\theta_{2:N} - (\mathcal{R}^T L \mathcal{R} \otimes I_3)(\zeta_{2:N} + e_{2:N}) - (\mathcal{R}^T L \mathcal{R} \otimes I_3)(\delta_{2:N} + f_{2:N}) \quad (61)$$

$$\dot{\delta}_1 = 0 \quad (62)$$

$$\dot{\delta}_{2:N} = (\mathcal{R}^T L \mathcal{R} \otimes I_3)(\zeta_{2:N} + e_{2:N}) \quad (63)$$

其中, $\Omega = \nabla F(\mathcal{Y} + Y^*) - \nabla F(Y^*) - \Xi_Y(Y^*) + \Xi_Y(Y)$, $\Xi_Y(Y)$ 和 $\Xi_Y(Y^*)$ 分别为 $o_{ij}(y_{ij})\pi_{ij}(y_{ij})$ 和 $o_{ij}(y_{ij}^*)\pi_{ij}(y_{ij}^*)$ 的列向量形式, $\nabla F(\mathcal{Y} + Y^*) = F(Y)$, $\nabla F(Y^*)$ 表示 $F(y_{ij}^*)$ 的列向量形式.

构建如下李雅普诺夫函数

$$\begin{aligned} \mathbb{V} = & \frac{1}{2}h_1 (\|\theta\|^2 + \|\zeta\|^2 + \|\delta_{2:N}\|^2) + \\ & \frac{1}{2}h_2 (\|\delta_{2:N}\|^2 + \|\zeta_{2:N} + \delta_{2:N}\|^2) + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} z_{ij} \end{aligned} \quad (64)$$

根据所设计的触发函数 (48) 及其相应的触发策略, 可知 $\dot{x}_{ij} \leq 0$ 是恒成立的. 进而根据式 (47), 可以得

$$\dot{z}_{ij} \geq - \left(b_{1,ij} + \frac{b_{2,ij}}{b_{6,ij}} \right) z_{ij} \quad (65)$$

式 (65) 意指

$$z_{ij} \geq z_{ij}(t_0) e^{-\left(b_{1,ij} + \frac{b_{2,ij}}{b_{6,ij}}\right)t} > 0 \quad (66)$$

结合式 (66), 在强凸函数和强联通平衡图的假设条件下, \mathbb{V} 沿着轨迹 (47), (58)~(63) 的导数满足:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbb{V}} = & -h_1 \mathcal{Y}^T \Omega - \frac{1}{2}h_1 \zeta_{2:N}^T (\mathcal{R}^T \check{L} \mathcal{R} \otimes I_3) \zeta_{2:N} - \\ & h_2 (\zeta_{2:N}^T + \delta_{2:N}^T) D \theta_{2:N} + h_1 \theta^T D^T e - \\ & h_1 \zeta_{2:N}^T (\mathcal{R}^T \check{L} \mathcal{R} \otimes I_3) \left(\frac{1}{2} \zeta_{2:N} + e_{2:N} \right) + \\ & (h_1 + h_2) \delta_{2:N}^T (\mathcal{R}^T \check{L} \mathcal{R} \otimes I_3) e_{2:N} - \\ & h_2 \delta_{2:N}^T (\mathcal{R}^T \check{L} \mathcal{R} \otimes I_3) \left(\frac{1}{2} \delta_{2:N} + f_{2:N} \right) - \\ & (h_1 + h_2) \zeta_{2:N}^T (\mathcal{R}^T \check{L} \mathcal{R} \otimes I_3) f_{2:N} - \\ & \frac{1}{2} h_2 \delta_{2:N}^T (\mathcal{R}^T \check{L} \mathcal{R} \otimes I_3) \delta_{2:N} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} \dot{z}_{ij} \leq - \\ & \mathcal{Y}^T \bar{\varrho} \mathcal{Y} - \left(\frac{3}{8} h_1 \lambda_2 - \frac{1}{8} h_2 \lambda_2 - \frac{1}{2} \right) \zeta_{2:N}^T \zeta_{2:N} - \\ & \left(\frac{3}{8} h_2 \lambda_2 - \frac{1}{8} h_1 \lambda_2 - \frac{1}{2} \right) \delta_{2:N}^T \delta_{2:N} - \\ & \frac{1}{2} h_2 (V - V^*)^T (\check{L} \otimes I_3) (V - V^*) - \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\varrho_i} \left(b_{1,ij} - \frac{1 - b_{2,ij}}{b_{6,ij}} \right) z_{ij} < 0 \end{aligned} \quad (67)$$

