

基于分布式神经动力学的虚拟电厂经济调度及事件触发控制策略

刘璟璐, 谭宇航*

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Economic Scheduling and Event-Triggered Control Strategy of Virtual Power Plant Based on Distributed Neural Dynamics

LIU Jinglu, TAN Yuhang*

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] In the field of economic scheduling of virtual power plants, centralized algorithms are currently dominant, neglecting their distributed structural forms, leading to an over-reliance on central nodes and inefficient handling of distributed energy resources. At the same time, conventional distributed optimization algorithms are complex and slow in operation, making it difficult to respond to the dynamic changes in the power system in a timely manner, which seriously restricts the efficient operation of virtual power plants. And the increase in distributed units leads to the generation of a large number of information exchanges, which is a serious waste of communication resources. Aiming at this problem, this paper proposes an optimal scheduling strategy that conforms to the distributed structure of virtual power plant. [Methods] Firstly, an economic scheduling strategy based on distributed neural dynamics algorithm was proposed, aiming to solve the fast consistency problem in virtual power plants. Secondly, a dynamic distributed event-triggered mechanism was designed to save communication resources. Finally, modelling was performed based on Matlab simulation software. The effectiveness of economic scheduling and the superiority of dynamic distributed event-triggered mechanism were proved by analysing the consistency of fast convergence and comparing the periodic event-triggered mechanism. [Results] Simulation results showed that the optimization algorithm proposed in this paper can effectively and quickly achieve incremental cost consistency, and the triggered mechanism has obvious advantages over the traditional mechanisms, effectively saving resources. [Conclusion] This paper focuses on the economic scheduling of virtual power plants under the dynamic distributed event-triggered mechanism. An economic scheduling optimization algorithm

of virtual power plant based on distributed neural dynamics was proposed, which effectively solved the problem of information congestion caused by centralized optimization algorithm. By designing a dynamic distributed event-triggered mechanism that adapts to the distributed structure, the communication resource is saved.

Key words: distributed; neural dynamics; event-triggered; virtual power plant

摘 要: 【目的】在虚拟电厂经济调度领域,当前以集中式算法为主流,忽视了其分布式结构形式,导致系统过度依赖中心节点,处理分布式能源资源效率低下。同时,常规分布式优化算法运行复杂、速度缓慢,难以及时响应电力系统的动态变化,严重制约虚拟电厂的高效运行。并且由于分布式机组的增加导致产生大量的信息交流,严重浪费通信资源。针对此问题,本文提出了一种符合虚拟电厂分布式结构的优化调度策略。【方法】首先,提出了一种基于分布式神经动力学算法的经济调度策略,旨在解决虚拟电厂中的快速一致性问题。其次,设计了一种动态分布式事件触发机制,节约了通信资源。最后,基于 Matlab 仿真软件进行建模,通过分析一致性快速收敛情况,对比周期性事件触发机制证明经济调度的有效性和动态分布式事件触发机制优越性。【结果】仿真结果表明本文所提出的优化算法能有效、快速地实现增量成本一致性,而且该触发机制与传统机制对比有明显优势,有效节约了资源。【结论】本文针对动态分布式事件触发机制下的虚拟电厂经济调度,提出了一种基于分布式神经动力学的虚拟电厂经济调度优化算法,有效解决了集中式优化算法引发的信息拥堵难题。通过设计适配分布式结构的动态分布式事件触发机制,节约了通信资源。

关键词: 分布式;神经动力学;事件触发;虚拟电厂

0 引言

在当今分布式能源迅速崛起的时代,虚拟电厂作为一种整合分布式能源资源的创新技术,受到广泛关注^[1-3]。虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)集成了各电源^[4-10]、储能系统和可控负荷,是一个具有协同运行能力的巨大电力系统^[11-12]。

VPP 若要实现高效运作,经济调度是关键环节。然而,当前 VPP 的经济调度方法以集中式算法为主导。集中式的调度方法侧重于实现整体的优化目标,未能充分考虑 VPP 本身具有的分布式结构特征。这可能导致在实际调度过程中出现诸多问题,例如系统对中心控制节点的过度依赖,出现单点故障造成系统瘫痪。文献[13]采用免疫遗传算法求解热电负荷模型的最优解。文献[14]采用粒子群算法得出 VPP 多场景的最佳出力方案,实现了 VPP 系统的优化运行。文献[15]在智能软开关处对功率进行解耦,再利用交替方向乘子法进行分布式优化。文献[16-17]中分布式算法采用主从关系,通过领导者的控制规律来设计跟随者,使跟随者对领导者进行跟踪。交替方向乘子法用于复杂问题时,需要分别求解多个子问题,各子问题之间相互独立,所以可将不同区域的能源优化问题作为子问题^[18]。文献[19]采用分阶段计算,第一阶段采用平均一致性算法获取全网信息,第二阶段采用一致性牵引算法根据等微增率准则计算最优出力。

事件触发机制各式各样且应用广泛,其提出是为了减少通信次数,节约通信资源^[20]。文献[21]提出了一种改进的自适应事件触发机制,并针对干扰效应设计了模糊系统模型。文献[22]针对 Zeno 现象,提出了一种基于周期采样的事件触发机制,从根本上避免了 Zeno 现象的发生。文献[23]采用阈值事件触发机制,根据系统当前状态与阈值的比较结果决定是否执行相关操作,触发条件严格。文献[24]采用周期性事件触发机制,按照预先设定好的固定周期,定时触发相应任务,以此来驱动系统的运行。文献[25]对分布式环境中的信息进行汇总,基于汇总信息来判断事件的触发情况,并通过设计动态参数来调整阈值。文献[26]通过在事件触发函数中引入正常量来进一步延长触发间隔。文献[27-29]中控制器在

触发时间内是非时变的,增强了系统的容错性能。

然而,上述文献中存在系统等级与实际不符的问题,所采用的优化算法也存在收敛过早、陷入局部最优的弊端。此外,由于优化算法中增加的复杂操作步骤,不仅延长了运行时间,也提升了算法难度。在事件触发机制方面,部分机制参数预设困难、灵活性不足、高度依赖精确模型且容易忽视关键局部信息;部分机制在无实际需求时仍会触发任务,导致资源浪费,并且更改关键参数流程繁琐,容易出现错误;还有部分机制的信息收集方式存在局限性,致使信息获取不及时、不全面,不仅影响决策准确性,还对系统一致性产生负面影响,同时部分控制器设计与实际运行情况存在偏差。针对这些问题,本文致力于探索符合 VPP 分布式结构的优化调度策略。主要工作内容如下。

