

# 基于 Gossip 的综合能源系统分布式异步弹性经济调度策略

张赟宁<sup>1,2</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>, 付文龙<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 高以恒<sup>1</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北省 宜昌市 443002;

2. 湖北省微电网工程技术研究中心(三峡大学), 湖北省 宜昌市 443002)

## A Gossip-based Distributed Asynchronous Resilient Economic Dispatch Strategy for Integrated Energy Systems

ZHANG Yunning<sup>1,2</sup>, LI Pengfei<sup>1</sup>, FU Wenlong<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, GAO Yiheng<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei Province, China;

2. Hubei Microgrid Engineering Technology Research Center, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** In a distributed optimization framework for the economic dispatch problem of integrated energy systems (IESs), the topological design of the node collaboration mechanism is necessarily constrained by information interaction. Existing studies are mainly classified into two types of communication protocols, synchronous and asynchronous communication. However, synchronous communication requires timing consistency and waits for a synchronized response or acknowledgement to be received among the communicators before subsequent operations can be executed, which is challenging to achieve in large-scale network environments. In this paper, we propose a distributed economic scheduling algorithm for asynchronous communication, based on the Gossip algorithm, which leverages its asynchronous characteristics. The convergence of the algorithm is rigorously proved using matrix perturbation theory and the eigenvalue theorem. Further, two typical network attack models, Denial of Service (DoS) and False Data Injection (FDI), are considered, and a resilient security policy is designed to mitigate the impact of network attacks on optimal economic scheduling. Finally, an arithmetic case analysis is performed based on the IES of IEEE39-32 nodes, which verifies the effectiveness and superiority of the proposed strategy in terms of communication methods and network security from multiple perspectives by combining different scheduling scenarios, the performance of the attackers, and the comparison of synchronous communication methods.

**KEY WORDS:** integrated energy systems; economic dispatch; consensus algorithms; distributed optimization; asynchronous communication; Gossip algorithm; cyber attack

**摘要:** 在综合能源系统(Integrated energy systems, IESs)经济调度问题的分布式优化框架中,节点协同机制的拓扑设计必然受到信息交互方式的约束。现有研究主要分为两类通信协议、同步通信和异步通信。然而,同步通信需要满足时序一致性,等待各通信者之间达成同步响应或确认后才能执行后续操作,这在大规模网络环境中很难实现。该文首先基于 Gossip 算法的异步特点,提出了一种基于 Gossip 的异步通信分布式经济调度算法。利用矩阵扰动理论和特征值定理,严格证明了算法的收敛性。进一步地,考虑了两种典型的网络攻击模型,拒绝服务攻击(denial of service, DoS)和虚假数据攻击(false data injection, FDI),设计了一种弹性安全策略以缓解网络攻击对最优经济调度的影响。最后,基于 IEEE39-32 节点的 IES 进行算例分析,结合不同的调度场景、攻击者的表现以及同步通信方式的对比,从多个角度验证了所提策略在通信方式和网络安全方面的有效性和优越性。

**关键词:** 综合能源系统; 经济调度; 一致性算法; 分布式优化; 异步通信; Gossip 算法; 网络攻击

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0296

## 0 引言

随着环境污染和能源危机的加剧,综合能源系统(integrated energy systems, IESs)作为可以提高能源效率和减少对化石能源依赖的有效解决方案<sup>[1]</sup>,引起了全球能源领域科研学者的高度重视<sup>[2-5]</sup>。IESs 实现了物理能源系统与网络通信技术的高度融合。本质上,这是一个利用尖端网络信息技术和创新运

基金项目: 国家自然科学基金项目(62233006)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (62233006).

营管理模式的综合能源系统<sup>[6-7]</sup>。它将区域内的电能和热能整合,通过能源耦合设备,实现不同能源子网络间的优化运行和协同控制。在满足用户多元化能源需求的同时,显著提高了能源转换效率,推动了能源的可持续发展<sup>[8]</sup>。

经济调度(economic dispatch, ED)作为 IESs 中最重要的优化问题之一,近年来受到广泛关注<sup>[9-11]</sup>。经济调度的主要目标是在实际物理约束下,通过调节所有分布式能源机组的功率输出,以实现供需平衡和最小发电成本。当前能源调度研究呈现范式转移特征,研究者针对 IES 的经济调度问题(economic dispatch problem, EDP),提出了基于凸优化的集中式求解器与分布式协议两类范式。集中式方法在求解效率上具有一定的优势。然而,这类方法存在通信成本高<sup>[12]</sup>、计算可扩展性差<sup>[13]</sup>、保密性差<sup>[14]</sup>等问题。而分布式方法完全避免了对核心领导者的依赖,从而减轻通信负担,增强系统的可扩展性和隐私性<sup>[15-16]</sup>。因此,分布式算法得到了大量的关注<sup>[17-19]</sup>。

与传统的社会供电和供热系统类似,在 IESs 的运行过程中,人们最为关注的核心问题之一是如何实现系统的最优 ED。具体而言,就是在确保系统安全性约束的前提下,优化协调多种能源机组的出力分配,从而在经济成本最低的情况下,实现系统运行的安全性和经济性。然而,在实际应用中,由于 IESs 简单的通信链路结构和部署在开放环境中的代理之间的实时信息交换要求,IESs 中的节点和通信链路更容易遭受网络攻击的威胁。因此,越来越多的学者针对网络攻击下的 IESs 调度问题展开了研究。在现有的分布式调度工作中,网络攻击的研究可以大致分为两类,即拒绝服务攻击(denial of service, DoS)和虚假数据攻击(false data injection, FDI)。DoS 攻击通常是通过分组丢失或其他方法破坏多代理网络的数据可用性,并且即使在不知道系统的详细信息的情况下也可以发起<sup>[20]</sup>。文献[20]研究了 DoS 攻击下有无领导者的一致性问题,如果通信图是连通的,且最大攻击持续时间有界,则保证输出一致性。文献[21]通过穷举法制定了一种 DoS 最优攻击策略,使得系统的经济损失达到阈值。与 DoS 攻击相比,FDI 攻击更难检测,并严重影响数据的真实性<sup>[22]</sup>。文献[22]提出了一种新型分布式弹性控制方法,以缓解 FDI 攻击对需求响应的影响。文献[23]设计了一种新型组合攻击方法,同时考虑了 DoS 和 FDI 攻击对 IES 经济亏损最大化。文献[24]提出了一种具有鲁棒性的分布式经济调度策略来应对共谋攻击对 IES 通信链路的威胁。

值得注意的是,同步通信是所有上述算法的核心要求之一。同步通信方式,即在相同时钟信号的控制下接收和发送数据,允许系统中两个变量的快速和一致收敛,并且它要求所有参与者同时相互通信,这可能受到功率预算的限制,并且所有节点可能不会同时通信<sup>[25]</sup>。所以,同步通信在大规模网络环境中很难实现。相比之下,异步通信方式独立于特定的网络配置,并且不需要代理的同步,从而能够解除全局时钟同步的约束,减少通信延迟<sup>[26]</sup>。基于 Gossip 的分布式算法<sup>[25]</sup>被引入来解决智能电网中的 EDP,因为 Gossip 算法依赖于泊松分布过程和迭代期间速率为 1 的时钟,并且在每个迭代时隙只有两个节点交换它们的信息,所以它可以打破全局同步时钟的规则实现异步通信。

通过上述分析不难发现,现有的大多数研究均是将 IESs 中的网络攻击问题或通信方式分开考虑,极少有研究探讨在 IESs 经济调度背景下同时考虑网络攻击和通信方式问题的情况。受文献[25]的启发,本文提出了一种基于 Gossip 的异步通信分布式经济调度算法(Gossip-based distributed economic dispatch algorithm over asynchronous communication, GDEDAAC),并运用矩阵扰动理论和特征值定理,证明了 GDEDAAC 算法能以概率 1 收敛到 EDP 的最优解。相比文献[25]中的算法,本文所提算法增加了电热耦合特性向量,并将 Gossip 算法扩展到了两个一致性变量上,从而适用于 IESs 异步通信。在此基础上,本文设计了一种弹性安全策略,以缓解 DoS 和 FDI 组合攻击对 IESs 的经济调度的影响。最后,基于 IEEE39-32 节点的 IES 通信拓扑进行算例分析,从多个角度验证了本文所提策略的有效性和优越性。

## 1 IESs 结构及问题描述

### 1.1 IESs 结构

如图 1 所示,IESs 主要由物理层和通信层构成,它们分别承担不同但互补的功能,共同确保系统的高效运行和能源的最优调度。

在 IESs 中,物理层是 IESs 的基础,它包括所有实际的能源生产、传输和转换设备。这一层不仅涵盖电力系统设备,还涉及热能和其他形式的能源管理设备,主要可以分为以下 3 类:电力设备(power-only device, PODs)、热力设备(heat-only device, HODs)和热电联产设备(combined heat and power device, CHPs);而通信层负责整个综合能源系统的信息传输和管理,支持各种在线应用,如动