其中, $\bar{\varrho} = \text{diag}\{h_1 \varrho_{ij} - h_2^2\}$. 根据李雅普诺夫稳定性定理 (详见文献 [36] 中定理 4.1), 动态系统 (44)~(47) 在所设计的触发条件下是收敛的.

2.4 奇诺行为分析

本节将从理论上验证本文所提方法可以有效避免奇诺 (Zeno) 行为的发生. 根据式 (45) 和式 (46), $\|(\hat{\mu}_{ij} - \mu_{ij})\|$ 和 $\|(\hat{v}_{ij} - v_{ij})\|$ 的右边导数分别满足:

$$\begin{aligned} \frac{d^+}{dt} \|(\hat{\mu}_{ij} - \mu_{ij})\| \leq & \left\| \sum_{\bar{i}\bar{j} \in \mathcal{N}_{ij}^+} a_{ij, \bar{i}\bar{j}} (\hat{\mu}_{ij} - \hat{\mu}_{\bar{i}\bar{j}}) \right\| + \\ & \left\| \sum_{\bar{i}\bar{j} \in \mathcal{N}_{ij}^+} a_{ij, \bar{i}\bar{j}} (\hat{v}_{ij} - \hat{v}_{\bar{i}\bar{j}}) \right\| + \|S_{ij} - D_{ij} y_{ij}\| = J_{ij, \mu} \end{aligned} \quad (68)$$

$$\frac{d^+}{dt} \|(\hat{v}_{ij} - v_{ij})\| \leq \left\| \sum_{\bar{i}\bar{j} \in \mathcal{N}_{ij}^+} a_{ij, \bar{i}\bar{j}} (\hat{\mu}_{ij} - \hat{\mu}_{\bar{i}\bar{j}}) \right\| = J_{ij, v} \quad (69)$$

基于上式可进一步得到

$$\begin{aligned} \|b_{4,ij}\| (\hat{\mu}_{ij} - \mu_{ij}) \|^2 + b_{5,ij} \|(\hat{v}_{ij} - v_{ij})\|^2 \leq \\ (b_{4,ij} J_{ij, \mu}^2 + b_{5,ij} J_{ij, v}^2) (t - t_{ij}^k)^2 \end{aligned} \quad (70)$$

结合式 (66) 和式 (70), 在下一次触发时刻 t_{ij}^{k+1} , 我们有

$$\begin{aligned} b_{6,ij} (b_{4,ij} J_{ij, \mu}^2 + b_{5,ij} J_{ij, v}^2) (t_{ij}^{k+1} - t_{ij}^k)^2 \geq \\ z_{ij}(t_0) e^{-\left(b_{1,ij} + \frac{b_{2,ij}}{b_{6,ij}}\right)t} \end{aligned} \quad (71)$$

根据式 (66) 及参数 $b_{4,ij}$, $b_{5,ij}$ 和 $b_{6,ij}$ 的定义, 易知 $t_{ij}^{k+1} - t_{ij}^k > 0$. 因此, 本文所提方法可避免奇诺行为.

