

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208809

考虑噪声和环境的微电网分布式经济调度策略

何玉钧 魏克俭 张倩

(华北电力大学电子与通信工程系 保定 071003)

摘要: 随着微电网的迅速发展,其运行和经济优化控制越来越受到人们的关注。传统的经济优化控制为集中式控制,其面临着单点故障,资源消耗大等问题。分布式控制可以很好地解决上述问题,并可以结合一致性算法解决微电网中的经济调度问题。系统调度过程需要通信网络完成信息的交互,然而通信网络通常会受到噪声的影响,针对此问题,本文提出了一种基于有限时间一致性的完全分布式经济调度策略来应对噪声的干扰,并以分布式系统的发电成本和环境污染排放最小为目标,通过引入一致性增益函数来抑制噪声,实现系统的完全分布式环境/经济优化调度。算例仿真表明,本文所提出的完全分布式调度策略在保证一致性收敛的同时,可以抑制噪声的干扰并且达到了较好的优化效果。

关键词: 环境/经济调度;一致性算法;噪声;完全分布式;微电网

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Distributed economic dispatching strategy of microgrid considering noise and environment

He Yujun Wei Kejian Zhang Qian

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: With the rapid development of microgrid, its operation and economic optimization control have attracted more and more attention. Traditional economic optimization control is centralized control, which is faced with single point of failure, large resource consumption and other problems. Distributed control can solve the above problems well, and the economic scheduling problem in microgrid can be solved by combining consensus algorithm. The system scheduling process requires the communication network to complete the information interaction, but the communication network is usually affected by the noise. For this problem, a fully distributed economic scheduling strategy based on finite time consensus is proposed to deal with the interference of noise, and in a distributed system of minimum power generation cost and environmental pollution as the goal. By introducing consensus gain function to suppress noise, the completely distributed environment/economic optimal scheduling is realized. The simulation results show that the fully distributed scheduling strategy proposed in this paper can suppress the interference of noise and achieve good optimization effect while ensuring consistent convergence.

Keywords: environmental/economic dispatch; consensus algorithm; noise; fully distributed; microgrid

0 引言

当前中国能源需求持续扩大,环境污染日益加重,在此背景下,分布式能源已成为解决这些问题的重要途径,大量分布式能源接入电力系统中并在其中得到了广泛的应用,从而推动了微电网的发展^[1-2]。随着微电网系统越来越复杂,经济调度优化问题在微电网中显得十分重要。一般来说经济调度问题(economic dispatch problem, EDP)是在满足供需平衡以及各类约束的条件下,实现发电成本达到最

小的目标^[3]。传统的经济优化算法大都是集中式算法,由于集中式控制任务都是通过一个调度中心来完成的,当系统庞大复杂时,容易产生单点故障,因此分布式优化控制逐步被引入到电力系统分布式能源的调度控制中^[4]。

近年来,很多研究者将多智能体一致性理论应用到电力系统来实现经济调度优化控制。分布式能源在调控过程中可以根据其自身特点及整体任务选择合适的通信结构,目前除了传统的集中式结构,还有分散式结构,带领导者的通信结构和完全分布式结构。其中,文献[5]采用完全分散

收稿日期:2022-01-09

式控制,基于泛洪的一致性算法来实现智能体之间的信息共享,同时考虑了阀点效应解决了非凸情况下的经济调度问题。文献[5-6],在解决经济调度问题中都考虑了输电损耗,文献[5]使用 Kron 公式更为准确地计算了传输过程中的损耗。虽然分散式网络框架较为安全可靠,但是其需要较大成本并且效率较低。在完全分布式过渡阶段,很多学者提出带领导者的分布式算法。文献[7]采用了一种自适应权值调整的技术来选择相邻各发电单元组间的通信权值,通过带领导者算法进行功率分配,并解决了存在通信不确定性的分布式优化调度问题。虽然分布式控制中的领导者可以代替集中式的调度中心,但是当领导者发生故障时,还是会影响全局的信息收集。文献[8]提出了一种完全分布式算法,该算法能从总体上对供电需求与发电总功率之间的差值做一个估计,这样就不需要“leader”智能体去收集整体的发电量信息。文献[9]算法采用固定的迭代步长,使系统快速收敛到最优解。文献[10]在微电网分层结构基础上,优化发电和需求两侧,提出了一种采用精确扩散策略的完全分布式算法。上述分布式调度大都是只考虑了发电成本的经济调度,并没有考虑到环境因素的影响。近年来,由于环境问题日益突出,所以考虑环境因素的经济调度模型更具有实用性。文献[11-12]在考虑发电成本的前提下同时考虑环境因素的影响。文献[11]提出了一个包含指数项的环境成本函数的新优化模型。文献[12]将污染排放量以二次函数来表示,实现环境/经济优化调度。

