doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202502003

变拓扑结构下有限时间事件触发微电网分布式经济调度

王鸿志,李慧媛,夏菽兰,徐　涛,耿　伟
(盐城工学院 电气工程学院,江苏 盐城　224051)

摘要:针对切换拓扑结构下的经济调度问题,提出一种基于事件触发的分布式有限时间一致性算法。该算法仅基于部分发电机信息,在满足微电网供需平衡和发电机输出功率的约束下,通过辅助变量约束发电机输出功率,使发电总成本最小;最后,通过MATLAB平台搭建微电网系统模型进行仿真验证,结果表明所设计的控制协议不仅有效减轻了系统通讯负担,而且以更快的收敛速度和更好的抗干扰性能,实现微电网的经济调度。

关键词:经济调度;事件触发;有限时间一致性;分布式控制
中图分类号:TM73　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2025)02-0016-06

近年来,随着全球经济的不景气,因调度不足导致我国电能利用率较低,资源浪费严重的问题越来越突出。加强经济调度保障电能质量和电力系统的经济运行是非常必要的,也是切实可行的。电力系统的调度通常包括集中式和分布式两种。传统电力系统的调度大多采用集中式调度[1-2],其特点是调度时需要利用全局信息,而因单点故障风险、性能瓶颈、灵活性不足等问题,又很难获取电网的全局信息。分布式调度无需依赖全局信息,仅利用邻近发电机的信息即可实现全局协调[3-4],从而显著提升了系统的鲁棒性。

尽管目前微电网分布式经济调度已有不少研究成果,但仍存在一些问题。一方面,现有研究所述的分布式经济调度[5],其通信拓扑结构通常是固定不变的,而实际应用中,由于发电机通信线路故障、外部干扰等不确定因素的影响,微电网的网络拓扑结构往往会发生变化;另一方面,大多数分布式经济调度方法均呈现时间的渐进收敛特性,收敛速度相对较慢,无法满足快速调度的需要。与此同时,在智能控制领域,事件触发机制作为一种新的节能控制机制,在多智能体领域有着广泛应用[6-7]。在事件触发机制下,只有当系统误差超过某一预设阈值时,才会触发通信或控制器的更新,从而大幅减少通信资源的浪费。

针对以上分析,本文基于多智能体一致性算法,提出一种微电网分布式事件触发有限时间的经济调度方法。首先,建立微电网经济调度模型;其次,基于事件触发有限时间一致性算法,对微电网经济调度模型进行求解;最后,通过数值分析验证了所提出的分布式事件触发有限时间经济调度方法的有效性。

1　经济调度问题描述

根据发电机的输出功率,建立微电网经济调度中第i个发电机发电成本的模型为

$$C_i\left(P_i(t)\right)=\alpha_i P_i^2(t)+\beta_i P_i(t)+\gamma_i,\ i\in\{1,2,\cdots,n\} \tag{1}$$

式中:$P_i(t)$为第i台发电机的输出功率;$C_i(P_i(t))$为第i台发电机的发电成本;$\alpha_i>0$、$\beta_i>0$、$\gamma_i>0$为第i台发电机的发电成本系数;n为微电网中发电机的数量;t为连续时间。

收稿日期:2024-12-10
基金项目:江苏省研究生实践创新计划项目(KYCX24_XY012);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(23KJB120015)。

作者简介:王鸿志(1998—),男,江苏南京人,硕士生,主要研究方向为智能电网经济调度。
通信作者:李慧媛(1991—),女,江苏盐城人,讲师,博士,主要研究方向为神经网络动力学控制、智能电网优化与控制等。

在微电网供需平衡和发电机输出功率约束下，微电网经济调度问题可描述为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^{n} C_i\left(P_i(t)\right) \\ \text{s.t} \sum_{i=1}^{n} P_i(t) = P_{\mathrm{D}} \\ P_i^{\min} \leqslant P_i(t) \leqslant P_i^{\max} \end{cases} \tag{2}$$