3 仿真分析

为了验证所提方法的可行性和有效性, 本节在一个由 5 个能源体构成的综合能源测试系统上进行仿真分析. 系统结构如图 1 所述, 其来源于文献 [26]. 每个参与者的入度和出度均设置为 2, 随机生成一个有向的权重平衡图. 仿真系统中各个参数, 包括每一个参与者的成本函数或使用函数及相应约束限制等均与文献 [26] 完全相同, 在此不再赘述.

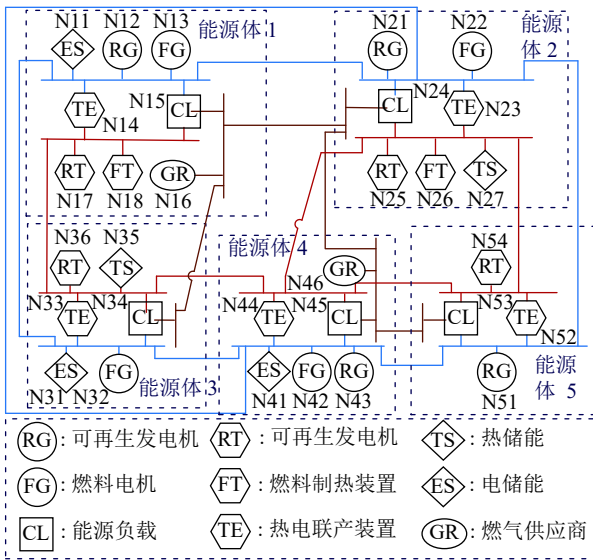


图 1 测试系统
Fig.1 Test system

不失一般性, 对于每一个参与者, 采用相同的触发参数, 并设置为 $b_{1,ij} = 0.5000$, $b_{2,ij} = 0.5000$, $b_{3,ij} = 1.4325$, $b_{4,ij} = 95.5632$, $b_{5,ij} = 93.4400$ 和 $b_{6,ij} = 1.2000$, $\forall ij \in V$. 此外, 本文在 MATLAB 环境下编写所提出算法的运行程序. 仿真中, 本文采用统一化能量标度. 对于电或者热, 令 1 p.u. = 1 MW; 对于燃气, 令 1 p.u. = 84 SCM/h; 对于价格, 令 1 p.u. = 1 \$/MWh. 能源体 1~5 中各能源负载的必须运行电、热和气的负载部分分别设置为 [150 (p.u.), 124 (p.u.), 50 (p.u.)], [105 (p.u.), 150 (p.u.), 60 (p.u.)], [85 (p.u.), 135 (p.u.), 80 (p.u.)], [100 (p.u.), 90 (p.u.), 50 (p.u.)] 和 [50 (p.u.), 140 (p.u.), 0 (p.u.)]. 此外, 所有参与者的外部辅助变量 z_{ij} 的初值均设置为 1. 其余变量的初值均设置为 0 (与文献 [26] 相同).

3.1 收敛性分析

执行本文所提出的算法后, 各个参与者预估的

电、热和气的价格, 能源生产/需求, 全局供需不平衡及事件触发的序列绘制于图 2~6 中. 从图 2 中可以发现, 电、热和气的三种能源的全局供需不匹配程度 (即全局的供需之差) 均逐渐收敛到零. 这一结果表明全局的供需已达到平衡. 图 3(a), 4(a) 和 5(a) 分别展示了每个参与者本地预估的电、热和气的市场成交价格, 也就是三维辅助变量 μ_{ij} 对应于每个维度分量的收敛结果. 可以发现, 电、热和气的三种能源预估的交易价格分别收敛到三个不同的值. 最终收敛值分别是 32.6884 (p.u.), 23.6611 (p.u.),