在上述这些基于一致性的经济调度算法中,研究大都是假设通信网络是理想情况下的,忽略了噪声干扰对信息传输的影响。在实际通信网络中,噪声是普遍存在的,噪声会导致系统的不稳定,因此有必要研究含有噪声的一致性算法。文献[13]采用了随机近似的一致算法,通过引入一致性增益函数有效抑制了通信噪声,但其仍需要采集全局功率偏差。然而,当通信过程被噪声干扰,算法需要一个领导者收集全局功率偏差,这不是完全去中心化的分布式控制。并且目前大多数学者研究的是多智能体系统达到渐近一致的情况,但是渐近稳定在实际的应用中不能实现有效性和及时性,这就要求多智能体系统的状态变量可以在有限时间内能达到稳定的状态^[14]。文献[15]采用完全分布式算法使一致性变量在有限时间内达到收敛,算法不采用投影算法形式,使实现更为简单,并可以实现指数收敛。其利用李雅普诺夫函数对算法可以收敛到一致进行了证明。此文献中分布式一致性实现分为两步,首先考虑非约束下的最优解,然后利用非约束情况下的解借助辅助函数求出约束情况下最优解。

基于上述讨论,本文在文献[15]的基础上考虑噪声的影响实现完全分布式经济调度策略,并验证了算法的有效性和鲁棒性。大多数电力系统的经济调度问题都以成本微增率作为一致性变量,本文从经济和环境两个角度考虑来降低发电成本和污染物排放量,实现微电网的经济和环境

优化调度。并且将有限时间一致性算法应用到微网分布式经济调度问题中,进一步考虑到通信过程中的噪声干扰问题,采用一致性增益函数抑制了噪声的影响。相对于带领导者的一致性算法,本文采用完全分布式算法不需要采集总功率偏差,简化了算法的设计。

1 理论基础和一致性算法

1.1 图 论

在基于多智能体系统架构的分布式能源系统中,用图 G 表示每个智能体之间的交互关系,即整个网络的拓扑图记为 $G=(V,E,A)$,其中 $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ 表示 G 中所有的顶点集合,其可以用来表示系统中的电力元件; $E=\{e_{ij}=(v_i,v_j)\}$ 表示图 G 中所有边的集合,即通信线路的集合; $A=[a_{ij}]$ 为网络拓扑的邻接矩阵,其每个元素 a_{ij} 都定义了节点 i 与 j 之间的联系。如果 $a_{ij}=1$,则说明了第 j 个节点与第 i 个节点彼此相连,即二者之间可以进行信息交互,否则 $a_{ij}=0$,节点 i 自身的信息交互忽略不计,即 $a_{ii}=0$ 。在图 G 中 v_i 的所有邻居顶点用集合 $N_i=\{v_j \in V \mid (v_i,v_j) \in E\}$ 表示。

本文假设所有的图都是连通的无向图,因此任何两个节点之间都存在通路。在无向图 G 中,不区分边的方向,所有与顶点 v_i 相连的边的数目,称其为顶点 v_i 的度,记为 $d(v_i)$ 。用矩阵 D 表示图 G 的度矩阵,其中, $D=\text{diag}\{d_1,d_2,\dots,d_n\}$ 是对角线元素为 $d(v_i)$ 其余元素均为零的对角矩阵。在研究多智能体系统一致性的过程中,研究人员为方便对其拓扑结构进行分析,引入了 Laplacian 矩阵,图 G 的 Laplacian 矩阵定义为 $L=D-A$ 。

1.2 一致性算法

1) 建立环境/经济调度模型

考虑环境的经济调度问题的主要目标是找到每个发电单元的最优发电量 P_{Gi} ,使得总发电成本最低并使污染物(如 NO_x 、 SO_2 、粉尘颗粒)的排放量最小,因此该优化问题有两个目标函数:燃料成本函数和污染排放函数。

(1)燃料成本函数:每个发电单元的发电成本可由如下二次函数定义:

$$F_i(P_{Gi}) = \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 \quad (1)$$

式中: P_{Gi} 表示发电单元 i 的发电量, α_i 、 β_i 和 γ_i 分别是第 i 个发电单元的成本系数。

(2)污染排放函数:每个发电单元的排放量可计算如下:

$$E_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (2)$$

式中: a_i 、 b_i 和 c_i 分别是第 i 个发电单元的排放系数^[12,16]。

2) 环境/经济调度模型的最优解

考虑到发电单元的功率约束和供需平衡约束,且同时保证发电成本和污染排放最小,可用线性加权法进行建模,多目标优化问题可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min C_{total} = \min \sum_{i=1}^n (\omega F_i(P_{Gi}) + (1-\omega)E_i(P_{Gi})) \\ \text{s. t. } P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = 0 \\ P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: P_D 为总的负荷需求, P_{Gi}^{\min} 和 P_{Gi}^{\max} 分别为发电单元的最小输出功率和最大输出功率, ω 为权重系数, $0 \leq \omega \leq 1$ 。

当不考虑发电单元功率约束时,使用拉格朗日乘子法,将上述环境/经济调度模型转化为:

$$L = \sum_{i=1}^n \omega (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) + \sum_{i=1}^n (1-\omega) (\alpha_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + \lambda (P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi}) \quad (4)$$