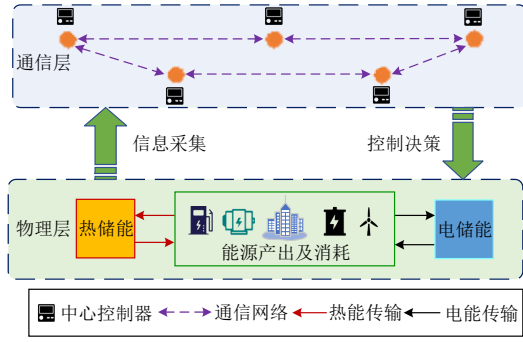


图1 IESs 的分布式架构

Fig. 1 Distributed architecture of IESs

态监控、故障诊断、经济调度、网络安全和隐私保护等。综合能源系统的分布式结构确保了多种形式能源的协同调度，从而实现能源的高效、可靠和可持续供应。

## 1.2 IESs 经济调度问题

IES 经济调度问题的本质是在遵循运行规范与安全边界的双重约束下，实现设备群运行成本的最小化。该问题的成本模型整合了多能源设备的成本参数，形成复合型目标函数。EDP 的具体目标函数为

$$\min J = J_p + J_c + J_h = \sum_{i \in \Omega_p} C_i^p(p_i^p) + \sum_{i \in \Omega_c} C_i^c(p_i^c, h_i^c) + \sum_{i \in \Omega_h} C_i^h(h_i^h) \quad (1)$$

式中：\$J\$ 为总运行成本；\$J\_p\$、\$J\_c\$、\$J\_h\$ 分别是总的 POD、CHP 和 HOD 的成本函数；\$C\_i^p\$ 是第 \$i\$ 个 POD 的成本函数；\$C\_i^c\$ 是第 \$i\$ 台 CHP 的成本函数；\$C\_i^h\$ 是第 \$i\$ 个 HOD 的成本函数；\$p\_i^p\$、\$p\_i^c\$、\$h\_i^c\$ 和 \$h\_i^h\$ 分别是第 \$i\$ 个 POD 的发电量、第 \$i\$ 个 CHP 的发电量、第 \$i\$ 个 CHP 的发热量和第 \$i\$ 个 HOD 的发热量；\$\Omega\_p\$、\$\Omega\_c\$ 和 \$\Omega\_h\$ 分别是 POD、CHP 和 HOD 的集合。

3 类设备的成本函数可以进一步表示为二次凸函数<sup>[24]</sup>：

$$C_i^p(p_i^p) = \alpha_i (p_i^p)^2 + \beta_i p_i^p + \phi \quad (2)$$

$$C_i^c(p_i^c, h_i^c) = \alpha_i (p_i^c)^2 + \beta_i p_i^c + \theta_i (h_i^c)^2 + \delta_i h_i^c + \varepsilon_i p_i^c h_i^c \quad (3)$$

$$C_i^h(h_i^h) = \alpha_i (h_i^h)^2 + \beta_i h_i^h + \phi \quad (4)$$

式中：\$\alpha\_i\$、\$\beta\_i\$、\$\phi\$、\$\theta\_i\$、\$\delta\_i\$ 和 \$\varepsilon\_i\$ 是各能源设备的成本系数。

根据实际运行规范与安全边界 EDP 具体约束条件表示如下。

1) 电功率及热功率供需平衡约束。

$$\Delta P = \sum_{i \in \Omega} P_{d,i} - \sum_{i \in \Omega_p} p_i^p - \sum_{i \in \Omega_c} p_i^c = 0 \quad (5)$$

$$\Delta H = \sum_{i \in \Omega} H_{d,i} - \sum_{i \in \Omega_c} h_i^h - \sum_{i \in \Omega_h} h_i^c = 0 \quad (6)$$

式中：\$\Delta P\$ 和 \$\Delta H\$ 分别表示总的电功率偏差和热功

率偏差；\$P\_{d,i}\$ 和 \$H\_{d,i}\$ 分别为第 \$i\$ 个节点的局部电功率需求和局部热功率需求。

2) 能源设备输出限制约束。

$$\underline{p}_i^p \leq p_i^p \leq \bar{p}_i^p \quad (7)$$

$$\underline{h}_i^h \leq h_i^h \leq \bar{h}_i^h \quad (8)$$

式中：\$\underline{p}\_i^p\$ 和 \$\bar{p}\_i^p\$ 分别表示第 \$i\$ 个 POD 的最小和最大功率容量限制；\$\underline{h}\_i^h\$ 和 \$\bar{h}\_i^h\$ 分别表示第 \$i\$ 个 HOD 的最小和最大功率容量限制。

3) 物理输出限制约束。

$$\underline{p}_{l,\text{line}} \leq p_{l,\text{line}} \leq \bar{p}_{l,\text{line}} \quad (9)$$

$$\underline{h}_{l,\text{line}} \leq h_{l,\text{line}} \leq \bar{h}_{l,\text{line}} \quad (10)$$

式中：\$l \in \Omega\_l\$，\$\Omega\_l\$ 表示一组物理传输线路；\$\underline{p}\_{l,\text{line}}\$ 和 \$\bar{p}\_{l,\text{line}}\$ 分别表示电力传输线的最小和最大功率限制；\$\underline{h}\_{l,\text{line}}\$ 和 \$\bar{h}\_{l,\text{line}}\$ 分别表示热力传输线的最小和最大功率限制。

4) CHP 电热集成可操作域约束。

$$\underline{p}_i^c(h_i^c) \leq p_i^c \leq \bar{p}_i^c(h_i^c) \quad (11)$$

$$\underline{h}_i^c(p_i^c) \leq h_i^c \leq \bar{h}_i^c(p_i^c) \quad (12)$$

式中：\$\underline{p}\_i^c(h\_i^c)\$，\$\bar{p}\_i^c(h\_i^c)\$，\$\underline{h}\_i^c(p\_i^c)\$ 和 \$\bar{h}\_i^c(p\_i^c)\$ 分别以线性不等式约束的形式确定 CHP 的可操作域。

总的 EDP 归纳为式(1)–(12)。上述 EDP 可用拉格朗日乘子法分析<sup>[24]</sup>，具体的拉格朗日函数可以构造如下：

$$L = J + \lambda_p \Delta P + \lambda_h \Delta H \quad (13)$$

式中：\$\lambda\_p\$ 和 \$\lambda\_h\$ 分别为对应于 EDP 中约束条件(5)和(6)的拉格朗日乘子。IES 的最优可操作点根据 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件确定(参见附录 A)，从附录 A 可知 \$\lambda\_p\$ 等于电功率增量成本(incremental cost, IC)，\$\lambda\_h\$ 等于热功率增量成本。后文直接使用 \$\lambda\_p\$ 和 \$\lambda\_h\$ 分别表示电功率 IC 和热功率 IC，\$\lambda^\*\$ 表示最优 IC。

## 1.3 Gossip 算法

1) 通信网络模型。假设 IES 的通信网络中有 \$n\$ 个具有一定通信范围的节点。将 \$G=(v, \varepsilon)\$ 定义为 IES 的通信拓扑。\$v\$ 是节点集；\$\varepsilon\$ 是网络中的边集，即通信链路集。通信链路 \$(i, j) \in \varepsilon\$ 表示节点 \$i\$ 和 \$j\$ 可以相互通信。

**定义 1：** 对于一个图 \$G=(v, \varepsilon)\$，如果图中的每一对不同节点 \$i\$ 和 \$j\$ 都至少通过一条边，但不要求全部通过一条边相连，那么这样的图称为连通图。

2) 异步时间模型。本文使用标准的异步时间模型<sup>[27]</sup>。该模型中，每个节点都有一个独立的时钟，

所有时钟都以速率为1的泊松过程滴答作响<sup>[27]</sup>。时钟的滴答时间呈指数分布，独立于节点，并随时间变化。下文变量  $k \in \{1, 2, \dots\}$  用于表示全局时钟滴答，其中每个滴答代表系统的一次状态迭代。

3) 异步更新规则。假设在迭代过程开始之前所有节点处于静默态。在每次迭代或时钟滴答时，根据泊松过程使得一个主节点及其邻居节点处于活跃态，并且这两个节点执行信息交互，则这两个节点之间的边  $(i, j) \in \varepsilon$  处于活跃态的概率<sup>[27]</sup>为  $P_{ij} \in (0, 1)$ ，这两个节点的迭代过程如式(14)所示：

$$\begin{cases} \lambda(k+1) = W\lambda(k) \\ W_{ij} = I - \frac{1}{2}(e_i - e_j)(e_i - e_j)^T \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\lambda(k)$ 表示所有设备在第 $k$ 次迭代时的IC向量； $W$ 为系统矩阵，存在 $1/n[P_{ij}]$ (即第 $i$ 个节点时钟触发的概率为 $1/n$ ，且其选择与节点 $j$ 通信的概率为 $P_{ij}$ )的概率 $W$ 等于 $W_{ij}$ ； $e_i$ 是第 $i$ 个元素为1其他元素为0的列向量； $I$ 为单位矩阵。

## 2 基于Gossip的异步通信分布式算法

根据公式(1)–(12)求解EDP的传统同步通信方式下的分布式一致性算法<sup>[24]</sup>为

$$\begin{cases} \lambda(k+1) = M\lambda(k) + oy(k) \\ x(k+1) = Z\lambda(k+1) + B(p^C, h^C) \\ y(k+1) = Ny(k) - (x(k+1) - x(k)) \end{cases} \quad (15)$$

式中： $x$ 是 $p^P$ 、 $p^C$ 、 $h^C$ 和 $h^H$ 的集合，表示能源设备的功率输出； $y$ 是能源设备的局部功率偏差； $M$ 和 $N$ 是一致性更新权值，由连通图的通信链路连接方式所决定； $o$ 是一个大于0且足够小的收敛因子； $Z$ 是由成本系数所决定的分块矩阵； $B(p^C, h^C)$ 是IES中表示电热耦合特性的向量。