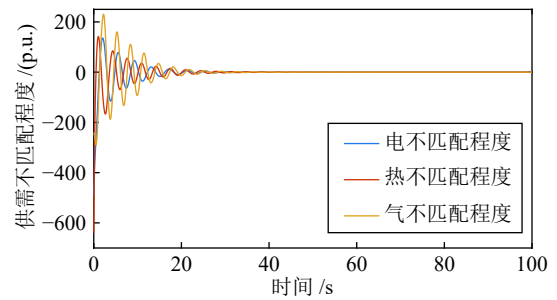
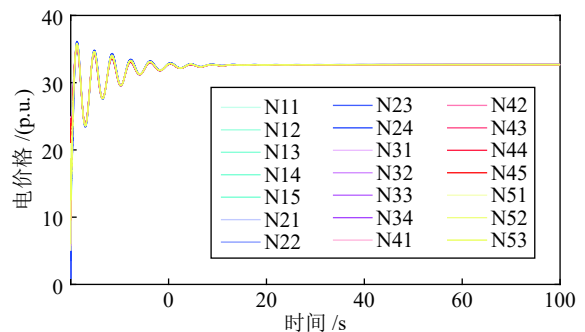
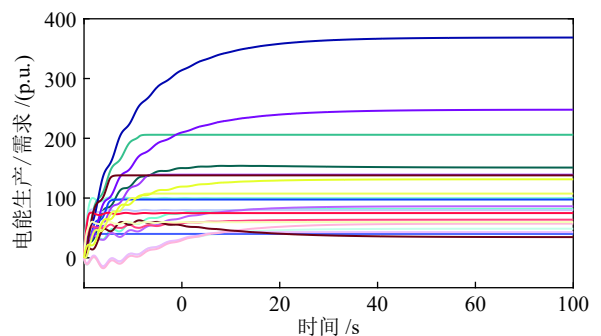


图 2 能源供需不匹配
Fig.2 Energy supply/demand mismatch



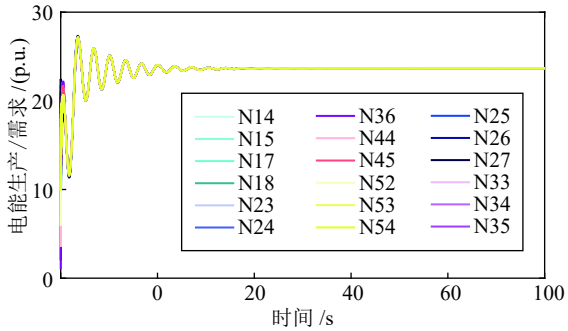
(a) 预估的气价
(a) Estimated gas price



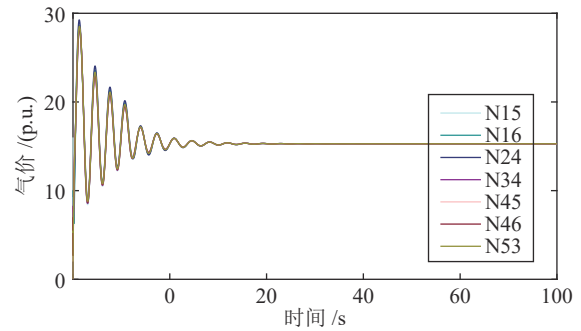
(b) 电输出/需求
(b) Power output/demand

图 3 与电相关的变量收敛轨迹

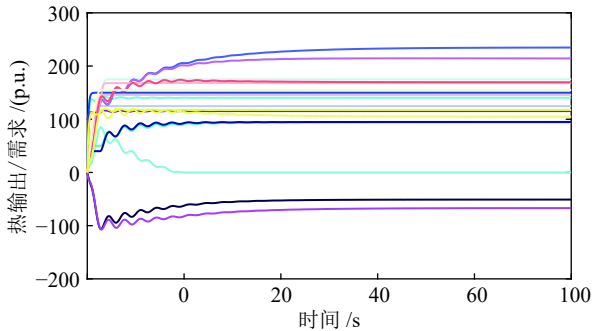
Fig.3 The convergence trajectories for the variables related to electricity power