式中: $\lambda > 0$ 为拉格朗日乘子,在一阶最优条件下,如果满足以下条件,则可达到式(3)的最小值:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \omega (2\gamma_i P_{Gi} + \beta_i) + (1-\omega) (2c_i P_{Gi} + b_i) - \lambda = 0 \quad (5)$$

因此不考虑发电约束的最优一致性增量成本为:

$$\lambda^* = \frac{P_D + \sum_{i=1}^n \frac{(\omega\beta_i + (1-\omega)b_i)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}} \quad (6)$$

各发电单元的最优输出功率为:

$$P_{Gi}^* = \frac{\lambda^* - (\omega\beta_i + (1-\omega)b_i)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)} \quad (7)$$

定义 Ω_P 为输出功率达到极限的发电单元的集合,因此当考虑发电单元的功率约束时,最优一致性增量成本为:

$$\lambda^{**} = \frac{P_D - \sum_{i \in \Omega_P} P_{Gi} + \sum_{i \notin \Omega_P} \frac{\omega\beta_i + (1-\omega)b_i}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}}{\sum_{i \notin \Omega_P} \frac{1}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}} \quad (8)$$

各发电单元的最佳发电量为:

$$P_{Gi}^{**} = \begin{cases} \frac{\lambda^{**} - (\omega\beta_i + (1-\omega)b_i)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}, & i \notin \Omega_P \\ P_{Gi}^{\min} \text{ or } P_{Gi}^{\max}, & i \in \Omega_P \end{cases} \quad (9)$$

2 考虑噪声的完全分布式一致性调度算法

2.1 一致性增益函数

为保证算法的收敛性,当通信过程中受到噪声的干扰时,通过引入一致性增益函数 $c(k)$ 来抑制噪声。其中, $c(k)$ 必须满足如下两个条件^[16-17]:

$$\sum_{k=0}^{\infty} c(k) = +\infty \quad (10)$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} c^2(k) < +\infty \quad (11)$$

条件(10)保证了一致性变量以一定的速度收敛,条件(11)保证了闭环系统的静态误差在一定的范围内。由此可见,对于噪声,主要目的就是通过使用衰减的时变增益来减少智能体分配给相邻智能体的信号权重,从而使智能体之间可以使用最有效的邻近智能体信息来完成一致性协议。

2.2 完全分布式算法

假设智能体 i 在与邻居智能体 j 进行信息交互时受到了噪声干扰。基于文献[15]提出的完全分布式优化调度的方法,每个发电单元的一致性变量将在有限的时间内收敛到最优值。通过引入辅助变量 $\theta_i (i=1, 2, \dots, n)$ 设计如下一致性调度算法:

$$P_{Gi} = \sum_{j=1}^n a_{ij} (\theta_j - \theta_i) + P_{Di} \quad (12)$$

P_{Di} 是连接发电单元 i 的负荷需求,可以得到 $P_D = \sum_{i=1}^n P_{Di}$, 则:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_{Gi} &= - \sum_{i=1}^n d_i \theta_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \theta_j + \sum_{i=1}^n P_{Di} = \\ &- \sum_{i=1}^n d_i \theta_i + \sum_{j=1}^n d_j \theta_j + P_D = P_D \end{aligned} \quad (13)$$

以上分析说明此算法满足供需平衡约束,因此不考虑功率约束的环境/经济调度问题可以通过以下无约束的优化算法来求解:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i(k+1) = \lambda_i(k) + 2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i) \\ \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\lambda_j(k) - \lambda_i(k)) + \left| P_{Gi}(k) + \frac{(\omega\beta_i + (1-\omega)b_i) - \lambda_i(k)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)} \right|^q \text{sign}(P_{Gi}(k) + \frac{(\omega\beta_i + (1-\omega)b_i) - \lambda_i(k)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}) \right) \\ \theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \lambda_i(k) \\ P_{Gi} = \sum_{j=1}^n a_{ij} (\theta_j - \theta_i) + P_{Di} \end{array} \right. \quad (14)$$

考虑到实际通信过程中受到噪声干扰时,上述一致性算法可以表示为如下形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i(k+1) = \lambda_i(k) + 2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i) \\ (c(k) \sum_{j=1}^n a_{ij} (\lambda_j(k) - \lambda_i(k)) + \xi_{ij}(k)) + \left| P_{Gi}(k) + \frac{(\omega\beta_i + (1-\omega)b_i) - \lambda_i(k)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)} \right|^q \text{sign}(P_{Gi}(k) + \frac{(\omega\beta_i + (1-\omega)b_i) - \lambda_i(k)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}) \\ \theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \lambda_i(k) \\ P_{Gi} = \sum_{j=1}^n a_{ij} (\theta_j - \theta_i) + P_{Di} \end{array} \right. \quad (15)$$