式中：P_{D}为总功率；$P_i^{\min}$为第i台发电机的最小输出功率；$P_i^{\max}$为第i台发电机的最大输出功率。

2　算法设计

由传统的集中式拉普拉斯乘子法可知，当多个发电机增量成本一致时，发电机的总成本最小。因此，本文基于多智能体一致性算法，以发电机的增量成本为一致性变量，设计分布式事件触发控制协议，并构建固定切换的网络拓扑结构。第i台发电机的增量成本模型为

$$\dot{\lambda}_i(t) = u_i\left(t, \sigma(t)\right) \tag{3}$$

式中：$\dot{\lambda}_i(t) \in R^n$为第$i$台发电机增量成本的导数，$R^n$为$n$维向量空间；$\sigma(t)$为动态通信拓扑结构的切换信号，取值于有限集合$Z=\{1,2,\cdots,F\}$，其中$F$为预设的拓扑结构总数；$u_i(t,\sigma(t)) \in R^n$为基于发电机$i$邻居信息的分布式事件触发控制协议。

分布式事件触发控制协议$u_i\left(t,\sigma(t)\right)$可以描述为

$$u_i\left(t,\sigma(t)\right) = -m\alpha_i \mathrm{sig}\Big(\sum_{j\in N_i} a_{ij}^{\sigma(t)}\left(\lambda_i(t_k^i) - \lambda_j(t_q^j)\right)\Big)^{\theta} \tag{4}$$

式中：m为控制增益；$\mathrm{sig}(x)^{\theta} = [\mathrm{sign}(x_1)|x_1|^{\theta}, \mathrm{sign}(x_2)|x_2|^{\theta}, \cdots, \mathrm{sign}(x_n)|x_n|^{\theta}]^{\mathrm{T}}$；$a_{ij}^{\sigma(t)}$为发电机$i$和发电机$j$之间的邻接权重；$N_i$为第$i$台发电机邻居集合；$t_k^i$和$t_q^j$分别为发电机$i$和发电机$j$的最新事件触发时刻；$\theta \in (0,1)$。

以发电机i为例，下一次事件的触发时刻t_{k+1}^i可以描述为

$$t_{k+1}^i = \min\left\{t : t > t_k^i \text{ 且 } f_i\left(t,\sigma(t)\right) > 0\right\} \tag{5}$$

式中：$f_i(t,\sigma(t))$表示第i个发电机的事件触发函数。

对于$t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$，定义第i台发电机的状态测量误差为$e_i(t) = \lambda_i(t_k^i) - \lambda_i(t)$，则事件触发函数为

$$f_i\left(t,\sigma(t)\right) = \left|E_i^{\sigma(t)}(t)\right| - k_i\left|y_i^{\sigma(t)}(t)\right| \tag{6}$$

式中：$E_i^{\sigma(t)}(t) = -\sum_{j\in N_i} a_{ij}^{\sigma(t)}\left(e_i(t) - e_j(t)\right)$，

$$y_i^{\sigma(t)}(t) = -\sum_{j\in N_i} a_{ij}^{\sigma(t)}\left(\lambda_i(t) - \lambda_j(t)\right)。$$

在式(4)分布式事件触发控制协议作用下，式(3)的增量成本可以达到有限时间一致性。证明如下：

首先，设置$\sigma(t)=s, s\in\{1,2,\cdots,F\}$；$\boldsymbol{M}^s = \boldsymbol{L}^s(\boldsymbol{I}+K)$，其中$\boldsymbol{L}^s$是拓扑图的拉普拉斯矩阵，$K=\mathrm{diag}(k_1^{\theta}, k_2^{\theta}, \cdots, k_n^{\theta})$，$\boldsymbol{I}$表示单位矩阵。从而构造矩阵

$$\boldsymbol{P}^s = \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{M}^s + (\boldsymbol{M}^s)^{\mathrm{T}}\right) \tag{7}$$

根据构造的矩阵$\boldsymbol{P}^s$，进一步令

$$k = \min_{\delta\in\Lambda, s\in Z} \boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^s\boldsymbol{\delta},\ k' = \frac{k(m\boldsymbol{\alpha})^2}{\left(\frac{m\boldsymbol{\alpha}}{1+\theta}\right)^{\frac{2\theta}{1+\theta}}},$$