受文献[25]的启发，本文提出了一种基于Gossip的异步通信方式下的分布式经济调度算法，其主要思想是通过Gossip算法的异步时间特性和随机性使得一致性算法能够适用于异步通信。基于Gossip算法传统的分布式一致性算法可以重写为

$$\begin{cases} \lambda(k+1) = W_{ij}\lambda(k) + \eta D_{ij}y(k) \\ x(k+1) = Z\lambda(k+1) + B(p^C, h^C) \\ y(k+1) = W_{ij}y(k) - (x(k+1) - x(k)) \end{cases} \quad (16)$$

式中： $D_{ij} = e_i e_i^T + e_j e_j^T$ ；矩阵 $Z = [z_{ij}]_{n_a \times n_a}$ 由成本系数所决定； $\eta$ 是一个不同于 $o$ 大于0且足够小的收敛因子； $n_a$ 满足 $n_a = n_p + 2n_c + n_h$ ，其中 $n_p$ 、 $n_c$ 和 $n_h$ 分别表示POD、CHP和HOD的设备数。由式(16)描述的复合系统可以重新表述为

$$\begin{bmatrix} \lambda(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = M(k) \begin{bmatrix} \lambda(k) \\ y(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta B(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中： $\Delta B(k) = [0 \ \Delta p^C(k) \ \Delta h^C(k) \ 0]^T$ 是一个时变向量； $M(k)$ 可以写成以下分块矩阵

$$M(k) = \begin{bmatrix} W_{ij} & \eta D_{ij} \\ Z(I - W_{ij}) & W_{ij} - \eta D_{ij} Z \end{bmatrix} \quad (18)$$

考虑设备实际运行情况以及公式(5)–(12)所述约束条件，IC和功率输出的初始值可以设置为可行范围内的任意值以满足操作约束，并且局部功率偏差的初始值设置为0。 $\lambda_i$ 和 $y_i$ 的初值条件如下所示：

$$\begin{cases} \lambda_{i,p}^P(0) = 2\alpha_i(p_i^P(0)) + \beta_i, i \in \Omega_p \\ \lambda_{i,p}^C(0) = 2\alpha_i(p_i^C(0)) + \beta_i + \varepsilon_i(h_i^C(0)), i \in \Omega_c \\ \lambda_{i,h}^C(0) = 2\theta_i(h_i^C(0)) + \delta_i + \varepsilon_i(p_i^C(0)), i \in \Omega_c \\ \lambda_{i,h}^H(0) = 2\alpha_i(h_i^H(0)) + \beta_i, i \in \Omega_h \\ y_{i,p}^P(0) = y_{i,p}^C(0) = y_{i,h}^C(0) = y_{i,h}^H(0) = 0, i \in \Omega \end{cases} \quad (19)$$

式中： $\lambda_{i,p}^P(0)$ 和 $\lambda_{i,p}^C(0)$ 分别表示第 $i$ 个POD和CHP的电功率增量成本初始值； $\lambda_{i,h}^C(0)$ 和 $\lambda_{i,h}^H(0)$ 分别表示第 $i$ 个CHP和HOD的热功率增量成本初始值； $y_{i,p}^P(0)$ 和 $y_{i,p}^C(0)$ 分别表示第 $i$ 个POD和CHP的局部电功率偏差初始值； $y_{i,h}^C(0)$ 和 $y_{i,h}^H(0)$ 分别表示第 $i$ 个CHP和HOD的局部热功率偏差初始值。

从Gossip算法的特点来看，状态变量 $[\lambda(k) \ y(k)]^T$ 是一个随机向量，算法的收敛性必须使用概率术语来解释。

**引理1**<sup>[28]</sup>：对于马尔可夫线性跳变系统，如果它能够实现一致性，则认为它能够达到几乎确定的一致性。

**定理1**：考虑满足初始条件(19)的GDEDAAC算法，如果通信网络 $G = (v, \varepsilon)$ 是强连通的，则存在足够小的 $\eta$ ，使得GDEDAAC算法以概率1收敛到最优解。

下面使用文献[24]中的特征值扰动方法来分析GDEDAAC算法的收敛性质，由于IES的电热耦合特性，证明过程可分为两种情况进行讨论。

**证明**： $M(k)_0$ 和 $F(k)$ 分别记作以下分块矩阵

$$M_0(k) = \begin{bmatrix} W_{ij} & 0 \\ Z(I - W_{ij}) & W_{ij} \end{bmatrix}, F(k) = \begin{bmatrix} 0 & D_{ij} \\ 0 & -ZD_{ij} \end{bmatrix}$$

因此可以得到 $M(k) = M_0(k) + \eta F(k)$ 。

1) 当不考虑 $\Delta B(k)$ 时，根据矩阵扰动理论<sup>[19]</sup>，矩阵 $M(k)$ 可以视作受 $\eta F(k)$ 扰动的矩阵 $M_0(k)$ 。由文献[25]可知 $E(W_{ij})$ 是非负矩阵且满足 $E(W_{ij})\mathbf{1} = \mathbf{1}$ ，其中 $E(\bullet)$ 表示对 $\bullet$ 求数学期望； $\mathbf{1}$ 是

所有元素都为 1 的列向量。因此 1 是  $E(W_{ij})$  的简单特征值, 其他特征值的模量小于 1。对矩阵  $M(k)$  求期望可得

$$E(M(k)) = E\left(\begin{bmatrix} W_{ij} & 0 \\ Z(I - W_{ij}) & W_{ij} \end{bmatrix}\right) + \eta E\left(\begin{bmatrix} 0 & D_{ij} \\ 0 & -ZD_{ij} \end{bmatrix}\right) = E(M_0(k)) + \eta E(F)$$

所以  $E(M_0(k))$  的特征值满足  $1 = \ell_1 = \ell_2 \geq \ell_3 | \dots \geq |\ell_{2n_a}|$ ,  $E(M_0(k))$  存在两个确定的特征值  $\ell_1 = \ell_2 = 1$ , 其他特征值则位于复平面上的开单位圆内。定义  $\omega^T$  为矩阵  $W_{ij}$  对应特征值 1 的单位左特征向量,  $\psi$  为对应特征值为 1 的矩阵  $W_{ij}$  的单位右特征向量。

假设  $u_i^T$  和  $v_i$  是对应特征值  $\ell_i$  的矩阵  $E(M_0(k))$  的左右特征向量,  $i = 1, 2, \dots, 2n_a$ , 并且它们满足

$$\begin{cases} u_i^T E(M_0(k)) = \ell_i u_i^T, E(M_0(k)) v_i = \ell_i v_i \\ u_i^T v_i = 1, u_i^T v_j = 0 \end{cases} \quad (20)$$

将  $u_1$  和  $u_2$  代入等式 (20) 可以得到  $u_1^T = [1^T Z \quad 1^T]$ ,  $u_2^T = [\omega^T \quad 0^T]$ , 且  $u_1^T, u_2^T$  是  $E(M_0(k))$  对应于  $\ell_1 = \ell_2 = 1$  的左特征向量, 相似地, 可以得到  $v_1 = [0^T \quad \psi^T]^T$ ,  $v_2 = [1^T \quad -a\psi^T]^T$ , 且  $v_1, v_2$  是  $E(M_0(k))$  对应于  $\ell_1 = \ell_2 = 1$  的右特征向量, 其中  $a = \sum_{i \in \Omega} Z_{ii}$ ,  $Z_{ii}$  与成本系数有关。

此处定义两个矩阵  $U^T$  和  $V$ , 具体表达如下所示:

$$U^T = [u_1 \quad u_2]^T = \begin{bmatrix} 1^T Z & 1^T \\ \omega^T & 0^T \end{bmatrix}, V = [v_1 \quad v_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \psi & -a\psi \end{bmatrix}$$

矩阵  $M(k)$  的特征值可以视为受  $\eta F(k)$  扰动的  $M_0(k)$  的特征值。根据特征值求导理论, 每个特征值  $\ell_i$  对于  $\eta$  的导数可表示为  $\partial \ell_i / \partial \eta = u_i^T [\partial M(k) / \partial \eta] v_i$ , 因此特征值  $\ell_1 = \ell_2 = 1$  受扰动影响的变化量可以定量地表示为矩阵  $U^T F(k) V$  的特征值, 具体如下:

$$U^T F(k) V = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \omega^T D_{ij} \psi & -a\omega^T D_{ij} \psi \end{bmatrix}$$

所以矩阵  $U^T F(k) V$  的特征值为 0 和  $-a\omega^T D_{ij} \psi$ 。进一步地, 可以得到

$$\partial \ell_1 / \partial \eta = 0, \partial \ell_2 / \partial \eta = -a\omega^T D_{ij} \psi < 0$$

这意味着  $\ell_1$  不随  $\eta$  的改变而改变,  $\ell_2$  随着  $\eta$  的增加而变小, 即  $\ell_2$  会朝着单位圆的中心移动。设  $b_1$  是  $\eta$  的上界, 当  $0 < \eta < b_1$  时有  $\ell_2 < 1$ 。由于  $E(M(k))$  的剩余特征值取决于  $\eta$ , 所以  $\eta$  存在另一个上界  $b_2$  使得当  $0 < \eta < b_2$  时有  $\ell_i < 1$ 。因此, 当选择一个满足条件  $\eta < \min(b_1, b_2)$  的  $\eta$  时,  $E(M(k))$  有一个模为 1 的特征值, 其他特征值均位于复平面中的单位圆