当考虑发电约束时根据式(6)和(8)可以得到:

$$\lambda^{**} = \lambda^* + \frac{\sum_{i \in \Omega_P} \left(\frac{\lambda^* - (\omega\beta_i + (1-\omega)b_i)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)} - P_{Gi}^{**} \right)}{\sum_{i \in \Omega_P} \frac{1}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}} \quad (16)$$

式中: λ^{**} 为考虑发电单元出力约束的一致性变量最优值; λ^* 为不考虑发电单元出力约束的一致性变量最优值;当考虑发电约束时,应用如下算法流程如图1所示来求解分布式经济调度问题。

1)使用分布式算法(15)计算每个独立发电单元的无约束一致性变量最优值 λ^* 和最优发电量 P_{Gi}^* 。

2)检查是否违反约束。如果 $P_{Gi}^{**} > P_{Gi}^{\max}$ 设 $P_{Gi} = P_{Gi}^{\max}$, 如果 $P_{Gi}^{**} < P_{Gi}^{\min}$ 设 $P_{Gi} = P_{Gi}^{\min}$ 。 Ω_P 表示超过发电功率约束的发电单元的集合,其发电量被设定为最优分配的极限。引入两个辅助变量 y_i 和 z_i ,进行赋值迭代计算。

$$y_i = \begin{cases} \frac{\lambda^* - (\omega\beta_i + (1-\omega)b_i)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)} - P_{Gi}^{**}, & i \in \Omega_P \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

$$z_i = \begin{cases} \frac{1}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)}, & i \notin \Omega_P \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

噪声影响下辅助变量的一致性迭代规则为:

$$y_i(k+1) = y_i(k) + c(k) \sum_{j=1}^n a_{ij} (y_j(k) - y_i(k) + \xi_{ij}(k)) \quad (19)$$

$$z_i(k+1) = z_i(k) + c(k) \sum_{j=1}^n a_{ij} (z_j(k) - z_i(k) + \xi_{ij}(k)) \quad (20)$$

根据平均一致性理论, y_i 和 z_i 在有限时间内趋向于^[15]:

$$y_i \rightarrow \frac{1}{n} \sum_{i \in \Omega_P} \left(\frac{\lambda^* - (\omega\beta_i + (1-\omega)b_i)}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)} - P_{Gi}^{**} \right) \quad (21)$$

$$z_i \rightarrow \frac{1}{n} \sum_{i \in \Omega_P} \frac{1}{2(\omega\gamma_i + (1-\omega)c_i)} \quad (22)$$

因此,功率约束下的最优一致性变量可用如下公式计算:

$$\lambda^{**} = \lambda^* + \frac{y_i}{z_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

3)再次将发电单元发出功率与各自出力约束进行比较,如果存在最优发电量违反容量约束的发电单元,则让 $\lambda = \lambda^{**}$ 转到步骤2),否则结束。

3 仿真研究

为了验证文中所提出的完全分布式调度策略的有效性和鲁棒性,本文中选择了IEEE10机39节点系统在以下四种场景中进行了仿真分析。由于本文的研究目标是使总发电成本和污染物排放量最小,所以仿真系统中使用的发电

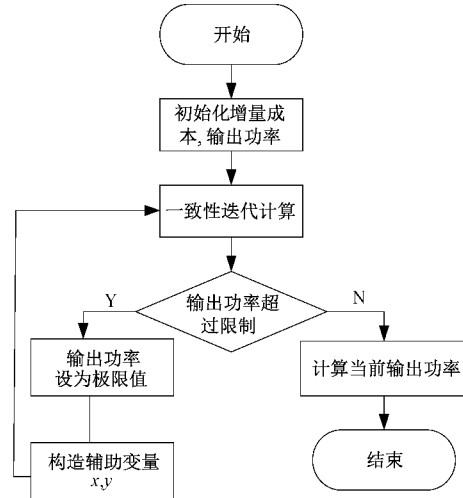


图1 一致性调控流程

单元为燃气发电机,即 $G_1 \sim G_{10}$ 。表示燃气发电机,在网络中用通信节点1~10进行表示,每个发电机都配备了一个控制器来与相邻的控制器进行信息交互,其通信拓扑如图2所示。场景1用来验证所提出的分布式经济调度策略在噪声影响下的有效性;场景2是验证系统在约束条件下的有效性;场景3验证本文的分布式调度策略是否适应时变负载的环境;场景4验证算法在链路故障情况下的鲁棒性。燃气发电机的参数如表1所示^[18]。