(1) 将分布式神经动力学算法融入到复杂的 VPP 经济调度中,从而有效、快速解决 VPP 在分布式环境下运行的一致性问题。

(2) 针对事件触发机制出现的资源浪费、参数预设困难以及信息获取不全等问题。设计了一种动态分布式事件触发机制,在触发间隔内,通过计算邻居信息动态调整事件触发的条件。

(3) 基于 Matlab 对所提策略和机制进行仿真验证,旨在为 VPP 的经济调度提供更高效、更贴合其分布式结构的解决方案。

1 图论

图 $G=(V, E, A)$ 由节点集 V 和边集 E 组成。其中, $V=\{v_i \mid i=1, 2, \dots, n\}$, 且 V 是有限的非空集; $E \in V \times V$; $A=[a_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为邻接矩阵,表示节点之间有效的通信联系,当智能体 i 和 j 直接相连时,非对角元素 $a_{ij}=a_{ji}=1$; 否则, $a_{ij}=a_{ji}=0$ 。图 G 中不存在自连接,因此,对角元素 $a_{ii}=0$ 。定义一个对角矩阵 $D=\text{diag}(d_{ii})$, $d_{ii}=\sum_{i=1}^n a_{ij}$, $L=D-A$ 为拉普拉斯矩阵。

假设 1 图 G 是无向且连通的。

若假设 1 成立,则 L 满足: L 既是正对称的,又是半定的; L 的特征值都非负,0 是 L 的一个简单特征值,其对应特征向量是元素为 1 的列向量。

2 问题转换与建模

VPP 是一个聚合器,集合了分布式发电机,如燃料发电机(Fuel Generator, FG)、分布式可再生能源发电机(Distributed Renewable Generator, DRG)、分布式电力储能设备(Distributed Power Storage Device, DPSD)和柔性负荷(Flexible Load, FL)等。VPP 的能源管理系统是一个集中控制器,协调各参与者的特性,并像传统电厂一样运行,其主要目标是通过调度 FG、DRG、FL 和 DPSD 实现 VPP 的成本最小化,从而使得利益最大化。定义目标函数如式(1)所示:

$$\max J = T - \sum_{i=1}^m f_i(P_i) \quad (1)$$

式中: J 为总利; T 为客户端总售价; $\sum_{i=1}^m f_i(P_i)$ 为各能源机组成本之和。

由式(1)可知,可以通过降低 VPP 发电成本来实现利益最大化。

2.1 各节点建模

目前, VPP 多采用常规发电机(Common Generator, CG)进行发电。定义 CG 的成本函数如式(2)所示:

$$f(P_{CG}) = a_{CG}P_{CG}^2 + b_{CG}P_{CG} + c_{CG} \quad (2)$$

式中: a_{CG} 、 b_{CG} 和 c_{CG} 为 CG 的成本系数; P_{CG} 为 CG 产生的功率。

DRG 的供能来源主要是太阳能、风能等,其燃料成本为零。但是由于 DRG 发电存在不确定性,所以在一些研究中将其视为不可调度单元。本文参考文献[30]的调度策略,定义 DRG 的成本函数如式(3)所示:

$$f(P_{DRG}) = \alpha_{DRG}P_{DRG} + \beta_{DRG} \exp\left(\chi_{DRG} \frac{P_{DRG, \max} - P_{DRG}}{P_{DRG, \max} - P_{DRG, \min}}\right) \quad (3)$$

式中: α_{DRG} 、 β_{DRG} 为 DRG 的成本系数,且均为正; χ_{DRG} 为惩罚因子; P_{DRG} 为 DRG 产生的功率; $P_{DRG, \max}$ 和 $P_{DRG, \min}$ 分别为 DRG 发电功率的上限和下限。

定义 FG 的成本函数如式(4)所示:

$$f(P_{FG}) = a_{FG}(P_{FG})^2 + b_{FG}P_{FG} + c_{FG} + \alpha_{FG} \exp(\eta_{FG}P_{FG}) \quad (4)$$

式中: a_{FG} 、 b_{FG} 、 c_{FG} 、 α_{FG} 和 η_{FG} 为 FG 的成本系数,

且均为正; P_{FG} 为 FG 产生的功率,如果 FG 由天然气供能, P_{FG} 即燃烧天然气所产生的电能。

定义 DPSD 某时刻的充放电功率为 P_{DPSD} 。若 $P_{DPSD} > 0$, 则 DPSD 处于放电状态;若 $P_{DPSD} < 0$, 则 DPSD 处于充电状态。定义 DPSD 的成本函数如式(5)所示:

$$f(P_{DPSD}) = a_{DPSD}(P_{DPSD} + b_{DPSD})^2 \quad (5)$$

式中: a_{DPSD} 、 b_{DPSD} 为 DPSD 的成本系数,且均为正。

FL 单元可以由系统灵活调整,参与经济调度,定义 FL 单元的成本函数如式(6)所示:

$$f(P_{FL}) = \alpha_{FL}P_{FL}^2 + \beta_{FL}P_{FL} \quad (6)$$

式中: α_{FL} 和 β_{FL} 为 FL 单元的成本系数,且均为正; P_{FL} 为 FL 单元的功率。

2.2 约束条件

2.2.1 CG 功率上下限约束

CG 运行时需满足功率的上下限约束,约束条件如式(7)和式(8)所示:

$$P_{CG, \min} \leq P_{CG} \leq P_{CG, \max} \quad (7)$$

$$-P_{CG, \text{ramp}} \leq P_{CG} - P'_{CG} \leq P_{CG, \text{ramp}} \quad (8)$$

式中: $P_{CG, \min}$ 和 $P_{CG, \max}$ 分别为 CG 的发电功率的下限和上限; P'_{CG} 为上一时刻 CG 的发电功率; $P_{CG, \text{ramp}}$ 为 CG 的动态功率变化约束。