内。此外, 根据特征值和特征向量之间的关系, 可以得到矩阵  $E(M(k))$  对应于特征值 1 的独立特征向量为  $\xi_1 = c_1 [1 \ 0]$  和  $\xi_2 = c_2 [0 \ 1]$ 。这意味着

$$\begin{cases} \lim_{k \rightarrow \infty} [\lambda_{i,p}^p, \lambda_{i,p}^c, \lambda_{i,h}^c, \lambda_{i,h}^h]^T = [c_1 \ c_1 \ c_2 \ c_2]^T \\ \lim_{k \rightarrow \infty} [y_{i,p}^p, y_{i,p}^c, y_{i,h}^c, y_{i,h}^h]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{cases}$$

即电 IC 和热 IC 分别收敛至  $c_1, c_2$ , 系统的局部功率偏差全部收敛至 0。

2) 当考虑  $\Delta B(k)$  时, 定义  $z(k) = [\lambda(k)^T \ y(k)^T]^T$  和  $w(k) = [0^T \ \Delta B^T(k)]^T$ , 根据文献[24]可得

$$E(z(k+1)) = E(M)z(k) + w(k) =$$

$$\prod_{\varphi=0}^k E(M(k-\varphi))z(0) + \sum_{\varphi=1}^{k+1} (\prod_{u=\varphi}^k E(M(u)))w(\varphi-1),$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \prod_{\varphi=0}^k E(M(k-\varphi))z(0) = \xi_1 + \xi_2 = c_1 e_1 + c_2 e_2$$

由于向量  $\Delta B(k)$  满足  $\sum_{k=0}^{\infty} |\Delta B(k)| \leq \rho^{[24]}$ , 其中  $\rho$  为常数约束, 可得

$$\sum_{\varphi=1}^{k+1} (\prod_{u=\varphi}^k E(M(u)))w(\varphi-1) = c_3 e_1 + c_4 e_2$$

以上  $c_1, c_2, c_3, c_4$  均为常数, 于是有

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E(z(k+1)) = \lim_{k \rightarrow \infty} \prod_{\varphi=0}^k E(M(k-\varphi))z(0) + \sum_{\varphi=1}^{k+1} (\prod_{u=\varphi}^k E(M(u)))w(\varphi-1) = \chi_1 e_1 + \chi_2 e_2$$

其中  $\chi_1, \chi_2$  为常数。这意味着考虑电热耦合后, 仍然存在

$$\begin{cases} \lim_{k \rightarrow \infty} [\lambda_{i,p}^p, \lambda_{i,p}^c, \lambda_{i,h}^c, \lambda_{i,h}^h]^T = [\chi_1 \ \chi_1 \ \chi_2 \ \chi_2]^T \\ \lim_{k \rightarrow \infty} [y_{i,p}^p, y_{i,p}^c, y_{i,h}^c, y_{i,h}^h]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{cases}$$

即电 IC 和热 IC 分别收敛至  $\chi_1, \chi_2$ , 系统的局部功率偏差全部收敛至 0。

综合上述分析, GDEDAAC 满足 KKT 最优性条件且  $\lambda$  和  $y$  能够达到一致性, 系统满足供需平衡。从马尔可夫线性跳变系统的定义来看<sup>[28]</sup>, 公式(17)是一个离散时间马尔可夫线性跳变系统。因此, 根据引理 1, 当  $G = (v, \varepsilon)$  是强连通的且  $\eta$  足够小, 满足公式(19)所述初值条件的 GDEDAAC 算法可以实现几乎确定的一致性, 即以概率 1 收敛到最优解。

注 1: 与同步通信方式相比, 异步通信在每次迭代中只有一条通信线路是活动的, 处于静默态线路上的节点的状态保持不变。在此迭代期间, 其他通信线路上的通信故障或网络攻击不会影响系统的收敛。

### 3 网络攻击下的经济调度

本节设计了一种基于共识的弹性安全策略以缓解 IES 分布式经济调度过程中的 DoS 和 FDI 的组合攻击, 最终结果能够实现供需平衡并获得可接受

的次优解。

### 3.1 网络攻击模型

本文考虑网络攻击形式中典型的 FDI 和 DoS 攻击。从式(16)可以看出,  $\lambda(k)$  和  $y(k)$  需要在迭代过程中广播信息。在广播过程中, DoS 攻击会干扰信息的正常传递, 影响算法最终的一致收敛。同样的, FDI 攻击可以劫持节点并在迭代过程中注入虚假信息, 从而破坏算法的收敛性。

1) FDI 攻击。攻击者可以劫持节点, 并将虚假数据注入节点的状态变量中。在与相邻节点交互的 FDI 攻击下, 系统的状态变量  $\lambda(k)$  和  $y(k)$  可以建模为

$$\begin{cases} \lambda(k+1) = W_{ij}\lambda(k) + \eta D_{ij}y(k) + \mathfrak{Z}^\lambda(k) \\ y(k+1) = W_{ij}y(k) - (x(k+1) - x(k)) + \mathfrak{Z}^y(k) \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\mathfrak{Z}^\lambda(k)$  和  $\mathfrak{Z}^y(k)$  是在第  $k$  次迭代时注入到系统中的误差数据。仅当  $i$  是正常节点时有  $\mathfrak{Z}_i^\lambda(k) = 0$ ,  $\mathfrak{Z}_i^y(k) = 0$ , 否则它们为任意值。

当攻击者随机注入虚假数据时, 系统的收敛性被破坏, 通信链路很容易暴露给外部管理员, 此时攻击极易被发现。因此, 文献[29]给出了实现隐形攻击的条件:

当 FDI 攻击满足

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathfrak{Z}_i^\lambda(k) = 0, \lim_{k \rightarrow \infty} \mathfrak{Z}_i^y(k) = 0 \quad (22)$$

且存在一个常数  $Y$  使得

$$\sum_{k=0}^{\infty} |\mathfrak{Z}_i^\lambda(k)| \leq Y, \sum_{k=0}^{\infty} |\mathfrak{Z}_i^y(k)| \leq Y, i \in \Omega \quad (23)$$

则认为该 FDI 攻击能够实现隐形攻击, 系统最终收敛为

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \lambda_i(k) = \lambda^a, \lim_{k \rightarrow \infty} y_i(k) = 0, i \in \Omega \quad (24)$$

式中:  $\lambda^a$  是一个常数。攻击结果会导致生成一个非最优解, 并打破供给和需求之间的平衡。

2) DoS 攻击。DoS 攻击可以发送大量网络数据包, 使通信信道拥塞并导致数据包丢失, 阻碍网络的高效运行。本文中假设通信链路是安全可靠的, 因此所有的丢包都是由 DoS 攻击引起的。一般来说, 自然丢包率  $\theta$  满足伯努利分布(两点分布)<sup>[20]</sup>, 如式(25)所示, 而 DoS 攻击引起的丢包率  $\tau$  高于自然率。

$$\Pr\{\tau(k) = 0\} = \theta, \Pr\{\tau(k) = 1\} = 1 - \theta \quad (25)$$

式中:  $\tau(k) = 1$  表示通信正常,  $\tau(k) = 0$  表示通信中的数据传输异常;  $\theta$  表示两个邻居节点之间的分组丢包率且满足  $0 < \theta < 1$ 。

为了抵消攻击对系统的影响, 本文引入了可信节点的概念<sup>[30]</sup>。可信节点具有高级别的安全性且不能被攻击者破坏, 它的集合表示为  $\Omega$ 。假设每个节

点至少有一个可信的邻居节点, 将每个节点  $i$  标识的所有相邻可信节点的集合设置为  $T_i = \{j | j \in \Omega, j \in \Omega_i\}$ , 其中  $\Omega_i$  表示节点  $i$  邻居节点的集合。

假设 1: 所有的可信节点可以形成一个完整的连通图  $G = (v, \varepsilon)$ 。

### 3.2 基于共识的弹性安全策略

本节中的弹性安全策略分为 3 个步骤, 具体流程如图 2 所示。

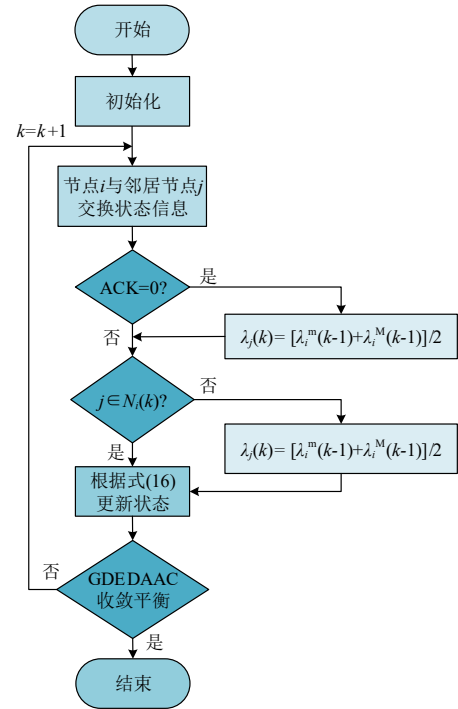


图2 弹性安全策略流程图

Fig. 2 Resilient security policy flowchart

1) 攻击检测。根据 DoS 攻击的特点, 增加了可靠有效的 ACK 来确认节点之间的状态传输。当节点  $j$  成功接收其邻居的状态值时, 它向其邻居发送 ACK=1 以进行确认, 否则, 它发送 ACK=0。当节点  $i$  接收到信号 ACK=0 时, 节点  $i$  可以判断其邻居节点遭受 DoS 攻击。因此, 将  $D_i(k) = \{j | j \in \text{DoS}, \text{ACK}=0\}$  设置为节点  $i$  相邻节点受到 DoS 攻击的集合。