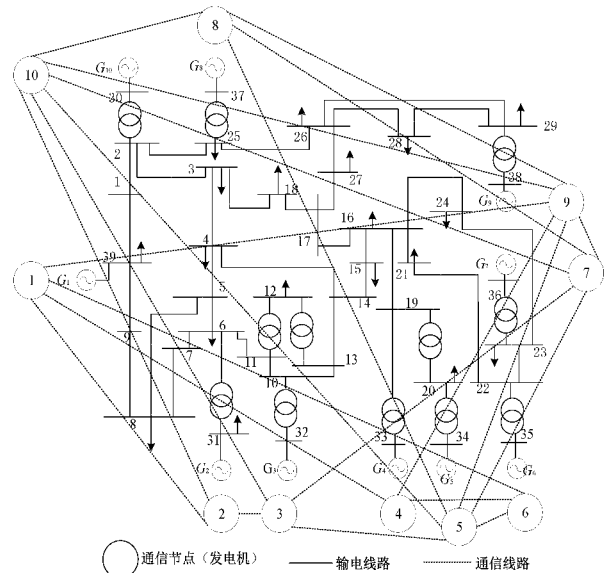


图2 10机39节点系统

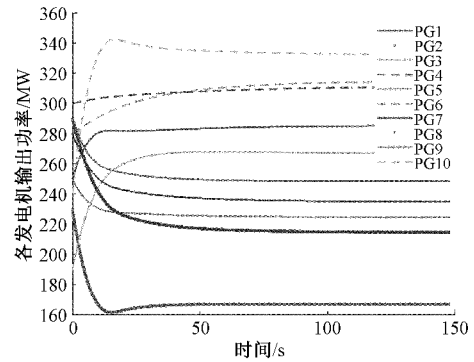
当通信过程受到噪声干扰时,取增益函数为 $c(k) = \frac{\ln(0.5k+1)}{0.5k+1}$, 设初始总负荷需求 $P_D = 2600$ MW, 权重系数 $\omega = 0.5$, 常数 $q = 0.5$ 。

场景1:噪声影响下算法的有效性验证

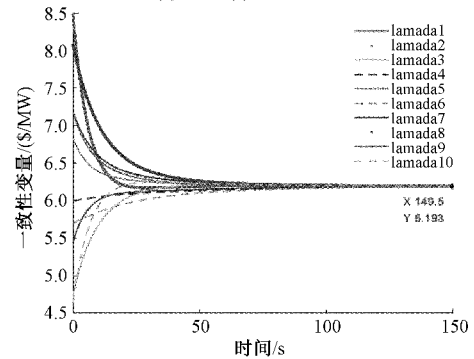
假设系统的通信过程受到服从正态分布为 $N[0, 10]$ 的高斯白噪声的影响,其仿真结果如图3所示。图3(a)和(b)显示

表 1 10 机 39 节点系统参数

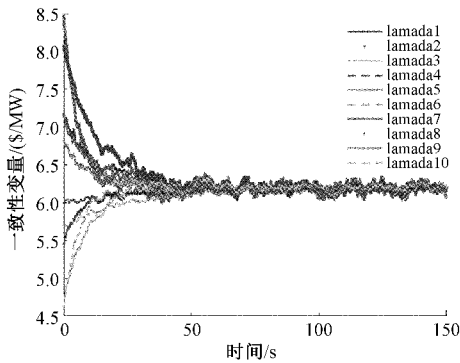
发电机	γ_i	β_i	c_i	b_i	$P_{Gi}(0)/$ MW	P_{Gi} [$P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$]
G_1	0.005	1.89	0.016	-1.5	250	[50,300]
G_2	0.005	5	2	-1.82	230	[50,300]
G_3	0.006	3.5	0.013	-1.249	190	[50,300]
G_4	0.005	3.15	0.012	-1.355	300	[50,300]
G_5	0.005	3.05	0.02	-1.9	250	[50,300]
G_6	0.007	2.75	0.007	0.805	280	[50,300]
G_7	0.007	3.45	0.015	-1.401	280	[50,300]
G_8	0.007	3.45	0.018	-1.8	290	[50,300]
G_9	0.005	2.45	0.019	-2	290	[50,300]
G_{10}	0.005	2.45	0.012	-1.36	240	[50,300]