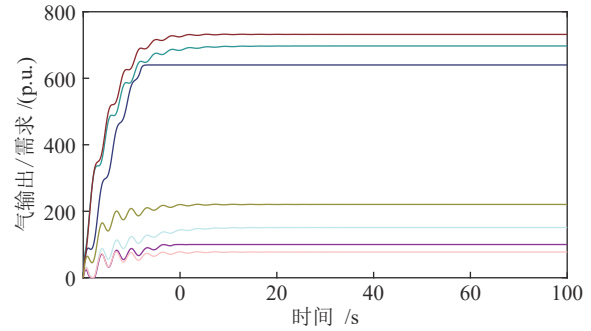
(a) 预估的热价
(a) Estimated heat price



(a) 预估的气价
(a) Estimated gas price



(b) 热输出/需求
(b) Heat output/demand



(b) 气输出/需求
(b) Gas output/demand

图 4 与热相关的变量收敛轨迹

Fig.4 The convergence trajectories for the variables related to heat

图 5 与气相关的变量收敛轨迹

Fig.5 The convergence trajectories for the variables related to gas

15.2825 (p.u.), 这一结果与文献 [26] 完全相同. 与此同时, 从图 3(b), 4(b) 和 5(b) 可以发现, 每个参与者本地预估的电、热和气的生产或需求也均收敛到相应的稳定状态. 上述结果表明, 采用本文所提算法, 可以使得每一个参与者逐步收敛到本地的最优运行点, 进而验证了理论结果的正确性.

此外, 由于采用的测试系统中参与者数量较多, 本文仅在图 6 中选取每个能源体中第 1 个参与者 (即编号 N11, N21, N31, N41 和 N51) 的事件触发时刻序列进行展示说明. 图中的每一个圆圈标记符号都代表一个事件触发时刻. 即在此时刻相应的参与者会向其邻居智能体发送它的状态信息. 仿真结果表明, 尽管本文采用的是连续时间优化算法, 但每个参与者可以在离散时刻进行通信. 因此, 可以极大地减少通信压力和通信成本. 更重要的是, 每个参与者采用的是一种异步通信的方式, 因此可以有效地避免周期通信中对于全局同步时钟的依赖.