当求解 CG 在 t 时刻的发电功率时,则 t 时刻 CG 的发电功率与 $t-1$ 时刻 CG 的发电功率需满足 CG 的动态功率变化约束。

2.2.2 DRG 功率上下限约束

DRG 运行时需满足功率的上下限约束,约束条件如式(9)所示:

$$P_{DRG, \min} \leq P_{DRG} \leq P_{DRG, \max} \quad (9)$$

2.2.3 FG 功率上下限约束

FG 运行时需满足功率的上下限约束,约束条件如式(10)和式(11)所示:

$$P_{FG, \min} \leq P_{FG} \leq P_{FG, \max} \quad (10)$$

$$-P_{FG, \text{ramp}} \leq P_{FG} - P'_{FG} \leq P_{FG, \text{ramp}} \quad (11)$$

式中: $P_{FG, \max}$ 和 $P_{FG, \min}$ 分别为 FG 发电功率的上限和下限; $P_{FG, \text{ramp}}$ 为 FG 的动态功率变化约束; P'_{FG} 为上一时刻 FG 的发电功率。

2.2.4 DPSD 充放电约束

DPSD 需满足充电储存功率约束和放电输出功率约束,约束条件如式(12)~式(14)所示:

$$-P_{\text{ch}, \max} \leq P_{DPSD} \leq P_{\text{ds}, \max} \quad (12)$$

$$S_{\text{DPSD},\min} \leq S_{\text{DPSD}} \leq S_{\text{DPSD},\max} \quad (13)$$

$$S_{\text{DPSD}} = S'_{\text{DPSD}} - P_{\text{DPSD}} \Delta t \quad (14)$$

式中: $P_{\text{ch},\max}$ 和 $P_{\text{ds},\max}$ 分别为 DPSD 充电、放电上限; S_{DPSD} 为 DPSD 从起始时刻到 t 时刻存储的能量; $S_{\text{DPSD},\min}$ 和 $S_{\text{DPSD},\max}$ 分别为容量约束的下限和上限; Δt 为一个充电周期; S'_{DPSD} 为上一充电周期 DPSD 存储的能量。

2.2.5 FL 单元输出功率约束

FL 单元在运行时需满足输出功率约束, 约束条件如式 (15) 所示:

$$0 \leq P_{\text{FL}} \leq P_{\text{FL},\max} - P_{\text{load}} \quad (15)$$

式中: P_{load} 为常规电负荷; $P_{\text{PL},\max}$ 为 FL 单元的输出功率上限。

2.2.6 系统功率平衡约束

$$\sum P_{\text{CG}} + \sum P_{\text{DRG}} + \sum P_{\text{FG}} + \sum P_{\text{DPSD}} - \sum P_{\text{FL}} - P_{\text{loss}} = P_{\text{load}} \quad (16)$$

式中: P_{loss} 为电网的传输损耗。

3 基于分布式神经动力学的 VPP 动态分布式事件触发控制策略

3.1 分布式神经动力学 VPP

简化目标函数和约束条件如式 (17) ~ 式 (21) 所示:

$$\min F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{x}_i) \quad (17)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{x} = [P_{\text{CG}}, P_{\text{DRG}}, P_{\text{FG}}, \dots, P_{\text{FL}}]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{d} \quad (19)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (20)$$

$$\mathbf{L}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{d}$ 为等式约束条件; $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ 为不等式约束条件; $\boldsymbol{\lambda}$ 为不等式拉格朗日乘子组成的列向量。

最小化问题的拉格朗日函数为 $L_a = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\mu}^T(\mathbf{d} - \mathbf{Ax}) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{B}(\mathbf{x})$, $\boldsymbol{\mu}$ 为等式拉格朗日乘子组成的列向量。根据 Karush-Kuhn-Tucker 条件, 当 $(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda})$ 取最优解 $(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\mu}^*, \boldsymbol{\lambda}^*)$ 时, 应满足:

$$\left. \frac{\partial L_a}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = \nabla_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}^*) - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\mu}^* + \nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{B}^T(\mathbf{x}^*) \boldsymbol{\lambda}^* = \mathbf{0} \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial L_a}{\partial \boldsymbol{\mu}} \right|_{\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{\mu}^*} = \mathbf{Ax}^* - \mathbf{d} = \mathbf{0} \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial L_a}{\partial \boldsymbol{\lambda}} \right|_{\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{\lambda}^*} = \mathbf{B}(\mathbf{x}^*) \leq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda}^* \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda}^{*T} \mathbf{B}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{0} \quad (24)$$

假设 2 在 $\mathbf{R}^n$ 内, $f_i[\mathbf{x}_i(k)]$ 和 $\mathbf{B}_i[\mathbf{x}_i(k)]$ 是凸函数, 且 $\mathbf{A}_i$ 为行满秩矩阵。

假设 3 在优化问题中, 存在 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, 使 $\mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(k) = \mathbf{d}_i, \mathbf{B}_i(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$ 成立。

则, 所提出的分布式优化算法在第 k 次迭代和时隙 t 的更新和信息交换规则的离散形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k+1) &= \mathbf{x}_i(k) + \\ &\kappa_1 \{ P_{\Omega} \{ \mathbf{x}_i(k) - \nabla_{\mathbf{x}} f_i[\mathbf{x}_i(k)] + \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\mu}_i(k) - \\ &\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{B}_i[\mathbf{x}_i(k)] \boldsymbol{\lambda}_i(k) \} - \mathbf{x}_i(k) \} + \\ &u(k) \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sgn}[\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_i(k)] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu}_i(k+1) &= \boldsymbol{\mu}_i(k) + \\ &\kappa_2 \left[- \sum_{j=1}^n a_{ij} \boldsymbol{\mu}_j(k) - \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{d}_i \right] \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda}_i(k+1) &= \boldsymbol{\lambda}_i(k) + \\ &\kappa_3 \left\{ - \boldsymbol{\lambda}_i(k) + \max \left\{ \boldsymbol{\lambda}_i(k) + \mathbf{B}_i[\mathbf{x}_i(k)] - \right. \right. \\ &\left. \left. \sum_{j=1}^n a_{ij} \boldsymbol{\lambda}_j(k), 0 \right\} \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