假设 2: ACK 信号为完全可靠, 不会丢失, 并且通信系统不能执行超时重传操作。

注 2: 在传统的一致性验证框架下, 节点需采用全连接模式进行状态值验证, 即每轮迭代需经过全部邻接节点完成状态校验。这种同步数据收发协议会造成通信延迟。而本文使用的异步通信方式检测能够适用于数据传输不规则的场景, 且节点可以独立选择通信对象与时序, 通过异步消息队列完成攻击检测。

2) 状态筛选。该步骤的目的是过滤掉异常节

点。每个节点  $i$  分别对收集的邻域状态进行排序，即  $\lambda_i^{M(m)}(k) = \max(\min)\{\lambda_j(k) | j \in T_i \cup \{i\}\}$ 。然后向其相邻节点广播，并根据最大和最小可信状态过滤并筛选正常节点。当相邻节点处于可信节点的最大和最小状态之间时，认为它们为正常节点，它们的集合可以表示为  $N_i(k) = \{j | \lambda_j^m(k) \leq \lambda_j(k) \leq \lambda_j^M(k), j \in Q \cup \{i\}\}$ 。过滤后的剩余节点由于 FDI 攻击而具有异常状态，设置  $F_i(k) = \{j | j \in \text{FDI}\}$  表示在迭代  $k$  次时遭受 FDI 攻击的相邻节点的集合。

3) 数据补偿。在每次迭代中，节点  $j$  首先根据式(26)更新其状态，然后将新状态用于 GDEDAAC 的迭代优化中。

$$\tilde{\lambda}_j(k) = \begin{cases} \lambda_j(k), i \in N_i(k) \\ [\lambda_j^m(k-1) + \lambda_j^M(k-1)]/2, j \in D_i(k) \cup F_i(k) \end{cases} \quad (26)$$

注 3：本文考虑的是通信过程中的网络攻击，

即不存在初值异常的情况，所以式(26)中的  $k$  应满足  $k \geq 1$ 。与文献[24]的防御策略相比，本文策略所引入的可信节点可以确保系统中一小部分节点形成的连通图始终保持完整并正常运行<sup>[30]</sup>，且在攻击检测和节点筛选的基础上加入了数据补偿机制，该机制可以保证系统的稳定性和完整性，而文献[24]中的策略是对异常节点进行隔离并剔除系统完成防御，这种防御策略会使得异常机组处于离线状态，降低了系统的完整度和机组的利用率。

## 4 仿真实验

本文基于 IEEE39-32 节点的 IES 进行算例分析。该 IES 包括 3 台 POD 机组、3 台 HOD 机组和 1 台 CHP 机组，每个机组内部都配备有一台中心控制器。系统的通信拓扑如图 3 所示。

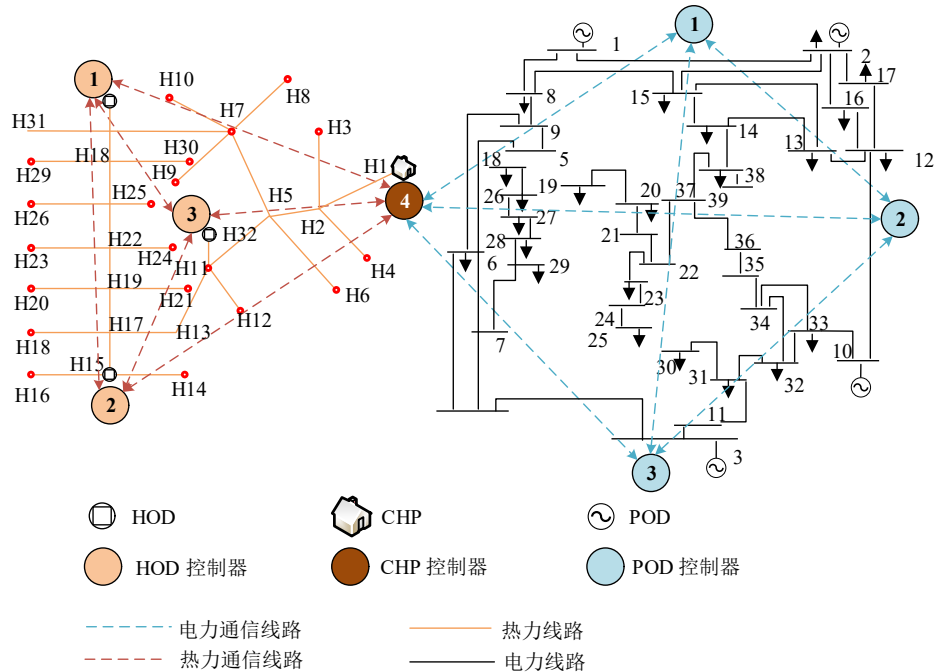


图 3 39-32 节点的 IES 通信拓扑

Fig. 3 Communication topology of the 39-32 node IES system

详细参数设置见表 1。全局电功率需求和热功率需求分别设置为  $P_d=700$  kW 和  $H_d=600$  kW，收敛因子取  $\eta=0.03$  ( $\eta$  的取值依据及稳定域如附录 B 所示)。本文的所有实验数据均基于 MATLAB 2021a 实现，运行平台为配备 3.1GHz Intel Core i9 处理器和 32GB 内存的笔记本电脑。

### 4.1 理想通信环境下的经济调度

场景 1，验证在理想通信环境下 GDEDAAC 求解经济调度问题的适用性。该场景下最优增量成本  $\lambda^*$ 、最优功率输出  $p_i^*$  和  $h_i^*$  如图 4(a)和(b)所示。图 4 中： $\lambda_{p1}$ 、 $\lambda_{p2}$ 、 $\lambda_{p3}$  分别表示 POD1、POD2、POD3

表 1 各能源设备的运行成本参数和功率上下限  
Table 1 Operating cost parameters and upper and lower power limits for each energy device

| POD | $a_i$  | $\beta_i$ | $p_i^P$    | $\bar{p}_i^P$ |
|-----|--------|-----------|------------|---------------|
| 1   | 0.0533 | 23.45     | 50         | 250           |
| 2   | 0.0735 | 18.66     | 45         | 210           |
| 3   | 0.06   | 20.3      | 50         | 200           |
| CHP | $a_i$  | $\beta_i$ | $\theta_i$ | $\delta_i$    |
| 1   | 0.0305 | 14.5      | 0.03       | 4.2           |
| HOD | $a_i$  | $\beta_i$ | $h_i^H$    | $\bar{h}_i^H$ |
| 1   | 0.0422 | 10.32     | 75         | 300           |
| 2   | 0.03   | 12        | 80         | 350           |
| 3   | 0.038  | 11.2      | 80         | 320           |

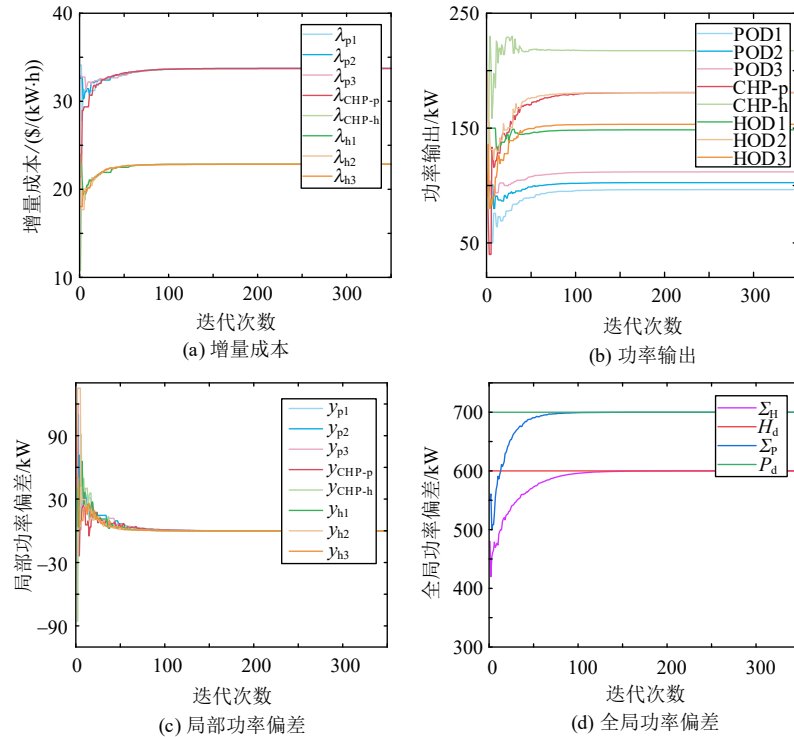


图4 理想通信环境下 GDEDAAC 的收敛结果

Fig. 4 Convergence results of the GDEDAAC in an ideal communication environment

的增量成本;  $\lambda_{h1}$ 、 $\lambda_{h2}$ 、 $\lambda_{h3}$  分别表示 HOD1、HOD2、HOD3 的增量成本;  $\lambda_{CHP-p}$  和  $\lambda_{CHP-h}$  分别表示 CHP 机组的电增量成本和热增量成本;  $\sum H$  和  $H_d$  分别表示总热功率和全局热功率需求;  $\sum P$  和  $P_d$  分别表示总电功率和全局电功率需求。具体数值为  $\lambda_p^* = 33.626 \$ / (kW \cdot h)$ 、 $\lambda_h^* = 22.8343 \$ / (kW \cdot h)$ 、 $p_1^{p*} = 96.3789 kW$ 、 $p_2^{p*} = 102.4761 kW$ 、 $p_3^{p*} = 111.8665 kW$ 、 $p_1^{c*} = 180.9527 kW$ 、 $h_1^{H*} = 217.3629 kW$ 、 $h_2^{H*} = 148.4752 kW$ 、 $h_3^{H*} = 180.8551 kW$  和  $h_1^{c*} = 153.3067 kW$ 。各个机组局部功率偏差和全局功率偏差如图 4(c)和 (d)所示,可以看出各机组的局部功率偏差量收敛至 0,电功率和热功率供需均保持平衡。因此,该算法可以实现 IES 的最优调度。