3.2 多时段能源管理

本节主要验证所提算法在不同的调度时间段下运行的可行性和有效性. 仿真中假设在 $t_1 = 100$ s 时进入到下一个调度周期. 在这一调度周期下, 令

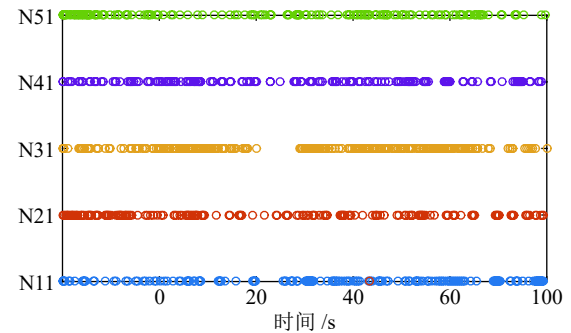


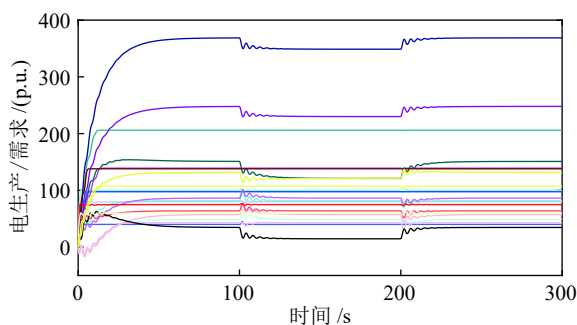
图 6 事件触发序列

Fig.6 Event-triggered instants

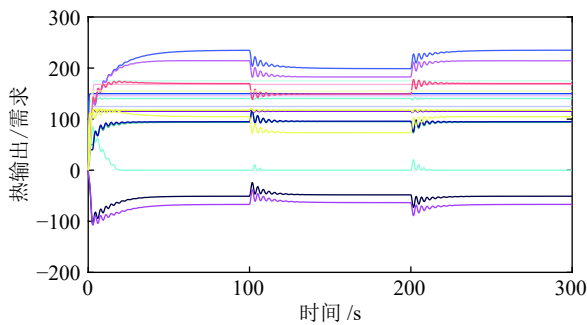
全部的必须运行负载增加 20%. 执行所提算法后的仿真结果如图 7 所示. 可以发现每个参与者可以自动的调整本地的输出或者需求来响应这一变化, 并收敛于新的稳定状态. 进而在 $t_2 = 200$ s 时再次进入下一个调度周期. 在此周期下, 我们令全部的必须运行负载减少 20%. 通过观察图 7 可以发现, 在新的调度周期下系统再次收敛到新的平衡状态. 上述仿真结果表明, 本文所提出方法可以自动的运行在不同的调度时段, 以响应系统随时间变化而发生的改变.

4 结论

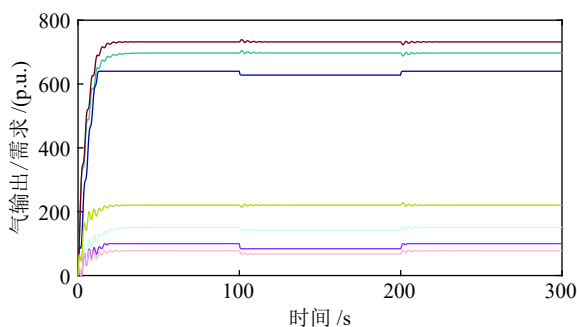
本文针对综合能源系统的协同能源管理问题展开研究. 通过设计外部辅助变量并嵌入事件触发通信策略, 本文提出了一种同时具有离散通信, 异步执行和分布式实施功能的分布式优化算法来实现多种能源网络中各参与者之间的协同优化调度. 所提出算法具有较强的灵活性, 隐私性和可大面积拓展性, 适用于实际系统应用. 最后, 本文将所提算法应用于一个由能源体组成的测试系统中进行仿真分析, 仿真结果表明所提算法可以收敛到全局最优解, 且各个参与者是以异步且离散通信方式进行信息交互, 验证了算法的可行性.