式中: κ_1, κ_2 和 κ_3 为步长; $u(k) = v_1 / (v_2 + k)$, v_1, v_2 为常数; $P_{\Omega}[\mathbf{x}_i(k)]$ 为投影运算, 表达式为

$$P_{\Omega}[\mathbf{x}_i(k)] = \begin{cases} \mathbf{x}_{i,\max}, & \mathbf{x}_i(k) > \mathbf{x}_{i,\max} \\ \mathbf{x}_i(k), & \mathbf{x}_{i,\min} < \mathbf{x}_i(k) < \mathbf{x}_{i,\max} \\ \mathbf{x}_{i,\min}, & \mathbf{x}_i(k) < \mathbf{x}_{i,\min} \end{cases} \quad (28)$$

在任意初始状态下, VPP 各节点最终都能达到输出一致性, 如式 (29) 所示:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{x}_j(k)\| = 0, i, j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (29)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为欧几里德范数。

当 $k \rightarrow \infty$ 时, 在稳态时有: $\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) = \mathbf{x}_i^*, \boldsymbol{\mu}_i(k+1) = \boldsymbol{\mu}_i(k) = \boldsymbol{\mu}_i^*, \boldsymbol{\lambda}_i(k+1) = \boldsymbol{\lambda}_i(k) = \boldsymbol{\lambda}_i^*, u(k) = 0$ 。代入式 (25) ~ 式 (27), 可得:

$$\mathbf{0} = - \nabla_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}^*) + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\mu}^* - \nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{B}^T(\mathbf{x}^*) \boldsymbol{\lambda}^* \quad (30)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{L} \boldsymbol{\mu}^* + \mathbf{Ax}^* - \mathbf{d} \quad (31)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^* = [\boldsymbol{\lambda}^* + \mathbf{B}^*(\mathbf{x}^*) - \mathbf{L} \boldsymbol{\lambda}^*]^+ \quad (32)$$

将式 (31) 两边同时乘 $\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_N$, 可得:

$$\mathbf{0}_{NN} = (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_N) \mathbf{L} \boldsymbol{\mu}^* + (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_N) (\mathbf{Ax}^* - \mathbf{d}) =$$

$$\begin{aligned} I_N L \otimes I_N \mu^* + (I_N \otimes I_N)(Ax^* - d) = \\ (I_N \otimes I_N)(Ax^* - d) \end{aligned} \quad (33)$$

式中: $\otimes$ 为克罗内克积。

由式(33)可得:

$$Ax^* = d \quad (34)$$

式(21)相当于以下条件:

$$B^*(x^*) - L\lambda^* \leq 0, \lambda^* \leq 0 \quad (35)$$

$$\lambda^{*T} [B^*(x^*) - L\lambda^*] = 0 \quad (36)$$

在式(35)两边同时乘 $I_N \otimes I_N$ 可得:

$$\begin{aligned} (I_N \otimes I_N) [B(x^*) - L\lambda^*] &\leq 0_{NN} \\ \Rightarrow (I_N \otimes I_N) B(x^*) - (I_N \otimes I_N) L\lambda^* &\leq 0_{NN} \\ \Rightarrow (I_N \otimes I_N) B(x^*) &\leq 0_{NN} \\ \Rightarrow B(x^*) &\leq 0 \end{aligned} \quad (37)$$

根据式(34)、式(36)和式(37)中规定的条件,平衡点满足式(21)~式(23)中概述的 Karush-Kuhn-Tucker 条件。因此,平衡点代表最佳解决方案,其收敛性证明如下。

将式(24)~式(26)转换成连续性形式。当 $k \rightarrow \infty$ 时, $u(k) = 0$, 因此有:

$$\dot{x}_i = \kappa_1 \{ P_\Omega [x_i - \square_x f_i(x_i) + A_i^T \mu_i - \square_x B_i(x_i) \lambda_i] - x_i \} \quad (38)$$

$$\dot{\mu}_i = \kappa_2 \left[- \sum_{j=1}^n a_{ij} \mu_j - A_i x_i + d_i \right] \quad (39)$$

$$\dot{\lambda}_i = \kappa_3 \left\{ \left[\lambda_i + B_i(x_i) - \sum_{j=1}^n a_{ij} \lambda_j \right]^+ - \lambda_i \right\} \quad (40)$$

式(38)~式(40)可以用矩阵形式表示:

$$\begin{aligned} \dot{y}_i &= U(y) \\ U(y) &= \begin{bmatrix} P_\Omega [x - \square_x f(x) + A^T \mu - \square_x B(x) \lambda] - x \\ L\mu + Ax - d \\ [\lambda + B(x) - L\lambda]^+ - \lambda \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (42)$$

式中: $y = [x, \mu, \lambda]^T$ 。

根据式(43)选择 Lyapunov 候选者:

$$W(y) = \frac{1}{2} \| U(y) \|_2^2 \geq 0 \quad (43)$$

Lyapunov 候选者的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{W}(y) &= U^T(y) \square_y U(y) \dot{y} = \\ U^T(y) \square_y U(y) U(y) \end{aligned} \quad (44)$$

$$\square_y U(y) = - \begin{bmatrix} M_x & -A^T & \square_x B(x) \\ A^T & L & 0 \\ -\square_x B(x) & 0 & L \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$M_x = \square_x^2 f(x) + \square_x^2 B(x) \lambda \quad (46)$$

由于目标函数 $f(x)$ 在适当的系数下是凸函数,并且所有不等式约束都是径向的,因此可以得出 $\square_x^2 f(x) \geq 0$; $\square_x^2 B(x) \lambda \geq 0$ 。可得 M_x 是半正定矩阵。

L 是半正定矩阵,因此,由式(47)可以证明 $\square_y U(y)$ 是一个半负定矩阵:

$$\begin{aligned} y^T \square_y U(y) y &= -x^T M_x x + \mu^T A x - \lambda^T \square_x B(x) x - \\ x^T A \mu - \mu^T L \mu - \lambda^T L \lambda + x^T \square_x B(x) \lambda = \\ &= -(x^T M_x x + \mu^T L \mu + \lambda^T L \lambda) \leq 0 \end{aligned} \quad (47)$$