式中：$\Lambda = \{\boldsymbol{\delta}\in\boldsymbol{R}^n : \boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\delta}=1, \boldsymbol{\zeta}\perp\boldsymbol{I}, \boldsymbol{\delta}=m\boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\zeta}|^{\theta}\}$，$\boldsymbol{I}=[1,1,\cdots,1]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\alpha}=[\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\zeta}$是一个$n$维实向量，即$\boldsymbol{\zeta}=[\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_n]^{\mathrm{T}}$。

其次，通过构造Lyapunov函数$V^s(t) = \sum_{i=1}^{n}\frac{m\alpha_i}{1+\theta}|y_i^s(t)|^{1+\theta}$，推导出$\mathrm{d}V^s(t)/\mathrm{d}t \leqslant -k'V^s(t)^{2\theta/(1+\theta)}$。

最后，基于有限时间的Lyapunov稳定性理论和有限时间一致性理论，可知微电网可以在有限时间$T(\lambda_0) = [(1+\theta)V^s(0)^{(1-\theta)/(1+\theta)}]/\left(k'(1-\theta)\right)$内实现经济调度。

3　发电机功率约束调整

由上可知，在式(4)的分布式事件触发控制协议下，式(3)的发电机增量成本在有限时间$T(\lambda_0)$内达到一致性。但是式(4)的分布式事件触发控制协议并未考虑发电机输出功率约束，因而需要在增量成本达到一致性之后引入辅助变量对发电机的输出功率进行修正。

选取辅助变量$\varphi_i(t,\sigma(t))$和$\phi_i(t,\sigma(t))$作为一致性变量，建立辅助变量模型为

$$\dot{\varphi}_i(t,\sigma(t)) = -m\alpha_i \mathrm{sig}\Big(\sum_{j\in N_i} a_{ij}^{\sigma(t)}\left(\varphi_i(t) - \varphi_j(t)\right)\Big) \tag{8}$$

$$\dot{\phi}_i(t,\sigma(t)) = -m\alpha_i \mathrm{sig}\Big(\sum_{j\in N_i} a_{ij}^{\sigma(t)}\left(\phi_i(t) - \phi_j(t)\right)\Big) \tag{9}$$

当发电机增量成本达到一致性时，令$\lambda_1(t) = \lambda_2(t) = \cdots = \lambda_n(t) = \lambda^*$，此时发电机的输出功率为

$$P_i(t) = (\lambda^* - \beta_i)/(2\alpha_i)$$

令$P_i(t) > P_i^{\max}$时，$P_i^* = P_i^{\max}$；$P_i(t) < P_i^{\min}$时，$P_i^* = P_i^{\min}$。当发电机增本成本达到一致性时，设置的两个辅助变量初始值分别为：

$$\varphi_i(t)=\begin{cases}\dfrac{\lambda^*-\beta_i}{2\alpha_i}-P_i^*, P_i(t)\notin[P_i^{\min},P_i^{\max}]\\ 0, \quad P_i(t)\in[P_i^{\min},P_i^{\max}]\end{cases}, \tag{10}$$

$$\phi_i(t)=\begin{cases}0, \quad P_i(t)\notin[P_i^{\min},P_i^{\max}]\\ \dfrac{1}{2\alpha_i}, \quad P_i(t)\in[P_i^{\min},P_i^{\max}]\end{cases}。 \tag{11}$$

运用辅助变量更新发电机的增量成本,得到 $\lambda_i(t)=\lambda^*+\varphi_i(t)/\phi_i(t)$;再通过增量成本计算发电机的输出功率 $P_i(t)=(\lambda_i(t)-\beta_i)/(2\alpha_i)$。当发电机输出功率 $P_i(t)>P_i^{\max}$ 时,令 $P_i(t)=P_i^{\max}$;当发电机输出功率 $P_i(t)<P_i^{\min}$ 时,令 $P_i(t)=P_i^{\min}$;当发电机输出功率 $P_i^{\min}\leqslant P_i(t)\leqslant P_i^{\max}$ 时,则发电机功率输出不变。