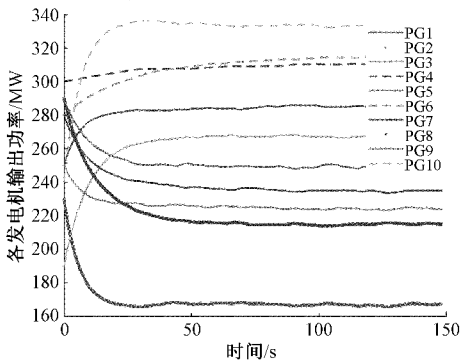
(d) 引入 $c(k)$ 后的发电功率



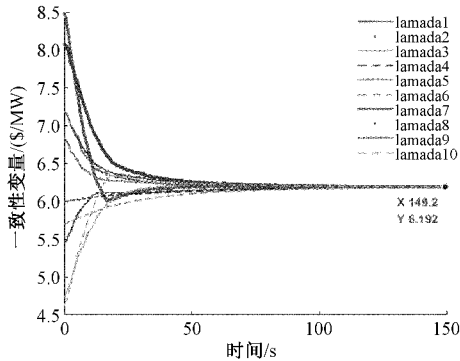
(e) 不含噪声的一致性变量



(a) 噪声对一致性变量的影响



(b) 噪声对发电单元输出功率的影响



(c) 引入 $c(k)$ 后的一致性变量

图 3 噪声影响下系统的有效性验证仿真

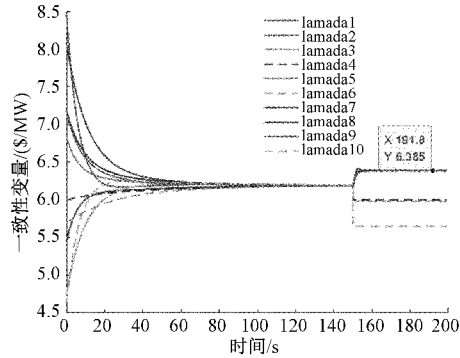
了在噪声的影响下,一致性变量的收敛和发电单元的功率输出波动较为明显。为了抑制噪声的干扰,在算法中引入增益函数 $c(k)$,其仿真结果如图 3(c)和(d)所示。通过对比图 3(a)和(c),图 3(b)和(d)可以发现,增益函数 $c(k)$ 的引入可以很好地抑制噪声对信息传输的干扰。

在图 3 中,图 3(e)和(c)分别为理想情况下和抑制噪声后的一致性变量,从仿真图 3(e)和(c)中可以发现,抑制噪声后的一致性变量的收敛值($\lambda^* = 6.192$ \$/MW)与理想情况下($\lambda^* = 6.193$ \$/MW)相比,仍然会出现一定的偏差。由于噪声的随机性和不确定性,并且算法使用一致性增益函数可以抑制噪声,但并不能完全消除噪声,所以噪声的存在还是会对系统造成一定影响。文献[13,16,19]引入了一致性变量收敛偏差公式,来说明使用增益函数抑制噪声后的一致性变量趋于理想情况下一致性变量一致的程度。本文所采用的分布式算法,虽然一致性变量的收敛值会存在一定的偏差,对发电单元的输出功率造成一定的影响,但都在允许的误差范围内,总体上一致性变量的收敛克服了噪声的影响,并在有限时间内达到了收敛,从而可以实现完全分布式环境/经济调度的优化控制。

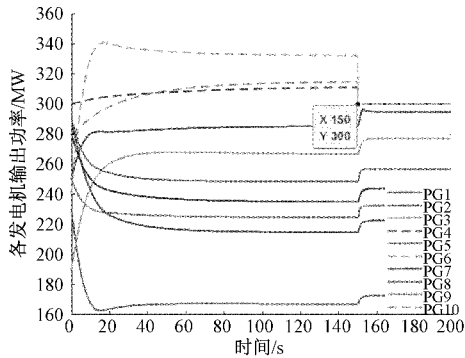
场景 2: 功率约束下仿真

图 4 为在噪声环境下,考虑功率约束的分布式调度结果。如图 4 所示,一致性变量可以从不同的初值收敛到一个稳定值,当 $t = 150$ s 时对功率约束进行判断。从图中可以看出发电单元 G_4 、 G_6 、 G_{10} 的输出功率大于其约束上限

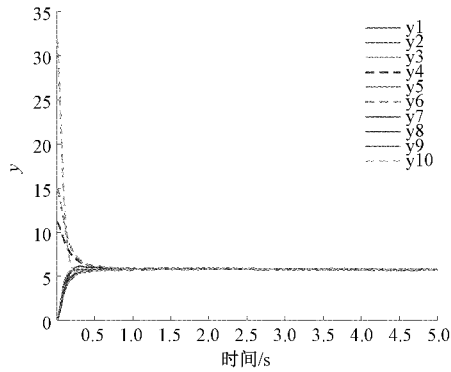
300 MW,因此其功率被迫调整 $PG_4 = PG_6 = PG_{10} = 300$ MW。其余7个发电单元重新进行调度,其满足的负荷需求变为1700 MW。图4(c)和(d)显示了辅助变量 y 和 z 分别在有限时间内达到平均一致性,由于 $\Omega_p = \{G_1, G_6, G_{10}\}$, 因此进行功率约束判断时, $y_4 = 11.121, y_6 = 14.933, y_{10} = 31.856$,