根据式(44)~式(47),可得:

$$\dot{W}(y) \leq 0 \quad (48)$$

因此式(41)中的系统是 Lyapunov 稳定的。

3.2 动态分布式事件触发控制策略

分布式事件触发机制的设计主要源于分布式模型的控制算法,在分布式神经动力学控制算法中不存在集中式的控制台,每个发电厂的都是一个独立的控制台,其地位同等,只进行邻居信息交互,一旦被触发,该系统能够自动进行控制器更新。在更新过程中,各发电厂仅依靠自身以及相邻节点的状态信息,无需依赖全局信息。这种机制极大地提升了各发电厂之间的触发效率,同时有效减少了对通信资源的占用。设计动态分布式事件触发控制概念图如图1所示。

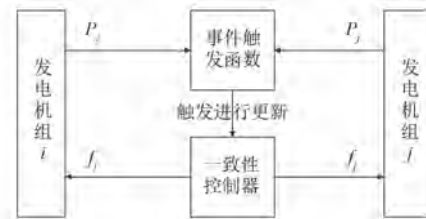


图1 动态分布式事件触发控制概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of dynamic distributed event-triggered control

假设有一个由 N 个机组所组成的网络,定义测量误差为

$$e_i(k) = x_i(k+1) - x_i(k) \quad (49)$$

在分布式控制策略中,机组 i 的控制器表达

式为

$$Z(x) = \square_x f(x) \quad (50)$$

式中: $\square_x f(x)$ 为一致性增量成本函数。

建立具有分布式特点的事件触发条件:

$$|e_i| > \frac{\vartheta_i(1 - \xi|N_i|)}{|N_i|} |z_i|, \vartheta_i > 0 \quad (51)$$

式中: $0 < \xi < \frac{1}{|N_i|}$; $z_i = \sum_{j \in N_i} [x_i(t) - x_j(t)]$; ϑ_i 为每个机组的性能参数。

从式(51)可以看出,本文事件触发机制无需知道全局信息只需知道邻居信息即可。并且由于阈值随机组参数动态变化,所以,实现了动态分布式事件触控制。

考虑式(17),并且在满足式(50)和式(51)条件下,每个机组都能收敛,并且系统稳定,增量成本达到一致性。

重新定义一个候选 Lyapunov 函数来证明系统的稳定性。由于二次型函数能够反映系统与理想平衡状态的偏差,构造 Lyapunov 函数 $V(k)$ 为

$$V(k) = \sum_{i=1}^n [x_i(k) - x_i^*(k)]^2 \quad (52)$$

式中: $x_i^*(k)$ 为每个代理的理想状态。

对式(52)求导:

$$\dot{V}(k) = \sum_{i=1}^n 2[x_i(k) - x_i^*(k)] \frac{dx_i(k)}{dk} \quad (53)$$

式(25)可简化为

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(k) = & \{P_\Omega[x_i(k)] - \square_x f_i[x_i(k)] + A_i^T \mu_i(k) - \\ & \square_x B_i[x_i(k)] \lambda_i(k)\} + \\ & u(k) \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sgn}[x_j(k) - x_i(k)] \end{aligned} \quad (54)$$

将式(53)代入式(54),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(k) = & 2 \sum_{i=1}^n [x_i(k) - x_i^*(k)] \cdot \\ & \left\{ P_\Omega[x_i(k)] - \square_x f_i[x_i(k)] + \right. \\ & A_i^T \mu_i(k) - \square_x B_i[x_i(k)] \lambda_i(k) + \\ & \left. u(k) \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sgn}[x_j(k) - x_i(k)] \right\} \end{aligned} \quad (55)$$

为证明最优解,需要考虑当 $V(k) \rightarrow 0$ 时系统的稳定性,即需要 $\dot{V}(k) \leq 0$ 。

从式(38)可以得出 $P_\Omega[x_i(k)] - \square_x f_i[x_i(k)] + A_i^T \mu_i(k) - \square_x B_i[x_i(k)] \lambda_i(k)$ 为优化项,通过误差修正可使 $x_i(k)$ 收敛到 $x_i^*(k)$,从而使 $\dot{V}(k)$ 减小。

$u(k) \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sgn}[x_j(k) - x_i(k)]$ 与相邻节点之间的误差项相关,误差较小时其对 $\dot{V}(k)$ 的影响较小,并且 $\lim_{k \rightarrow \infty} u(k) = 0$ 。

由于系统的每次更新都基于当前误差 $e_i(k)$,只有当误差超过阈值时才会更新,因此随着系统逐渐接近最优解, $e_i(k)$ 会越来越小。根据事件触发条件,只有当超过某个阈值时才会更新,确保更新发生在有意义的时候。

每次更新使得 Lyapunov 函数的值逐步减小。由于 $\dot{V}(k) \leq 0$,系统逐渐趋向于 $V(k) = 0$,系统的状态 $x_i(k)$ 会收敛到最优解 $x_i^*(k)$,从而证明了最优解的收敛性,并且系统是稳定的。

芝诺行为判定条件:系统的更新频率必须有限,即在有限时间内更新次数不能趋向于无穷大。

根据事件触发机制和误差减小的趋势,系统的更新频率会逐渐减少,并不会无限频繁地触发更新。因此,系统不会发生芝诺行为。

4 验证分析

为了验证动态分布式事件触发机制下 VPP 经济调度的可行性,基于 Matlab 建立一个 7 节点 VPP 系统,如图 2 所示。该系统中包括了 2 个 CG 机组、2 个 FG 机组、1 个 DRG 机组、1 个 FL 机组和 1 个 DPSD。