4 算例仿真与分析

4.1 拓扑结构周期固定切换算例

IEEE30 节点标准电力网络如图 1 所示。6 台发电机总需求功率 P_D=180 MW,输出功率初始值分别为 $P_1(0)$=30 MW、$P_2(0)$=40 MW、$P_3(0)$=30 MW、$P_4(0)$=30 MW、$P_5(0)$=40 MW、$P_6(0)$=10 MW,第 i 台发电机的发电成本系数 α_i、β_i、γ_i 的取值和输出功率限制值如表 1 所示。

根据发电机增量成本计算公式 $\lambda_i=\mathrm{d}C_i(P_i(t))/\mathrm{d}P_i=2\alpha_iP_i+\beta_i$,可得 6 台发电机增量成本初值分别为 $\lambda_1(0)$=6.86 $/MW、$\lambda_2(0)$=9.65 $/MW、$\lambda_3(0)$=8.83 $/MW、$\lambda_4(0)$=8.94 $/MW、$\lambda_5(0)$=9.09 $/MW、$\lambda_6(0)$=5.20 $/MW;辅助变量 $\varphi_i(t)$ 初始值分别为 $\varphi_1(2.64)=0$、$\varphi_2(2.64)=0$、$\varphi_3(2.64)=0$、$\varphi_4(2.64)=0$、$\varphi_5(2.64)=0$、$\varphi_6(2.64)=8.094$,$\phi_i(t)$ 初始值分别为 $\phi_1(2.64)=5.32$、$\phi_2(2.64)=6.41$、$\phi_3(2.64)=4.76$、$\phi_4(2.64)=6.10$、$\phi_5(2.64)=6.76$、$\phi_6(2.64)=0$;系数 m=20,k=[2.5,5,3.3,1,4,1],θ=99/101。

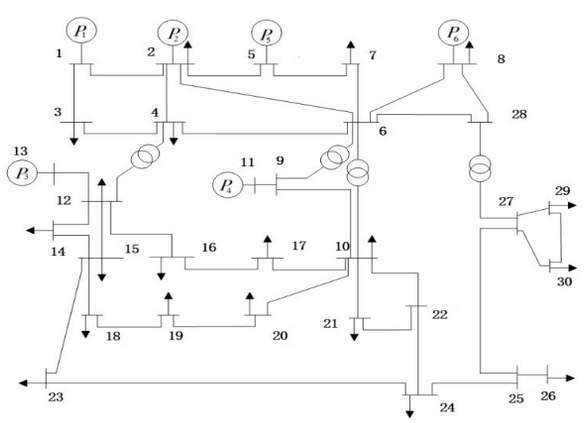


图 1 IEEE 30 节点标准电力网络

Fig. 1 IEEE 30-node standard power network

表 1 发电机参数

Table 1 Generator parameters

发电机 i	α_i/($·(MW²)⁻¹)	β_i/($·(MW²)⁻¹)	γ_i/$	$P_i^{\min}$/MW	$P_i^{\max}$/MW
1	0.094	1.22	51	0	60
2	0.078	3.41	31	20	75
3	0.105	2.53	78	15	40
4	0.082	4.02	42	10	60
5	0.074	3.17	62	15	60
6	0.080	3.60	56	0	20

采用周期性切换信号对拓扑结构的变化进行描述,定义切换信号 $\sigma(t)$ 取有限集 $Z=\{1,2,\cdots,F\}$ 中的值,并设置 F=4,切换周期为 T,得到通信网络拓扑结构如图 2 所示。

根据图 2 中的通信拓扑结构,可以得到 4 种拓扑结构的邻接矩阵,分别为:

$$\boldsymbol{L}^1=\begin{bmatrix}0&1&0&1&0&0\\1&0&1&0&1&0\\0&1&0&0&0&1\\1&0&0&0&1&0\\0&1&0&1&0&1\\0&0&1&0&1&0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{L}^2=\begin{bmatrix}0&1&0&1&0&0\\1&0&1&0&1&1\\0&1&0&0&0&1\\1&0&0&0&1&0\\0&1&0&1&0&1\\0&1&1&0&1&0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{L}^3=\begin{bmatrix}0&1&0&1&0&0\\1&0&1&0&0&1\\0&1&0&0&0&1\\1&0&0&0&1&0\\0&0&0&1&0&1\\0&1&1&0&1&0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{L}^4=\begin{bmatrix}0&1&0&1&0&0\\1&0&1&0&1&0\\0&1&0&0&0&1\\1&0&0&0&1&0\\0&1&0&1&0&1\\0&0&1&0&1&0\end{bmatrix}。 \tag{12}$$