#### 4.2 GDEDAAC 的即插即用特性

场景 2,验证 GDEDAAC 的即插即用特性。当  $k=200$  时新增一台 POD 机组记为 POD4,机组各项成本系数与 POD2 相同。此时电功率总需求为 650kW,经过迭代后重新达到平衡的最优增量成本为  $\lambda_p^* = 32.7885 \$ / (kW \cdot h)$ 、 $\lambda_h^* = 22.7074 \$ / (kW \cdot h)$ 。运行过程如图 5 所示。

从图 5 可以看出,新接入某个机组后,系统的增量成本可以重新收敛至新的最优点,功率供需最终依然可以保持平衡。因此,该算法具备即插即用特性。

#### 4.3 网络攻击下的经济调度

场景 3,验证网络攻击下无弹性安全策略的经济调度情况。假设当  $k=20$  时 POD2 和 HOD1 共同遭受 DoS 和 FDI 攻击,FDI 攻击误差数据设置为

$$g_i^j(k) = -110/k^2, g_i^y(k) = -110/k^2 \quad (27)$$

由 DoS 攻击导致节点引起的数据包丢失次数如图 6 所示,POD2 和 HOD1 分别对应于节点序列 2 和 6。

在没有任何安全策略的情况下,运行过程的收敛情况如图 7 所示。此时,正常机组的增量成本为  $\lambda_p^* = 33.7689 \$ / (kW \cdot h)$ 、 $\lambda_h^* = 23.2679 \$ / (kW \cdot h)$ 。

从图 7(c)(d)可知,系统中 POD2 和 HOD1 的局部功率偏差不能收敛至 0,且总的电功率和热功率供需无法达到平衡。该结果验证了网络攻击对经济调度的破坏性,因此需要加入安全策略来减轻网络攻击所带来的影响。

#### 4.4 网络攻击下具备弹性安全策略的经济调度

场景 4,验证弹性安全策略对于网络攻击的防御性能。与场景 3 网络攻击情况相同,假设当  $k=20$  时 POD2 和 HOD1 共同遭受 DoS 和 FDI 攻击,此时的运行过程收敛情况如图 8 所示。加入弹性安全策略之后,正常机组的增量成本分别为  $\lambda_p^* = 34.2494 \$ / (kW \cdot h)$ 、 $\lambda_h^* = 23.3674 \$ / (kW \cdot h)$ 。从图 8(c)(d)可知,系统中 POD2 和 HOD1 的局部偏

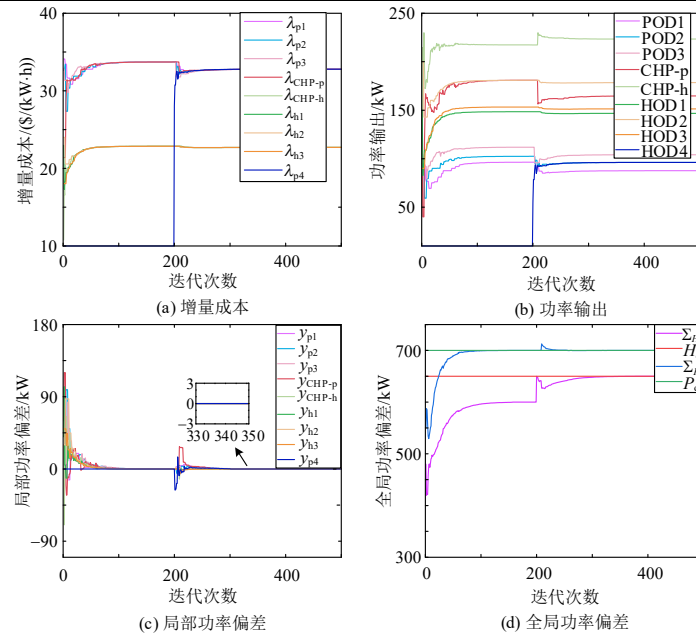


图 5 GDEDAAC 的即插即用特性  
Fig. 5 Plug-and-play characteristics of the GDEDAAC

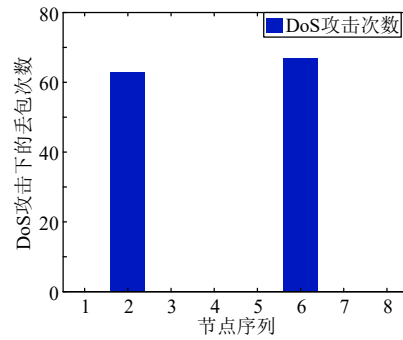


图 6 节点遭受 DoS 攻击次数统计  
Fig. 6 Statistics on the number of DoS attacks on nodes

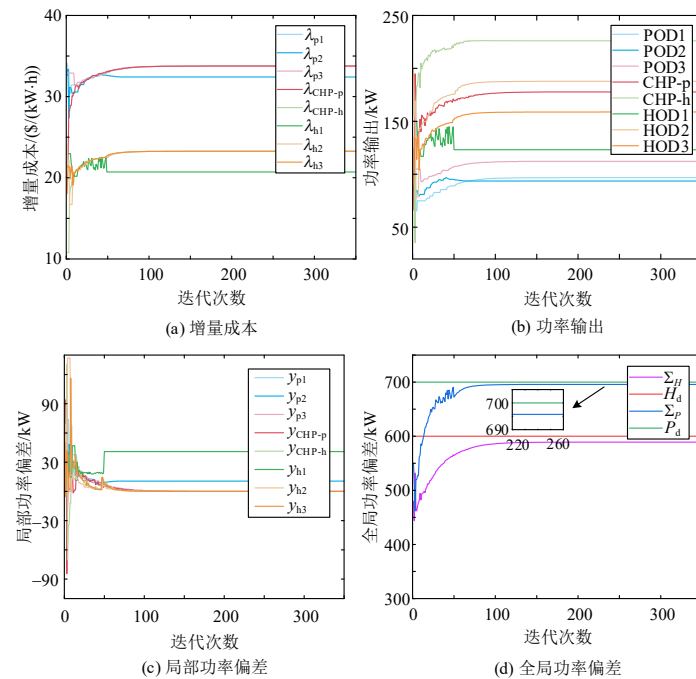


图 7 网络攻击环境下 GDEDAAC 的收敛结果  
Fig. 7 Convergence results of the GDEDAAC in cyber-attack environment

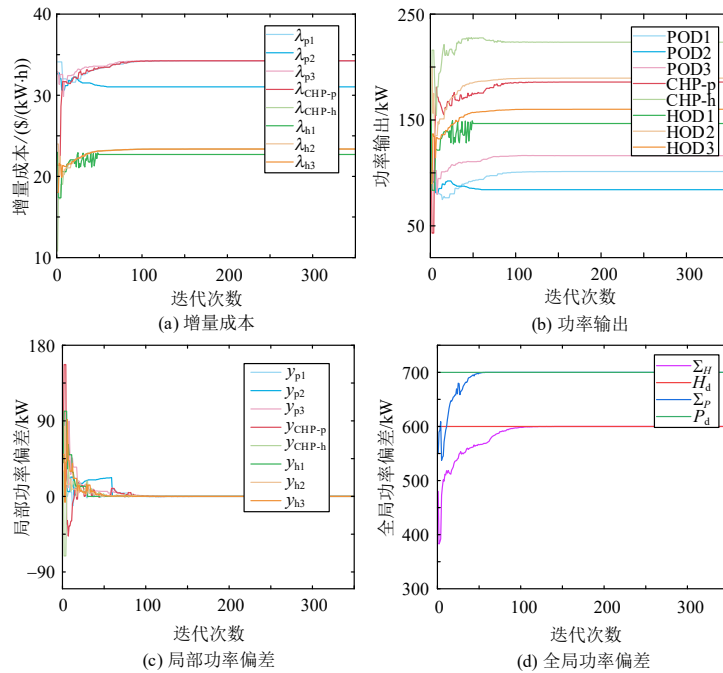


图8 网络攻击环境下具备弹性安全策略 GDEDAAC 的收敛结果

Fig. 8 Convergence results of GDEDAAC with resilient security strategy in cyberattack environment

差电量重新收敛至 0, 且总的电功率和热功率重新达到平衡。该结果验证了弹性安全策略对于网络攻击防御的有效性, 能够使得系统重新达到平衡并获得一个可接受的次优解。

#### 4.5 异步通信和同步通信方式性能对比

异步通信和同步通信在通信效率方面的对比如附录 C 所示。在机组参数和总需求相同的情况下, 分别使用 GDEDAAC 算法和传统的同步通信下的一致性算法(15)进行迭代, 其中 HOD1 运行过程如图 9 所示。 $y^a$  和  $y^s$  分别表示在异步通信和同步通信方式下的局部功率偏差,  $\sum H^a$  和  $\sum H^s$  分别表示在异步通信和同步通信方式下的总热功率。