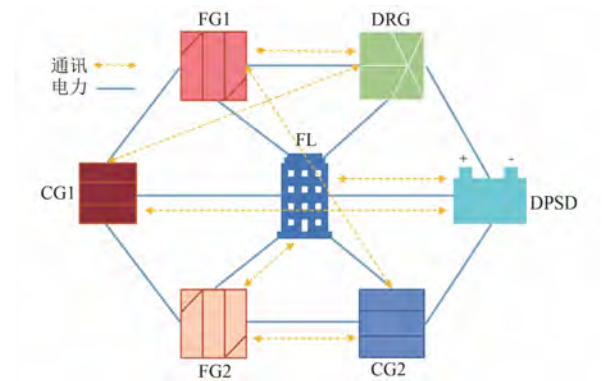


图 2 7 节点 VPP 系统

Fig. 2 7-node VPP system

VPP 一致性增量成本和各机组运行状态分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知,在无事件触发机制下,各发电单元增量成本经动态演化后呈现显著收敛特性,证明了系统具有自主达成一致性的能力。由图 4 可知,基于分布式优化框架的 CPP 机组在迭代约 2 000 次后,其输出功率

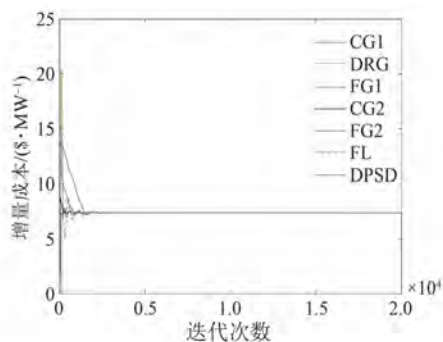


图3 VPP 一致性增量成本

Fig. 3 Consistency incremental cost of VPP

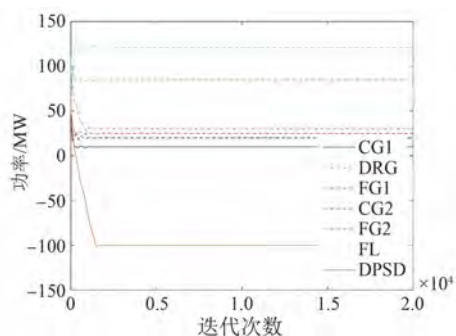


图4 VPP 各机组运行状态

Fig. 4 The operating status of each unit of VPP

与增量成本同时收敛至全局最优解。

本文方法和集中式方法所得结果对比如图5所示。由图5可知,分布式协同控制策略的仿真结果与集中式优化得出的最优解保持高度吻合,表明本算法在保持分布式架构优势的同时,能够实现与集中式优化等效的全局最优性。

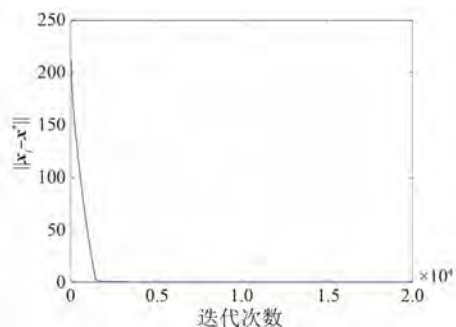


图5 本文方法和集中式方法的结果对比

Fig. 5 Comparison of results between the method in this paper and the centralized method

图6~图9为事件触发机制的仿真结果。动态分布式事件触发机制下一致性增量成本和触发散点分别如图6和图7所示。周期性事件触发机制下一致性增量成本和触发散点如图8和图9

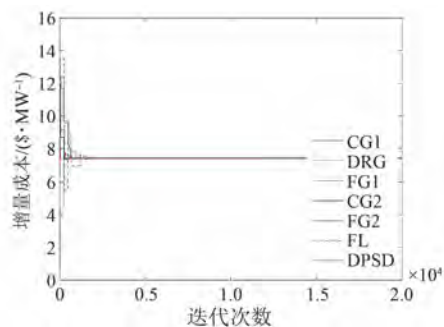


图6 动态分布式事件触发机制下VPP一致性增量成本

Fig. 6 Consistency incremental cost of VPP under the dynamic distributed event-triggered mechanism

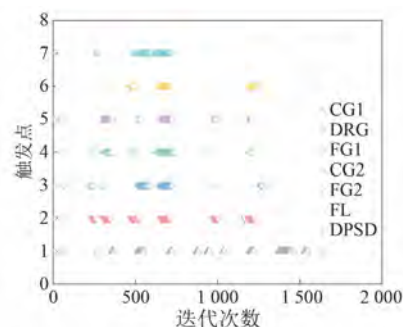


图7 动态分布式事件触发机制触发散点

Fig. 7 Trigger scatter points of the dynamic distributed event-triggered mechanism

所示。

由图6可知,所提事件触发机制在维持系统稳定性的前提下,未对系统动态特性产生结构性干扰,其响应特性与传统连续通信模式具有可比性。由图7可知,事件触发信号主要集中于系统演化的初始暂态阶段,随着迭代过程呈现衰减规律。值得注意的是,当系统进入稳态运行阶段后,事件触发频率显著降低,这与系统状态变量进入收敛域的时间节点严格对应,表明该机制具有自适应触发特性。这种设计在保证收敛精度的同时,显著降低了通信链路的信息交换频次,有效解决了传统方法存在的通信资源过度消耗问题。

由图8和图9可知,基于固定阈值的周期性事件触发机制虽然具备基础通信优化功能,但其静态参数架构导致两个本质性缺陷:在系统动态响应阶段,触发条件的参数不能随时间动态调整,灵活性明显不足;进入稳态后,持续存在的周期性通讯造成通信资源边际效益急剧下降。

将所提事件触发机制和周期性出触发机制以及无触发机制进行对比,结果如图10所示。

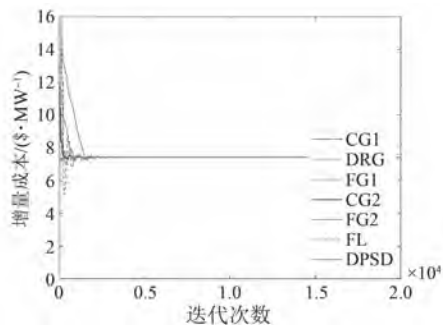


图 8 周期性事件触发机制下 VPP 一致性增量成本
Fig. 8 Consistency incremental cost of VPP under the periodic event-triggered mechanism