本文周期性变拓扑结构算法如下:

Initialization:最大时间 Tmax>0,切换周期 T>0,总模态数 F>0;

for n=0:1:floor(Tmax/(F*T))%表示在 Tmax 时间内可以容纳多少个完整的模态周期组;

if t≥n*F*T&&t<(n+1)*F*T%,检查当前时间 t 是否在第 n 个模态周期组的时间范围内;

for i=1:1:F

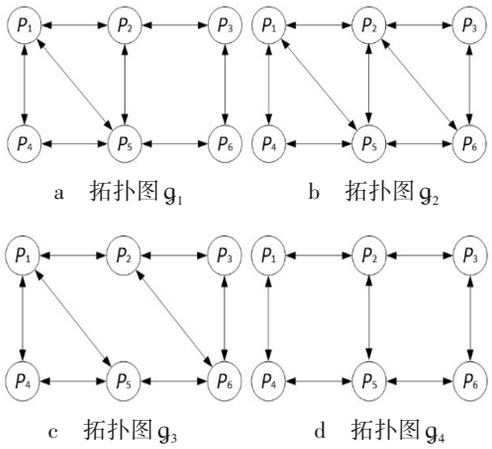


图 2　通信网络拓扑结构

Fig. 2　Communication network topology

```
    j=j+1;
    sigma(j)=i;
end end end
```

在上述算法中，设置时间总长 T_{max}=4 s、切换周期 T=2 s，则周期性变拓扑结构的切换信号如图 3 所示。

由图 3 可以看出，本文周期性变拓扑结构算法可以使拓扑结构在拓扑图 $\mathcal{G}_1$、$\mathcal{G}_2$、$\mathcal{G}_3$ 和 $\mathcal{G}_4$ 之间进行周期性的切换。

基于上述参数设置，利用辅助变量和有限时间一致性经济调度算法，更新第 i 台发电机的增量成本 $\lambda_i(t)$，并计算微电网实现经济调度的时间 $T(\lambda_0)$=5. 71 s；通过 MATLAB 软件进行数值仿真，得到增量成本的状态轨迹如图 4 所示。

由图 4 可知，在有限时间内 t=2. 64 s 时，增量成本达到一致性，此时 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=\lambda_4=\lambda_5=\lambda_6$=8. 10 $/MW。

