

主动配电网分布式经济调度系统的时延稳定性分析

摘要:

关键词:

Abstract:

Key words:

0 引言

经济调度(economic dispatch, ED)是电力系统中最基本的问题之一,它本质上是一个优化问题,即在满足电力系统各种约束的条件下,决定各个发电

基金项目:

机组的出力以满足总负荷需求,同时使得总发电成本最小。传统经济调度方法是集中式的,即由调度中心接收各个发电单元上传的信息,进行优化计算后下发调度指令,各个单元接收并执行相应调度指令^[1-2]。但是随着数量众多、地理位置分散且特性各异的分布式电源(distributed generation, DG)接入主动配电网(active distribution network, ADN),集中式经济调度中心的通信和计算压力巨大,且无法提供即插即用功能导致灵活性和可扩展性较低^[3-5]。

为克服集中式经济调度系统的不足,分布式经济调度方法得到重视。分布式调度模式无需调度中心,各发电单元交换一定的信息,自主计算并做出决策。因此分布式经济调度系统具有更好的鲁棒性、更快的计算速度和更少的通信量^[6-11]。文献[12]提出了Leader-Follower分布式经济调度方法,以发电成本微增率为一致性变量,在所有发电单元成本微增率相等时得到最优解,但该方法需要获得功率差额等全局信息以确保功率平衡。文献[13]提出了一种两级迭代算法,避免了对领导者和全局信息的依赖,但其需要设置发电单元出力初值总和等于系统总负荷,因此不适用于负荷变化的系统。对于主动配电网,其网络运行管理者可方便地实时测量公共耦合点(common coupling point, PCC)处的功率信息,由此解决了Leader-Follower模式下分布式经济调度系统全局信息获取困难的问题^[14]。

考虑到分布式经济调度系统中各单元需要经由局部通信网络交换信息,通信时延将不可避免。文献[15]通过将时延应用到分布式经济调度算法中,评估通信网络存在时间延迟时算法的有效性和

性能,结果表明时间延迟将影响算法的收敛性,导致算法要么收敛至一个错误的值,要么完全不能收敛,但并没有进行相应的理论分析。文献[16]给出了一种带通信固定的全分布式算法,并通过广义Nyquist准则得到了最大允许延迟边界,但计算复杂且保守性较高。文献[17]分析了具有时变时延分布式经济调度策略的收敛性问题,并给出了算法收敛到全局最优点的较低保守性的判据。上述研究均是从算法和数值仿真的层面分析分布式经济调度算法的收敛性和收敛速度等,而尚无从分布式控制的角度出发开展系统稳定性的研究。对于实际电力系统而言,其运行方式发生变化或遭受虚假数据攻击之后,仅仅以经济性最优为目标的调度策略能否满足系统持续稳定运行的要求亟待研究^[18-19]。

文献[20]提出了考虑联络线功率稳定的微电网鲁棒经济调度模型,通过协调优化其他可调度分布式电源和储能系统的出力,降低可再生能源不确定性带来的风险,从而保证系统运行的稳定性,但是只研究了联络线功率稳定,且没有考虑通信时延。针对时延系统的稳定性分析,目前除了传统的时域分析法^[21]、频域分析方法^[22-23]外,基于Lyapunov函数的分析方法计算简单且可以得到更低保守性的稳定性条件^[24-25]。文献[26]引入线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)直接沿系统轨迹列写Lyapunov泛函,利用自由权矩阵法提供列解Lyapunov函数和求解最优牛顿-莱布尼兹公式权矩阵的系统性方法,大大降低了原有方法的保守性,将时延系统的稳定性判据表示为一组线性矩阵不等式,由此得到求解时延稳定性的系统性方法。文献[27]同样利用此系统性方法,分析了电力系统的时延稳定性问题,并针对时延系统的研究表明,采用自由权矩阵法所求得的最大允许时延与其真值非常接近,所得结果的保守性低于其他方法。

但是,目前尚无针对分布式经济调度系统的时延稳定性问题的研究。ADN分布经济调度作为典型

的复杂信息-物理耦合系统,需要考虑分布式控制系统参数和通信等的影响,此外分布经济调度作为优化问题需要把经济成本纳入系统方程,给时延稳定性分析带来了困难。本文以上述研究为基础,建立 ADN 分布式经济调度系统整体状态方程,从控制角度对配电网分布式经济调度系统进行稳定性分析,使得系统在满足经济性最优目标的同时,也满足系统持续稳定运行的要求;此外还将推导分布式经济调度系统时延稳定性判据,探索改善分布控制模式下主动配电网系统稳定性,提高系统时延稳定裕度的方法。