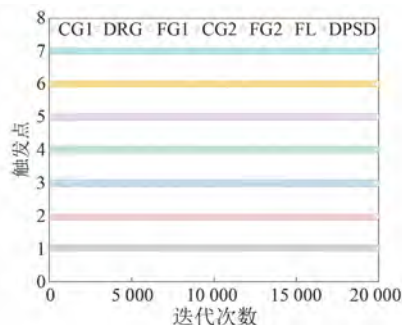


图 9 周期性事件触发机制触发散点
Fig. 9 Trigger scatter points of the periodic event-triggered mechanism

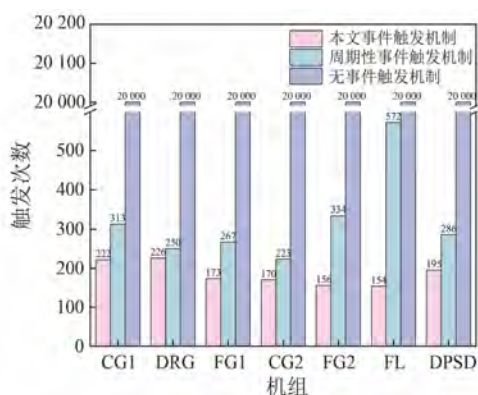


图 10 三种触发机制触发次数对比
Fig. 10 Comparison of the number of triggers of three trigger mechanisms

由图 10 可知,相较于传统周期性触发机制,本文所提动态分布式事件触发机制在各发电单元中展现出显著的通信抑制能力,其全局触发频次显著降低,且由图 7 可知触发事件在时空维度上呈现智能聚类特征。这种非均匀触发模式表明该触发机制能够自主识别系统动态过程中真正需要信息交互的关键时刻。

触发次数与误差之间的关系如图 11 所示。可见,触发次数的增加意味着系统进行信息更迭的次数增多,二者呈现出明显的负相关。因此,随着触发次数的逐步增加,误差不断减小,这对提升系统的准确性具有积极意义。当触发次数超过一定数值时,误差的变化趋势逐渐趋于平缓。经分析可知,在触发次数约 1 300 次时,误差控制与通信资源节约两方面均能较好地满足系统的既定要求,为系统的优化运行提供了关键的参数参考。

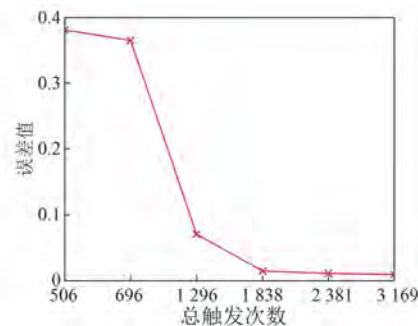


图 11 触发次数与一致性误差的关系
Fig. 11 Relationship between the number of triggers and the consistency error

5 结语

本文对动态分布式事件触发机制下的 VPP 经济调度进行了研究,提出了分布式神经动力学 VPP 经济调度优化算法,解决了 VPP 集中式优化算法存在的信息拥堵问题,通过设计动态分布式事件触发机制节约了通信资源。不同于周期性事件触发机制,动态分布式事件触发机制通过获取邻居信息制定动态阈值可以有效控制触发次数。仿真结果表明,在本文所提控制策略下,所有增量成本都能在短时间内收敛到一致,与周期性事件触发机制和无触发机制的对比结果验证了所提策略具有收敛速度快和通信次数少等优势。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

刘璟璐进行了方案设计、内容总结与论文撰

写,谭宇航进行了试验研究、论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary, and paper writing were carried out by Liu Jinglu. The experiment study was conducted by Tan Yuhang. The manuscript was reviewed and revised by Tan Yuhang. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 高洪超,王宣元,邱小燕,等. 新型电力系统环境下的虚拟电厂辅助调峰市场机制及其商业模式设计[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 376-385.
GAO H C, WANG X Y, QIU X Y, et al. Ramping energy market mechanism and its business model of virtual power plants oriented to new power system [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(3): 376-385.
- [2] 吴垠,牛文娟,诸晓骏. 考虑不同场景的虚拟电厂建模与优化分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 40-45.
WU Y, NIU W J, ZHU X J. Modeling and optimization analysis of virtual power plant considering different scenarios [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 40-45.
- [3] 仪忠凯,侯朗博,徐英,等. 市场环境下灵活性资源虚拟电厂聚合调控关键技术综述[J]. 中国电力, 2024, 57(12): 82-96.
YI Z K, HOU L B, XU Y, et al. Aggregation and operation key technology of virtual power plant with flexible resources in electricity market environment: Review [J]. Electric Power, 2024, 57(12): 82-96.
- [4] 李静宇. 虚拟电厂技术对电力系统运行的影响及优化策略研究[J]. 电工技术, 2024, (增刊2): 134-137.
LI J Y. Research on the impact and optimization strategies of virtual power plant technology on power system operation [J]. Electric Engineering, 2024, (S2): 134-137.
- [5] 叶晶,匡也,满翊,等. 高比例可再生能源消纳下的虚拟电厂技术经济性及潜力分析[J]. 中国高新科技, 2024, (23): 89-92.
YE J, KUANG Y, MAN Y, et al. Economic and potential analysis of virtual power plant technology under high ratio of renewable energy consumption [J]. China High and New Technology, 2024, (23): 89-92.
- [6] 杨光明. 新型电力系统下虚拟电厂研究[J]. 电器与能效管理技术, 2024, (11): 65-72.
YANG G M. Research on virtual power plant under new power system [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2024, (11): 65-72.
- [7] 秦广瑞. 新型电力系统下的虚拟电厂技术探析[J]. 电力设备管理, 2024, (22): 77-79.
QIN G R. Technical analysis of virtual power plant under new power system [J]. Electric Power Equipment Management, 2024, (22): 77-79.
- [8] 王丽晓,李嘉琪,晏二保,等. 资源聚合型虚拟电厂电-冷-柔耦合需求响应策略[J]. 广东电力, 2024, 37(12): 119-128.
WANG L X, LI J Q, YAN E B, et al. Electric cooling and flexibility joint demand response strategies for resources aggregated virtual power plant [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(12): 119-128.
- [9] LYU Q. Research on the application of virtual energy storage technology in power plants [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 4059-4061.
- [10] 曹帅,吴鑫,刘锦玉,等. 光储联合发电系统调度优化控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 89-94.
CAO S, WU X, LIU J Y, et al. Scheduling optimization control strategy of PV-and-storage combined power generation system [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 89-94.
- [11] 涂娟,汤宁平. 一种新型直驱式风力发电系统控制策略[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(7): 52-56.
TU J, TANG N P. A new converter control strategy in direct drive wind generation system [J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(7): 52-56.
- [12] 刘吉成,冯淑贤,宋亚楠,等. 计及源荷不确定性的虚拟电厂优化调度模型[J/OL]. 现代电力, 2024-04-10. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0205>.
LIU J C, FENG S X, SONG Y N, et al. A