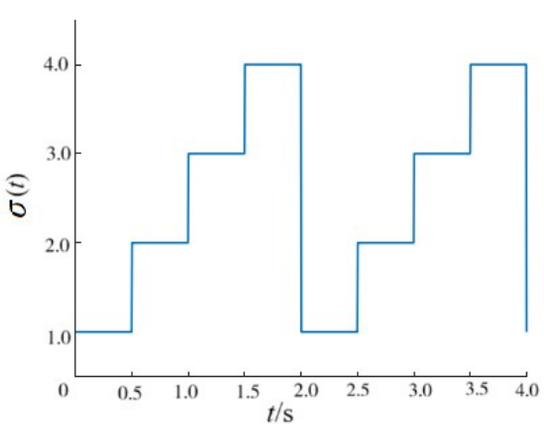


图 3　周期性变拓扑结构的切换信号

Fig. 3　Switching signals for periodically variable topology structures

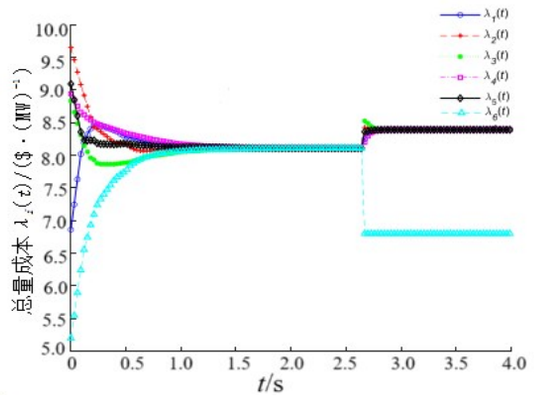


图 4　增量成本

Fig. 4　Incremental cost

当发电机增量成本达到一致性时，6 台发电机输出功率分别为 P_1=36. 60 MW、P_2=30. 06 MW、P_3=26. 52 MW、P_4=24. 88 MW、P_5=33. 31 MW、P_6=28. 13 MW。对照表 1 发电机参数，不难看出 P_6=28. 13 MW 已经超出了发电机 6 的输出功率限制。因此在 t=2. 64 s 后，需要引入辅助变量以调整增量成本。

引入辅助变量后经调整的增量成本状态轨迹如图 4 所示。由图 4 可知，在引入辅助变量后，增量成本最终被调整为 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=\lambda_4=\lambda_5$=8. 38 $/MW、$\lambda_6$=6. 80 $/MW，此时 6 台发电机的输出功率分别为 P_1=38. 09 MW、P_2=31. 86 MW、P_3=27. 86 MW、P_4=26. 59 MW、P_5=35. 20 MW、P_6=20 MW，满足表 1 的发电机输出功率的最大最小值限制约束，并且发电机的总输出功率和总需求功率是满足供需平衡约束的。

在有限时间事件触发一致性经济调度算法下，各发电机控制信息传输的事件触发时刻如图 5 所示。图 5 表示了在 0~3 s 内发电机 1~6 的控制协议的事件触发次数，由此可见控制协议只在离散的时刻进行更新，这直接减少了通信次数和降低了平均带宽需求和能量消耗，从而有效节省通信资源和提高控制效率。

引入辅助变量前后发电机总发电成本的变化情况如图 6 所示。从图 6 可以看出，未考虑发电机约束时，在 t=2. 64 s 时发电机总成本降到最低；在 t=2. 64 s 引入辅助变量，将发电机 6 输出功率调整至最大输出功率后，总成本出现下降情况，但发电机不再满足供需平衡的约束；在对发电机输出功率继续调整后，在 t=3. 04 s 时辅助变量达到一致性，各发电机满足输出功率约束，总成本趋于稳定。

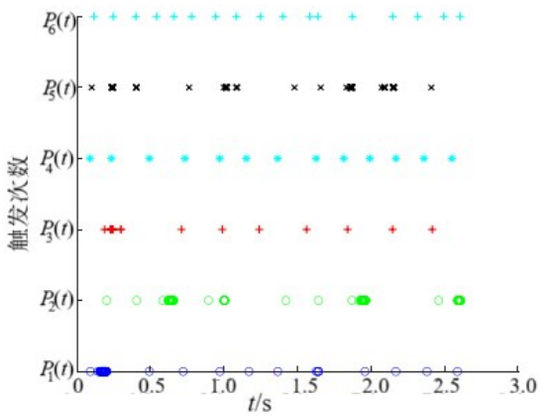


图 5　事件触发次数

Fig. 5　Event triggering times

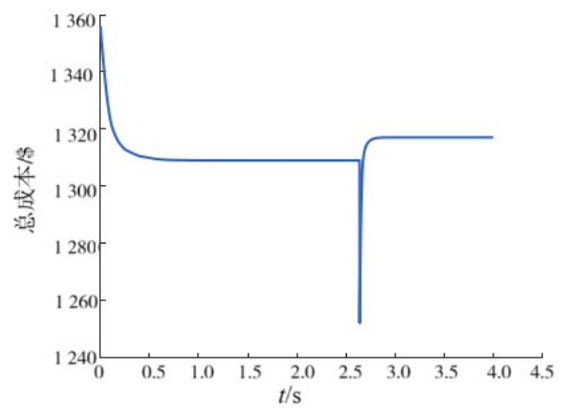


图 6　总发电成本

Fig. 6　Total power generation cost

4.2　拓扑结构非周期随机切换算例

图 7 为 IEEE14 节点标准电力网络，对图 7 中 5 台发电机进行数值仿真。5 台发电机总功率需求 P_D=170 MW，其他参数与表 1 中前 5 台发电机参数相同，即总功率需求 P_D=170 MW，发电机输出功率初始值 $P_1(0)$=30 MW、$P_2(0)$=40 MW、$P_3(0)$=30 MW、$P_4(0)$=30 MW、$P_5(0)$=40 MW。