(a) 电输出/需求
(a) Power output/demand



(b) 热输出/需求
(b) Heat output/demand



(c) 气输出/需求
(c) Gas output/demand

图 7 能源输出/需求

Fig. 7 Energy output/demand

References

- 1 Yi Z K, Xu Y L, Gu W, Wu W C. A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, **11**(3): 1332–1346
- 2 Tang Hao, Liu Chang, Yang Ming, Tang Bi-Qiang, Xu Dan, Lv Kai. Learning-based optimization of active distribution system dispatch in industrial park considering the peak operation demand of power grid. *Acta Automatica Sinica*, 2019, DOI: 10.16383/j. aas. c190079 (唐昊, 刘畅, 杨明, 汤必强, 许丹, 吕凯. 考虑电网调峰需求的工业园区主动配电系统调度学习优化. *自动化学报*, 2019, DOI: 10.16383/j. aas. c190079)
- 3 Sun Qiu-Ye, Teng Fei, Zhang Hua-Guang. Energy internet and its key control issues. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(2): 176–194 (孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题. *自动化学报*, 2017, **43**(2): 176–194)
- 4 Sun Qiu-Ye, Hu Jing-Wei, Zhang Hua-Guang. Modeling and application of we-energy in energy internet. *Scientia Sinica Informationis*, 2018, **48**(10): 1409–1429 (孙秋野, 胡旌伟, 张化光. 能源互联网中自能源的建模与应用. *中国科学: 信息科学*, 2018, **48**(10): 1409–1429)
- 5 Jia Hong-Jie, Wang Dan, Xu Xian-Dong, Yu, Xiao-Dan. Research on some key problems related to integrated energy systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, **39**(7): 198–207 (贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 余晓丹. 区域综合能源系统若干问题研究. *电力系统自动化*, 2015, **39**(7): 198–207)
- 6 Ai Qian, Hao Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, **42**(4): 1–10 (艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战. *电力系统自动化*, 2018, **42**(4): 1–10)
- 7 Wang Rui, Sun Qiu-Ye, Ma Da-Zhong, Wang Bing-Yu. Modeling and stability analysis of distributed generation phase locked loop in microgrid. *Proceedings of the CSEE*, 2018, **38**(24): 7338–7348 (王睿, 孙秋野, 马大中, 王冰玉. 微网中分布式电源锁相环建模及其稳定性分析. *中国电机工程学报*, 2018, **42**(4): 1–10)
- 8 Lin C E, Viviani G L. Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984, (6): 1170–1175
- 9 Hemamalini S, Simon S P. Maclaurin series-based Lagrangian method for economic dispatch with valve-point effect. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2009, **3**(9): 859–871
- 10 Marty F, Serra S, Sochard S, Reneaume J M. Economic optimization of a combined heat and power plant: heat vs electricity. *Energy Procedia*, 2017, **116**: 138–151
- 11 Yin Shuang-Rui, Ai Qian, Zeng Shun-Qi, Wu Qiong, Hao Ran, Jiang Di. Challenges and prospects of multi-energy distributed optimization for energy internet. *Power System Technology*, 2018, **42**(5): 1–10 (殷爽睿, 艾芊, 曾顺奇, 吴琼, 郝然, 江迪. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望. *电网技术*, 2018, **42**(5): 1–10)
- 12 Huang B N, Li Y S, Zhang H G, Sun Q Y. Distributed optimal co-multi-microgrids energy management for energy internet. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(4): 357–364
- 13 Zhang Z, Chow M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, **27**(4): 1761–1768
- 14 Yang S P, Tan S C, Xu J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**(4): 4416–4426
- 15 Li F Y, Qin J H, Kang Y. Multi-agent system based distributed pattern search algorithm for non-convex economic load dispatch in smart grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, **34**(3): 2093–2102
- 16 Huang B N, Liu L N, Zhang H W, Li Y S, Sun, Q Y. Distributed optimal economic dispatch for microgrids considering communication delays. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, **49**(8): 1634–1642