- scheduling model of virtual power plant considering source-load uncertainty [J/OL]. *Modern Electric Power*, 2024-04-10. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0205>.
- [13] 许吉强, 卢闻州, 吴雷. 低压微电网逆变器的自调节下垂系数控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2017, 44(6): 13-18.
- XU J Q, LU W Z, WU L. Control of self-adaptive droop coefficient for inverter in low voltage microgrid [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2017, 44(6): 13-18.
- [14] 袁桂丽, 王琳博, 王宝源. 基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(17): 4974-4985+5217.
- YUAN G L, WANG L B, WANG B Y. Optimal dispatch of heat-power load and economy benefit analysis based on decoupling of heat and power of virtual power plant [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(17): 4974-4985+5217.
- [15] 韩志永, 张宇华, 李兵. 基于多场景技术的冷热电虚拟电厂两阶段优化调度[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(3): 174-180.
- HAN Z Y, ZHANG Y H, LI B. Two-stage optimal dispatching of CCHP virtual power plant based on multi-scenario technology [J]. *Electrical Measurement & Instrument*, 2022, 59(3): 174-180.
- [16] 凌锋, 朱吉然, 盛万兴, 等. 基于分布式优化的多区域柔性互联配电系统源网储协同规划[J/OL]. *电力自动化设备*, 2025-03-21. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202503016>.
- LING F, ZHU J R, SHENG W X, et al. Source-network-storage coordinated planning for multi-region flexible interconnected distribution system based on distributed optimization [J/OL]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025-03-21. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202503016>.
- [17] 王宏, 张孜乐, 吴立君, 等. 基于一体化可再生燃料电池的分布式控制策略研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(3): 241-250.
- WANG H, ZHANG Z L, WU L J, et al. Research on distributed control strategy based on unitized regenerative fuel cell [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(3): 241-250.
- [18] 张星红, 李齐齐, 陈慧波, 等. 领导者-跟随者多智能体系统的分布式协同控制[J]. *河南工学院学报*, 2025, 33(1): 18-22.
- ZHANG X H, LI Q Q, CHEN H B, et al. Distributed collaborative control of leader-follower multi-agent systems [J]. *Journal of Henan Institute of Technology*, 2025, 33(1): 18-22.
- [19] 何棋缘, 王嘉睿, 杨永标, 等. 基于交替方向乘子法的配电网-多微电网分布式优化调度模型[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(4): 62-71.
- HE Q Y, WANG J R, YANG Y B, et al. Distribution network-multiple microgrids distributed optimization scheduling model based on alternating direction method of multipliers [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(4): 62-71.
- [20] 吕朋蓬, 赵晋泉, 苏大威, 等. 基于一致性理论的独立微电网分布式动态经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 22-29.
- LYU P P, ZHAO J Q, SU D W, et al. Consensus-based distributed dynamic economic dispatching for islanded microgrids [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 22-29.
- [21] 王金锋, 于广亮, 任正某, 等. 基于事件触发的多电机系统一致性控制[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(6): 20-30.
- WANG J F, YU G L, REN Z M, et al. Consensus control of multi-motor system based on event-triggered [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(6): 20-30.
- [22] TAN Y S, YUAN Y, XIE X P, et al. Observer-based event-triggered control for interval type-2 fuzzy networked system with network attacks [J]. *IEEE Transactions Fuzzy System*, 2023, 31(8): 2788-2798.
- [23] ZHAO C, LIU X Z, ZHONG S M, et al. Leader-following consensus of multi-agent systems via novel sampled-data event-triggered control [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2021, 395: 125850.
- [24] 刘晓杰. 基于分布式事件触发的微电网谐波补偿研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- LIU X J. Distributed event-triggered control for harmonic voltage compensation in islanded ac microgrids [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [25] 宋朋涛, 杨清宇, 温广瑞, 等. 航空发动机分布式系统状态反馈周期事件触发控制[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(8): 2015-2023.
- SONG P T, YANG Q Y, WEN G R, et al. State feedback periodic event-triggered control for aero-

- engine distributed systems [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(8): 2015-2023.
- [26] 范泉涌, 张乃宗, 唐勇, 等. 基于动态事件触发通信协议的多智能体系统自适应可靠控制[J]. *自动化学报*, 2024, 50(5): 924-936.
- FAN Q Y, ZHANG N Z, TANG Y, et al. Adaptive reliable control of multi-agent systems based on dynamic event-triggered communication protocol [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(5): 924-936.
- [27] RUAN X L, XU C, FENG J W, et al. Adaptive dynamic event-triggered control for multi-agent systems with matched uncertainties under directed topologies [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 586: 126450.
- [28] XU Y, WU Z G. Distributed adaptive event-triggered fault-tolerant synchronization for multiagent systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(2): 1537-1547.
- [29] HOU Q H, DONG J X. Robust adaptive event-triggered fault-tolerant consensus control of multi-agent systems with a positive minimum inter event time [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(7): 4003-4014.
- [30] ZHU Z B, WANG F Y, YIN Y H, et al. Distributed fault-tolerant containment control for a class of non-linear multi agent systems via event-triggered mechanism [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2022, 430: 127250.
- [31] ZHANG H G, LI Y S, GAO D W, et al. Distributed optimal energy management for energy internet [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 3081-3097.
-
- 收稿日期:2025-02-15
收到修改稿日期:2025-04-11
作者简介:
刘璟璐(1989-),男,博士,副教授,研究方向为虚拟电厂分布式控制,bradybest@163.com;
* 通信作者:谭宇航(2001-),男,硕士研究生,研究方向为分布式经济调度,tanyuhang2023@126.com。