考虑通信网络拓扑结构切换的随机性，采用马尔可夫链对 $\sigma(t)$ 进行描述，设计随机网络拓扑结构如图 8 所示，马尔可夫切换信号如图 9 所示。

在用马尔可夫链对 $\sigma(t)$ 进行描述时，$\sigma(t)$ 取有限集 $Z=\{1,2,\cdots,F\}$ 中的值，状态转换概率矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}=[\lambda_{pq}]_{F\times F}$，$P\{\sigma(t+\Delta t)=q|\sigma(t)=p\}=\lambda_{pq}$，其中 $0\leqslant\lambda_{pq}\leqslant 1$，$\sum_1^F\lambda_{pq}=1$，$p,q\in Z$。

当设置 F=2 时，状态转换概率矩阵为

$$\boldsymbol{\Lambda}=\begin{bmatrix}0.95 & 0.05\\ 0.05 & 0.95\end{bmatrix}$$

根据图 8 中的通信拓扑结构，可以得出邻接

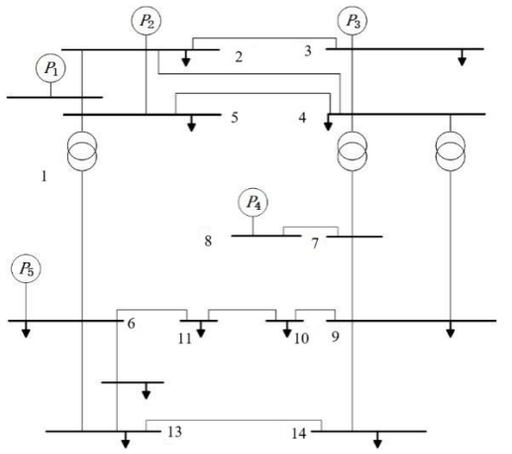
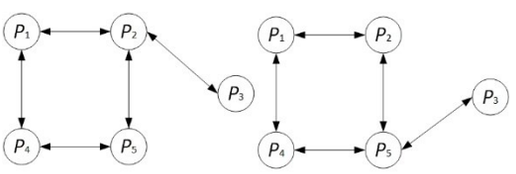


图 7　IEEE 14 节点标准电力网络

Fig. 7　IEEE 14-node standard power network



a 拓扑图 $\mathcal{G}_1$　　b 拓扑图 $\mathcal{G}_2$

图 8　通信网络拓扑结构

Fig. 8　Communication network topology

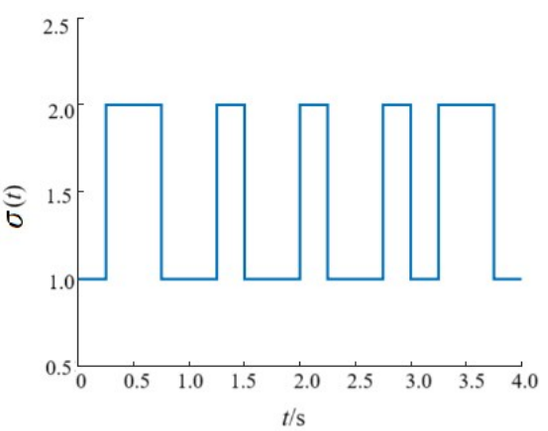


图 9　马尔可夫切换信号

Fig. 9　Markovian switching signal

矩阵为

$$\boldsymbol{L}^1=\begin{bmatrix}0&1&0&1&0\\1&0&1&0&1\\0&1&0&0&0\\1&0&0&0&1\\0&1&0&1&0\end{bmatrix}、\boldsymbol{L}^2=\begin{bmatrix}0&1&0&1&0\\1&0&0&0&1\\0&0&0&0&1\\1&0&0&0&1\\0&1&1&1&0\end{bmatrix}\tag{13}$$