从图 9 可知, 以上两种通信方式下系统均能达到平衡。在异步通信方式下, 当迭代次数为 106 和 127 时系统已达到收敛, 而同步通信方式下达到收敛时的迭代次数分别为 129 和 203, 因此异步通信方式下的收敛速度更快。在大规模的网络环境下,

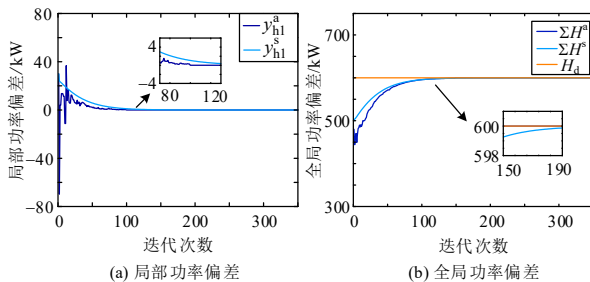


图9 异步通信和同步通信方式的收敛结果

Fig. 9 Convergence results for asynchronous and synchronous communication methods

这种迭代速度的差异会更明显, 具体情况如附录 D 所示。

由于 GDEDAAC 中带有随机向量, 所以迭代过程同样具有随机性, 图 10 分别是 POD1 在 6 次迭代过程中的运行情况, 其中, 上标(i)表示第 i 次迭代过程。相比之下, 同步通信方式的唯一性决定了其迭代过程只有一种情况。

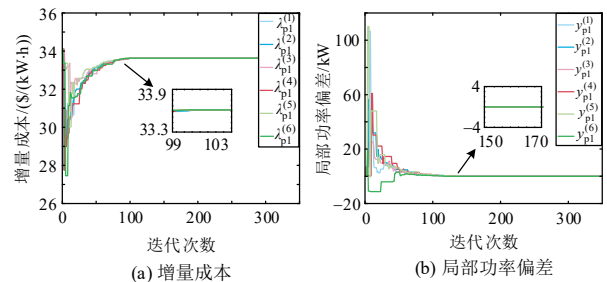


图10 GDEDAAC 的 6 次迭代过程收敛结果

Fig. 10 Convergence results for the GDEDAAC six iteration process

从隐私保护的定义来看<sup>[19]</sup>, 窃听者的目的是根据已知信息推测其他节点的初始信息, 假设系统已完成了一次完整调度, 窃听者根据 GDEDAAC 算法对 POD1 收敛前的增量成本和局部功率偏差初始信息进行推测, 从图 10 可以看出, 每次迭代的过程具有独立随机性, 从而窃听者无法对 POD1 初始信息进行精准推测, 即实现了各机组初始信息的隐私保护。

## 5 结论

与广泛存在的同步通信分布式算法不同, 本文

提出了一种基于 Gossip 的异步通信分布式经济调度算法,理论证明了其收敛性和最优性,并与同步通信下的算法进行了对比分析。与传统的一致性算法相比,所提算法不仅能够解除全局时钟同步的约束,减少通信延迟,提高迭代速度,还使得迭代过程具有一定的随机性,提升了系统数据的隐私性。此外,本文还设计了一种弹性安全策略以应对 DoS 和 FDI 的组合攻击,并通过仿真验证了该策略对于网络攻击具有良好的防御性能。需要指出的是,若考虑通信时延,异步通信过程中可能会发生数据冗余的情况,且异步系统的非确定性行为(如竞态条件、消息乱序)难以在工程测试中复现。面向 IESs 的其他异步机制和考虑通信传输损耗也是值得进一步研究的方向。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 3-10.  
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10(in Chinese).
- [2] 南斌, 姜春娣, 董树锋, 等. 计及源荷不确定性的综合能源系统日前-日内协调优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3669-3680.  
NAN Bin, JIANG Chundi, DONG Shufeng, et al. Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling of integrated energy system considering uncertainties in source and load[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3669-3680(in Chinese).
- [3] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等. 基于分布式新能源集群的微能源网优化调度综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 7952-7969.  
ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of optimal dispatching for the aggregation of micro-energy grids based on distributed new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 7952-7969(in Chinese).
- [4] 梁俊鹏, 张高航, 李凤婷, 解超, 韩璐, 张赞宁. 计及氢储能与需求响应的路域综合能源系统规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4918-4927.  
LIANG Junpeng, ZHANG Gaochang, LI Fengting, XIE Chao, HAN Lu, ZHANG Yining. Road-domain Integrated Energy System Planning Strategy Considering Hydrogen Storage and Demand Response[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4918-4927(in Chinese).
- [5] 魏震波, 郭毅, 魏平桢, 等. 考虑传输线重构的电气综合能源系统分布鲁棒扩展规划模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 16-23.  
WEI Zhenbo, GUO Yi, WEI Ping'an, et al. Distribution robust expansion planning model for integrated natural gas and electric power systems considering transmission switching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 16-23(in Chinese).
- [6] BIDRAM A, DAVOUDI A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1963-1976.
- [7] 曹猛, 解超, 李凤婷, 尹纯亚, 张高航, 高云. 基于两阶段鲁棒的多综合能源微网-共享储能电站协同优化运行策略[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4493-4502.  
CAO Meng, XIE Chao, LI Fengting, YIN Chunya, ZHANG Gaochang, GAO Yun. Co-optimized Operation of Multi-integrated Energy Microgrids-shared Energy Storage Plants Based on Two-stage Robustness[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4493-4502(in Chinese).
- [8] ZHANG Guoyue, LI Chaoyong, QI Donglian, et al. Distributed estimation and secondary control of autonomous microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(2): 989-998.
- [9] 张景淳, 陈胜, 彭琰, 等. 计及灵活爬坡的气-电耦合综合能源系统低碳经济调度研究[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3315-3323.  
ZHANG Jingchun, CHEN Sheng, PENG Yan, et al. Low carbon economic scheduling of gas-electric coupling integrated energy system considering flexible ramping products[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3315-3323(in Chinese).
- [10] 许丹阳, 武志刚, 管霖, 等. 考虑频率安全与柔直支撑特性的异步互联电网分布鲁棒经济调度方法[J/OL]. 电网技术, 2024: 1-15 [2025-03-07]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1529>.  
XU Danyang, WU Zhigang, GUAN Lin, et al. Distributionally robust economic dispatch method for asynchronously interconnected power grids considering the frequency constraints and frequency support characteristics of VSC-HVDC[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-15[2025-03-07]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1529>(in Chinese).
- [11] 廖扬, 蔡帆, 邵佳扬, 等. 多区互联综合能源系统分散协调低碳经济调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 138-146.  
LIAO Yang, CAI Zhi, SHAO Jiayang, et al. Decentralized coordinated low-carbon economic dispatch method for multi-regional interconnected integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 138-146(in Chinese).
- [12] LI Huaqing, WANG Zheng, CHEN Guo, et al. Distributed robust algorithm for economic dispatch in smart grids over general unbalanced directed networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4322-4332.
- [13] YAN Weihang, CHENG Lin, YAN Shijie, et al. Enabling and evaluation of inertial control for PMSG-WTG using synchronverter with multiple virtual rotating masses in microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 1078-1088.
- [14] HAN Renke, MENG Lexuan, FERRARI-TRECATE G, et al. Containment and consensus-based distributed coordination control to achieve bounded voltage and precise reactive power sharing in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(6): 5187-5199.
- [15] LI Yushuai, ZHANG Huaguang, LIANG Xiaodong, et al. Event-triggered-based distributed cooperative energy management for multienergy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2008-2022.
- [16] XIE Guoqi, YANG Kehua, LUO Haibo, et al. Reliability and confidentiality co-verification for parallel applications in distributed systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021, 32(6): 1353-1368.
- [17] 黄馨仪, 刘明波, 林舜江, 等. 考虑风电不确定性的输配电系统鲁棒经济调度分布式算法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(4): 165-177.  
HUANG Xinyi, LIU Mingbo, LIN Shunjiang, et al. Distributed algorithm for robust economic dispatch of integrated transmission and distribution system considering wind power uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(4): 165-177(in Chinese).