- 17 Chen G, Zhao Z Y. Delay effects on consensus-based distributed economic dispatch algorithm in microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, **33**(1): 602–612
- 18 Li Q, Gao D W, Zhang H G, Wu Z P, Wang F Y. Consensus-based distributed economic dispatch control method in power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, **10**(1): 941–954
- 19 Jia Y B, Dong Z Y, Sun C Y, Meng K. Cooperation-based distributed economic MPC for economic load dispatch and load frequency control of interconnected power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, **34**(5): 3964–3966
- 20 Zhao C C, He J P, Cheng P, Chen J M. Analysis of consensus-based distributed economic dispatch under stealthy attacks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **64**(6): 5107–5117
- 21 Duan J, Chow M Y. A novel data integrity attack on consensus-based distributed energy management algorithm using local information. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(3): 1544–1553
- 22 Si Fang-Yuan, Wang Jin-Kuan, Han Ying-Hua, Zhao Qiang. Multilevel peer-to-peer co-optimization for cyber-physical intelligent energy systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(1): 84–97 (司方远, 汪晋宽, 韩英华, 赵强. 信息物理融合的智慧能源系统多级对等协同优化. *自动化学报*, 2019, **45**(1): 84–97)
- 23 Bai Yun-Xiao, Qian Feng, Liu Jun-Lei, Bao Wei, Shi Xia-Sheng. An initialization-free distributed algorithm for power dispatch problem. *Proceedings of the CSEE*, 2019, **39**(S1): 30–35 (白云霄, 钱峰, 刘俊磊, 鲍威, 时侠圣. 一种与初始态无关的分布式电力调度算法. *中国电机工程学报*, 2019, **39**(S1): 30–35)
- 24 Li C J, Yu X H, Yu W W, Huang T W, Liu Z W. Distributed event-triggered scheme for economic dispatch in smart grids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, **12**(4): 1775–1785
- 25 Zhao T, Li Z, Ding Z. Consensus-based distributed optimal energy management with less communication in a microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(6): 3356–3367
- 26 Zhang H G, Li Y S, Gao D W, Zhou J G. Distributed optimal energy management for energy internet. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(6): 3081–3097
- 27 Sun Q Y, Fan R Y, Li Y S, Huang B N, Ma D Z. A distributed double-consensus algorithm for residential we-energy. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(8): 4830–4842
- 28 Le X Y, Chen S J, Li F, Yan Z, Xi J T. Distribute neurodynamic optimization for energy internet management. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, **49**(8): 1624–1633
- 29 Yi Z K, Xu Y L, Hu J F, Chow M Y, Sun H B. Distributed neurodynamic-based approach for economic dispatch in an integrated energy system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, **16**(4): 2245–2257
- 30 Yang L, Xu Y L, Sun H B, Zhao X. Two-stage convexification based optimal electricity-gas flow. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, **11**(2): 1465–1475
- 31 Teng Fei, Shan Qi-He, Li Tie-Shan. Intelligent ship integrated energy system and its distributed optimal scheduling algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2020, DOI: 10.16383/j. aas. c20176 (滕菲, 单麒赫, 李铁山. 智能船舶综合能源系统及其分布式优化调度方法. *自动化学报*, 2020, DOI: 10.16383/j. aas. c20176)
- 32 Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(9): 1520–1533
- 33 Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*. New York: Cambridge University Press, 2004.
- 34 Yi P, Hong Y G, Liu F. Initialization-free distributed algorithms for optimal resource allocation with feasibility constraints and application to economic dispatch of power systems. *Automatica*, 2016, **74**: 259–269
- 35 Ruszczynski A P, Ruszczynski A. *Nonlinear Optimization*. Princeton University Press, 2006.
- 36 Khalil H K. *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice Hall, 2001.



李玉帅 美国丹佛大学电气与计算机工程系博士后研究员. 主要研究方向为分布式控制和优化, 机器学习及其在智能电网和能源互联中的应用.

E-mail: yushuaili@ieee.org

(LI Yu-Shuai Postdoctoral research scholar in the Department of Electrical and Computer Engineering, University of Denver, USA. His current research interest covers distributed control and optimization, machine learning with applications in smart grid and energy internet.)



李天义 丹麦奥尔堡大学计算机系博士研究生. 主要研究方向为轨迹压缩以及压缩数据的查询处理.

E-mail: tianyi@cs.aau.dk

(LI Tian-Yi Ph. D. candidate in the Department of Computer Science, Aalborg University, Denmark. Her current research interest covers trajectory compression and query processing over compressed data.)



高 炜 美国丹佛大学电气与计算机工程系博士研究生. 主要研究方向为微电网控制, 可再生能源, 电力系统稳定以及机器学习在电力系统中的应用. E-mail: wei.gao@du.edu

(GAO Wei Ph.D. candidate in the Department of Electrical and Computer Engineering, University of Denver, Denver, Colorado, USA. His research interest covers microgrid control, renewable energy, power system stability, and machine learning application in power system.)



高文忠 美国丹佛大学电气与计算机工程系教授. 主要研究方向为可再生能源和分布式发电, 微电网, 智能电网和电力系统保护. 本文通信作者.

E-mail: wenzhong.gao@du.edu

(GAO Wen-Zhong Professor in the Department of Electrical and Computer Engineering, University of Denver, Denver, Colorado, USA. His research interest covers renewable energy and distributed generation, microgrid, smart grid and power system protection. Corresponding author of this paper.)