通过计算，得到 $T(\lambda_0)$=4.712 s；通过 MATLAB 数值仿真，得到各发电机增量成本的状态轨迹如图 10 所示，总成本如图 11 所示。由图 10 可知，在 t=1.85 s 时，增量成本达到一致性，即

$\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=\lambda_4=\lambda_5=8.73$ \$/MW。此时，发电机输出功率分别为 $P_1=39.96$ MW、$P_2=34.12$ MW、$P_3=29.54$ MW、$P_4=28.74$ MW、$P_5=37.58$ MW，均满足表 1 发电机输出功率最大最小值的限制约束，且发电机的总输出功率和总需求功率也是满足供需平衡约束的。从图 11 可以看出，发电机总成本逐渐下降，并很快达到稳定值。

为了验证本文算法的优越性，对 4.1、4.2 节的算例，在相同的拓扑结构和发电机参数下按文献[8]、[9]的方法进行仿真，得到本文方法与文献[8]、[9]方法收敛时间的比较，如表 3 所示。由表 3 可知，与文献[8]、[9]相比，本文算法可以显著加快收敛速度。

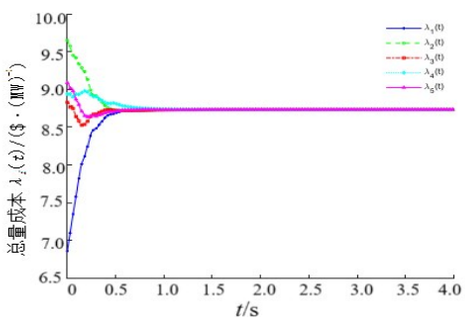


图 10　各发电机的增量成本

Fig. 10　Incremental cost of each generator

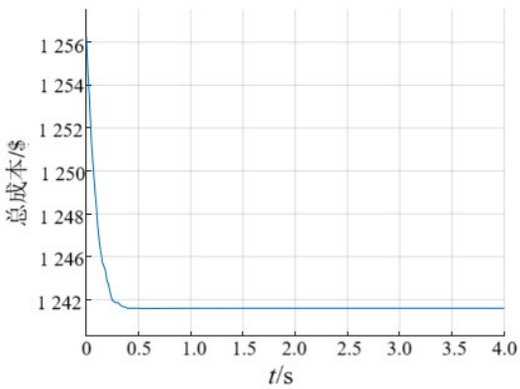


图 11　发电机总发电成本

Fig. 11　The total power generation cost of the generator

表 3　收敛时间对比

Table 3　Convergence time comparison

对比参数	收敛时间/s
算例 4.1	2.64
算例 4.2	1.85
文献[8]	18.5
文献[9]	4.33

5　结 论

基于多智能体一致性理论，针对微电网的经济调度问题，在切换的网络通信拓扑结构下，提出了有限时间一致性的分布式事件触发控制协议。通过设置辅助变量，使得发电机输出功率在满足功率约束的情况下，发电总成本最小。最后，通过软件仿真证明所设计的控制协议能够实现微电网的经济调度问题。研究说明，本文设计的分布式事件触发有限时间经济调度控制策略具有以下优势：

1）发电机的增量成本可以在通信网络拓扑切换下实现有限时间收敛；

2）仅利用局部信息交互即可实现经济调度，比集中式经济调度灵活性更强。

在微电网经济调度的后续研究中，我们将充分考虑时延、网络攻击等因素对复杂干扰下微电网分布式经济调度问题的影响。

参考文献：

[1] 刘廷章，张子恒．基于循环迭代粒子群算法对电动汽车无线充电系统的联合参数在线辨识[J]．电工技术学报，2022，37(18)：4548-4564.

[2] 吴熙，陆瑶，蔡晖，等．计及风电不确定性的含线间潮流控制器的电力系统经济调度[J]．电工技术学报，2023，38(3)：781-792.

[3] 何玉钧，魏克俭，张倩．考虑噪声和环境的微电网分布式经济调度策略[J]．电子测量技术，2022，45(9)：68-75.

[4] LI L，DONG M，SONG D R，et al. Distributed and real-time economic dispatch strategy for an islanded microgrid with fair participation of thermostatically controlled loads[J]. Energy，2022，261：125294.

[5] 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.

（下转第 78 页）