- Chinese).
- [18] 林勇棋, 邵振国, 陈飞雄, 等. 基于气网划分的电-气综合能源系统分布式低碳经济调度[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2639-2650. LIN Yongqi, SHAO Zhenguo, CHEN Feixiong, et al. Distributed low-carbon economic scheduling of integrated electricity and gas system based on gas network division[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2639-2650(in Chinese).
- [19] 张贇宁, 涂迅, 付文龙, 等. 基于状态分解的综合能源系统完全分布式调度算法[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4928-4937. ZHANG Yunning, TU Xun, FU Wenlong, et al. Fully distributed dispatch algorithm for integrated energy system based on state decomposition[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4928-4937(in Chinese).
- [20] ZHANG Dan, FENG Gang. A new switched system approach to leader-follower consensus of heterogeneous linear multiagent systems with DoS attack[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(2): 1258-1266.
- [21] 黄博南, 詹凤楠, 张天闻, 等. 一种针对电-热综合能源系统经济调度的DoS最优攻击策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6839-6853. HUANG Bonan, ZHAN Fengnan, ZHANG Tianwen, et al. An optimal DoS attack strategy against the economic dispatch for electric-thermal integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6839-6853(in Chinese).
- [22] LI Li, SONG Xinqing, MENG Wei. A novel distributed resilient control strategy for HVACs under FDI attacks[C]//2024 4th Power System and Green Energy Conference (PSGEC). Shanghai: IEEE, 2024: 1036-1040.
- [23] 张贇宁, 涂迅, 张磊, 等. 基于攻击者视角的综合能源系统网络攻击策略[J]. 电网技术, 2025, 49(7): 3009-3019. ZHANG Yunning, TU Xun, ZHANG Lei, et al. Adversarial perspectives on network attack strategies in integrated energy systems [J/OL]. Power System Technology, 2025, 49(7): 3009-3019 (in Chinese).
- [24] HUANG Bonan, LI Yushuai, ZHAN Fengnan, et al. A distributed robust economic dispatch strategy for integrated energy system considering cyber-attacks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(2): 880-890.
- [25] WANG Rui, LI Qiqiang, LI Guanguan, et al. A gossip-based distributed algorithm for economic dispatch in smart grids with random communication link failures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4635-4645.
- [26] 陈厚合, 高康静, 张儒峰, 等. 考虑异步通信的配电-气网分布式有功-无功协同优化[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(20): 69-80. CHEN Houhe, GAO Kangjing, ZHANG Rufeng, et al. Distributed active-reactive power coordinated optimization for electricity-gas distribution network considering asynchronous communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(20): 69-80(in Chinese).
- [27] BOYD S, GHOSH A, PRABHAKAR B, et al. Randomized gossip algorithms[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2508-2530.
- [28] COSTA O L V, MARQUES R P, FRAGOSO M D. Discrete-time Markov jump linear systems[M]. London: Springer, 2006.
- [29] ZHAO Chengcheng, HE Jianping, CHENG Peng, et al. Analysis of consensus-based distributed economic dispatch under stealthy attacks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 5107-5117.
- [30] ABBAS W, LASZKA A, KOUTSOUKOS X. Improving network connectivity and robustness using trusted nodes with application to resilient consensus[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018, 5(4): 2036-2048.



张贇宁

在线出版日期: 2025-06-06.

收稿日期: 2025-03-12.

作者简介:

张贇宁(1979), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为网络控制系统、电力系统控制与运行, E-mail: yunningzhang@gmail.com;

李鹏飞(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统安全防护控制等, E-mail: 13971823702@163.com;

付文龙(1988), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电系统综合建模和新能源发电预测, E-mail: ctgu\_fuwenlong@126.com;

张磊(1986), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为综合能源系统、大规模新能源接入后电力系统优化运行与控制, E-mail: leizhang3188@163.com;

高以恒(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统安全防护控制等, E-mail: gao2yh0827@163.com.

(责任编辑 徐梅)

## 附录 A

IES 的最优工作点根据 KKT 条件确定如下：

$$\frac{\partial L}{\partial p_i^p} = \frac{\partial L}{\partial p_i^c} = \lambda_p \quad (A1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial h_i^H} = \frac{\partial L}{\partial h_i^C} = \lambda_h \quad (A2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_p} = \Delta P = \sum_{i \in \Omega} P_{d,i} - \sum_{i \in \Omega_p} p_i^p - \sum_{i \in \Omega_c} p_i^c = 0 \quad (A3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_h} = \Delta H = \sum_{i \in \Omega} H_{d,i} - \sum_{i \in \Omega_h} h_i^H - \sum_{i \in \Omega_c} h_i^C = 0 \quad (A4)$$

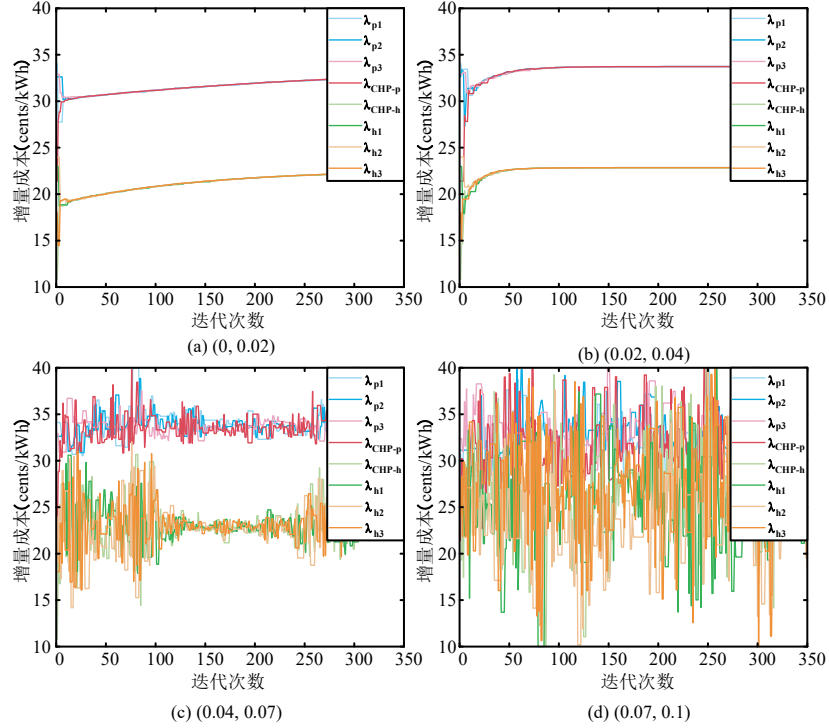


图 B1  $\eta$  在不同区间取值范围下增量成本的收敛情况

Fig. B1 Convergence of incremental costs for different range of interval values of  $\eta$

从图 B1(a)–(d)可知，在(0,0.04)范围内系统随着 $\eta$ 的增加收敛速度加快，当 $\eta \in (0.02, 0.04)$ 系统趋于最优收敛速度，而当 $\eta$ 超过某一上界后系统开始发散，因此 $\eta$ 在(0.02,0.04)范围内取值即可。

## 附录 C

完整连通图所包含的节点数至少为 3，以节点数为 3 的信息传输为例，在同步通信和异步通信方式下的通信传输如图 C1(a)–(b)所示。

## 附录 B

由式(17)–(18)可知 GDEDAAC 算法收敛速度主要受收敛因子 $\eta$ 的影响。 $\eta$ 是一个足够小的正实数，因此将 $\eta$ 的取值范围选定于主区间(0,0.1)，并将主区间划分为 4 个子区间，分别为(0,0.02)，(0.02,0.04)，(0.04,0.07)和(0.07,0.1)。在每个子区间中随机生成一个值为 $\eta$ ，其对 GDEDAAC 算法收敛速度的影响如图 B1 所示。

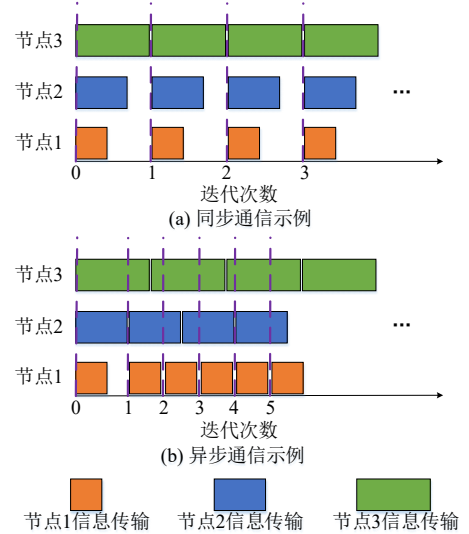


图 C1 同步通信和异步通信示例

Fig. C1 Examples of synchronous and asynchronous communication

由于节点具有不同信息传输时间尺度<sup>[26]</sup>，在同步通信方式下，系统需要等待节点 3 的信息传输完成后开始迭代，因为节点 3 需要更长时间尺度的信息传输。此时，节点 1 和节点 2 要进行等待，这段等待时间将被浪费，从而降低了通信效率。异步通信方式下，至少有 2 个相邻节点信息传输完成后即可开始迭代，发送方和接收方之间没有严格的时序要求，它们可以独立进行操作，而无需等待对方的响应，从而减少了等待时间。

#### 附录 D

将实验扩展至 12 台 POD 机组,3 台 CHP 机组, 12 台 HOD 机组的通信系统, POD1-POD3 机组参数与表 1 相同, POD4-POD12 沿用 POD1 的机组参数, CHP1-CHP3 机组参数与表 1 中 CHP1 相同, HOD1-HOD3 机组参数与表 1 相同, HOD4-HOD12 沿用 HOD1 的机组参数。增量成本的迭代情况如图

D1(a)–(b)所示。异步通信方式大约经过 20s 后系统完成 500 次迭代，而同步通信方式则需要大约 32s。电 IC 达到收敛时的迭代次数分别为 323 和 413，热 IC 达到收敛时的迭代次数分别 257 和 402。相较于典型日内调度的调度周期，该算法足够快，可适用于实际实现。

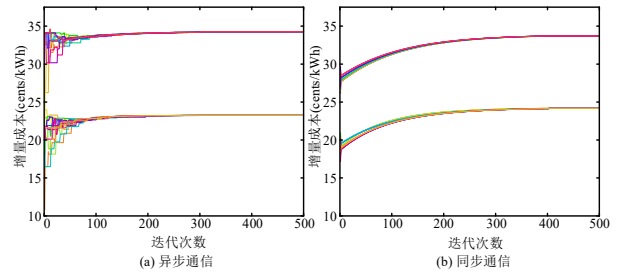


图 D1 异步通信和同步通信方式下增量成本的收敛结果  
Fig. D1 Convergence results of incremental cost for asynchronous and synchronous communication methods