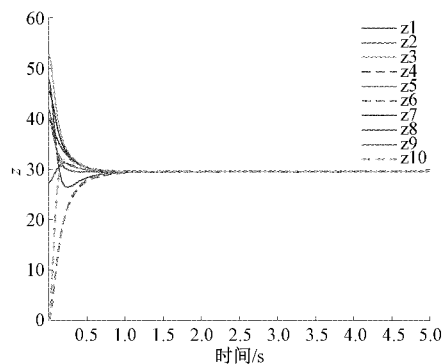
(a) 各发电单元的一致性变量



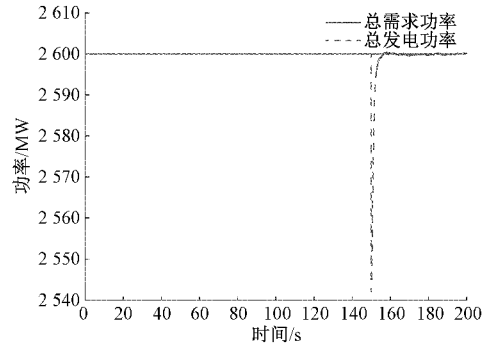
(b) 各发电单元的发电功率



(c) 辅助变量 y



(d) 辅助变量 z



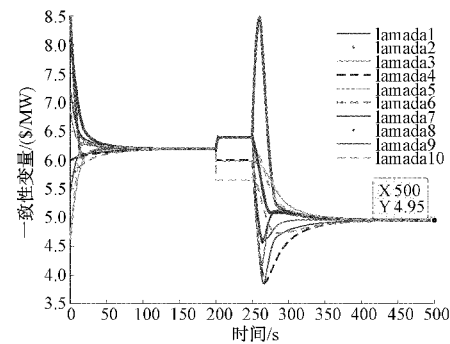
(e) 系统功率平衡

图4 功率约束下仿真

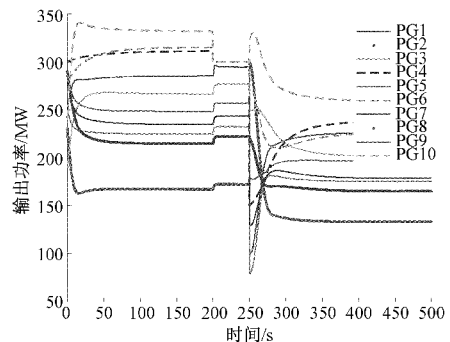
其余 y 值为 0; 而 $z_4 = z_6 = z_{10} = 0$, 其余 z 值不为 0。由式(23)可知, 功率约束下的最优增量成本 $\lambda^{**} = 6.385$ \$/MW, 验证了仿真结果的正确性。因此, 即使发电单元在功率约束的条件下, 本文分布式经济调度的一致性变量仍可以收敛到最优解。

场景3: 时变负载的仿真

为了验证所提分布式算法在负载波动时的有效性, 因此在本场景中假定总负荷需求 P_D 在 $t=250$ s 时由 2600 MW 变为 2000 MW, 仿真结果如图5所示。图5(a)~(c)显示了噪声干扰下的调度结果, 显然, 当负载发生变化时, 各发电单元在“打破”原有增量成本的一致性状态后, 能够重新进行信息交互与协调计算。经过一段时间的调整之后, 各发电单元的一致性变量达到了新的收敛值 $\lambda^{**} = 4.951$ \$/MW。由此可见, 本文的分布式控制策略能快速响应突发事件, 保证分布式能源系统的稳定运行。



(a) 各发电单元的一致性变量



(b) 各发电单元的发电功率

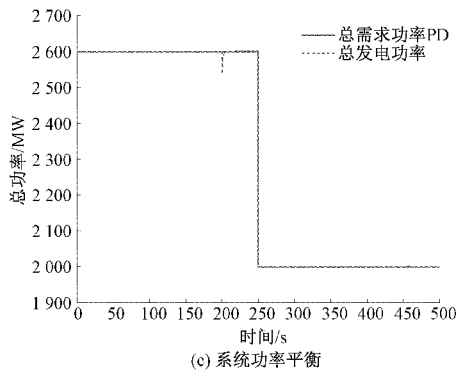
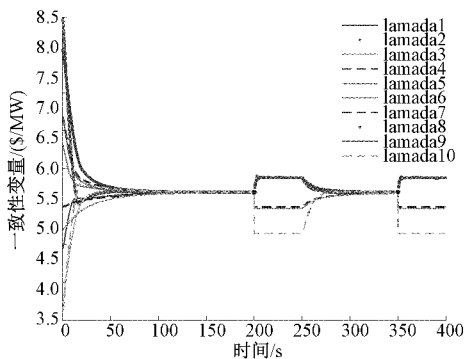


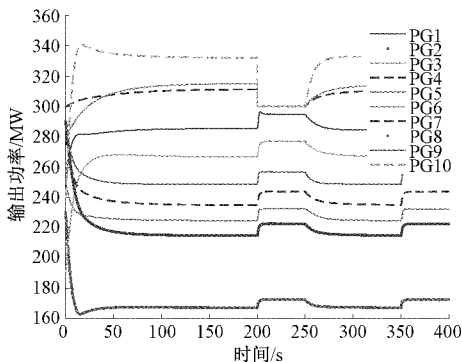
图 5 时变负载的仿真

场景 4: 链路故障的仿真

假设 $t=250\text{ s}$ 时, 发电单元 G_1 与 G_9 、 G_5 与 G_{10} 之间的通信链路因异常断开。链路故障场景下的仿真结果如图 6 所示。图 6(a)~(c) 为噪声干扰下的一致调度结果, 由图 6(a)~(c) 可知, 当通信链路出现故障时, 分布式发电单元经过短暂调整后, 一致性变量和输出功率均能恢复到原来的稳定状态。由于噪声的影响, 链路故障前的最优一致性变量收敛值 ($\lambda^* = 6.191\text{ \$/MW}$) 与链路故障恢复后的最优一致性变量收敛值 ($\lambda^* = 6.192\text{ \$/MW}$) 会有一点不同, 但在误差允许范围内并不影响经济调控的结果, 由此验证了所提算法对链路故障问题的鲁棒性。



(a) 各发电单元的一致性变量



(b) 各发电单元的发电功率

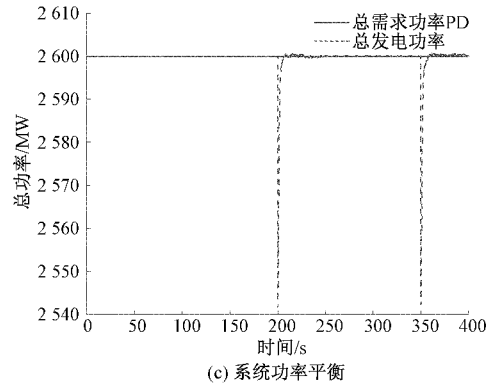


图 6 链路故障的仿真

4 结 论

本文基于多智能体一致性理论, 提出了一种考虑噪声影响和环境因素的完全分布式算法, 并将其应用到微电网的环境/经济调度问题中。通过理论分析和实例仿真研究表明, 本文所设计的完全分布式调度策略不需要收集全局功率偏差, 一致性变量可以在有限时间内实现收敛。将增益函数引入到一致性算法中, 可以有效地抑制噪声给信息传输造成的干扰, 并通过仿真验证了此算法的有效性和鲁棒性。因此, 本文所提出的分布式一致性调度策略可以很好的适应分布式能源系统, 能够保证微电网经济稳定运行, 适应未来电网的发展, 具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 李世伟. 交直流混合微网分布式协同控制研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- [2] 肖琦敏, 方志坚, 孙浩淞, 等. 含分布式电源的智能电网负荷预测研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2): 77-82.
- [3] 乐健, 周谦, 赵联港, 等. 基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 44-54.
- [4] 刘志坚, 王旭辉, 郑超铭. 计及可再生能源发电成本的智能电网分布式经济调度[J]. 电子测量技术, 2020, 43(2): 84-90.
- [5] ELSAYED, WAEL T, EL S, et al. A fully decentralized approach for solving the economic dispatch problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2179-2189.
- [6] BINETTI G, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed consensus-based economic dispatch with transmission losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1711-1720.
- [7] WEN G, YU X, LIU Z W, et al. Adaptive consensus-based robust strategy for economic dispatch of smart

- grids subject to communication uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2484-2496.
- [8] YANG S, TAN S, XU J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4416-4426.
- [9] TANG Z, HILL D J, LIU T. A novel consensus-based economic dispatch for microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4):3920-3922.
- [10] HE Y, WANG W, WU X. Multi-agent based fully distributed economic dispatch in microgrid using exact diffusion strategy [J]. IEEE Access, 2020, 8: 7020-7031.
- [11] HE X, ZHAO Y, HUANG T. Optimizing the dynamic economic dispatch problem by the distributed consensus-based ADMM approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3210-3221.
- [12] 杨思, 李雪亮, 贾善杰, 等. 计及环境因素的智能电网分布式经济调度策略[J]. 电器与能效管理技术, 2017(16):57-65.
- [13] 张梦凡, 王冠中, 史涔激, 等. 考虑通信噪声的电力系统分布式经济调度[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2293-2300.
- [14] 丁世宏, 李世华. 有限时间控制问题综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 161-169.
- [15] CHEN G, LEWIS F L, FENG E N, et al. Distributed optimal active power control of multiple generation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11):7079-7090.
- [16] 徐豪, 张孝顺, 余涛. 非理想通信网络条件下的经济调度鲁棒协同一致性算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14):15-24,57.
- [17] LIU S, XIE L, ZHANG H. Consensus protocols for multi-agent systems with delays and noises in transmission channels[J]. Automatica, 2011, 47(5): 920-934.
- [18] MOSTAFA, MODIRI D, NASRUDIN, et al. Multi-objective backtracking search algorithm for economic emission dispatch problem [J]. Applied Soft Computing, 2016, 40:479-494.
- [19] 张泽宇. 基于多智能体一致性协同理论的智能配电网自动发电控制方法[D]. 广州:华南理工大学,2016.

作者简介

何玉钧,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为电力系统多智能体分布式经济调度与通信系统。

E-mail:51551098@ncepu.edu.cn

魏克俭(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为电力系统多智能体分布式经济调度与通信系统。

E-mail:1392595384@qq.com

张倩,硕士研究生,主要研究方向为电力系统多智能体分布式调度与通信系统。

E-mail:3292135182@qq.com