本文首先以微增成本为一致性变量,设计了 Leader-Follower 模式下的主动配电网分布式经济调度策略,考虑通信时延建立了主动配电网分布式经济调度控制系统无时延、具有对称时延和非对称时延的系统状态模型。利用 Lyapunov 稳定性定理和自由权矩阵方法得出具有更低保守性的系统时延稳定判据,同时利用线性矩阵不等式计算时延系统的稳定裕度。最后通过 IEEE-14 节点配电网中的仿真算例验证本文分布式经济调度控制系统时延稳定性分析和时延稳定裕度计算方法的正确性和有效性。

1 主动配电网分布式经济调度系统设计

1.1 分布式经济调度系统结构

主动配电网经济调度系统需实现两个目标:目标 1 是配电网内的所有 DG 总输出有功功率加上从外部电网输入的有功功率之和,需平衡配电网总负荷的有功功率需求;目标 2 是在实现目标 1 的基础上使得配电网内的 DG 总发电成本最小。本文采用如图 1 所示分布式经济调度系统来实现上述目标。

图 1 中主动配电网接入多个 DG 和负载,且在 PCC 处与外部电网连接进行功率交换,各 DG 的调控者可通过系统局部通信网络与其他 DG 的调控者进行信息交互。各 DG 的调控者根据本地量测信息,如各自 DG 的微增成本 λ_i 和输出功率 $P_{DG,i}$,综合其他 DG 经由通信链路发送而来的信息和系统功率差额信息等,独立决策后向其 DG 发送功率指令 $P_{DG.ref,i}$,并向其他 DG 调控者发送自身信息,通过各 DG 的协同配合实现分布式经济调度。考虑到经济调度任务时间尺度远大于 DG 控制响应速度,文中将 DG 视为一阶动态系统。

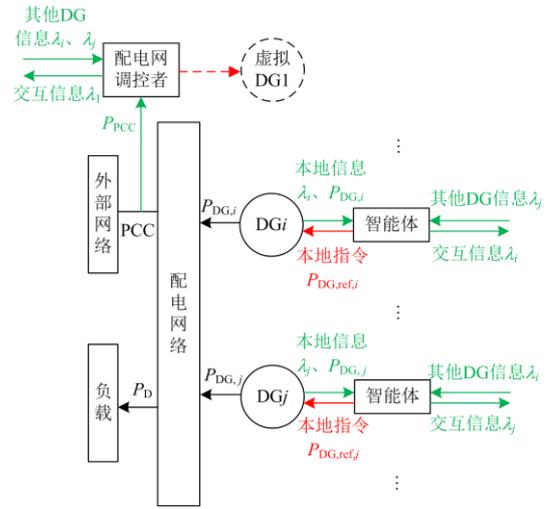


图 1 主动配电网分布式经济调度系统

Fig. 1 Distributed economic dispatch system of an active distribution network

DG 总发电功率与负荷功率之间的功率差额是实现分布式经济调度的重要信息,本文通过测量 PCC 处交换功率 P_{PCC} 来间接提供该信息,该信息可由配电网调控者测量得到。为进一步满足分布式控制的要求,为配电网调控者配备一个“虚拟分布式电源”,同时将该“虚拟分布式电源”编号设为 1,如图 1 所示。该虚拟 DG 无实际功率输出,也无需向该 DG 发送指令。

1.2 分布式经济调度模型

本文采用的分布式经济调度模型的目标函数为

$$\min F = \sum_{i=1}^n F_i(P_{DG,i}) \quad (1)$$

式中: n 为配电网内的 DG 总数目; $P_{DG,i}$ 和 $F_i(P_{DG,i})$ 分别为第 i 个 DG 的输出功率和功率-成本函数。目前功率-成本函数多为二次凸函数形式,即

$$F_i(P_{DG,i}) = a_i P_{DG,i}^2 + b_i P_{DG,i} + c_i \quad (2)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 分别为第 i 个 DG 发电成本函数的二次项、一次项和常数项系数,且 $a_i > 0$ 。对于虚拟 DG,其功率-成本函数恒为零且无实际功率输出。

调度模型的等式约束条件为功率平衡,即

$$\sum_{i=1}^n P_{DG,i} + P_{PCC.ref} = P_D \quad (3)$$

式中: P_D 为有源配电网总负荷; $P_{PCC.ref}$ 为配电网与外部电网交换功率的指令。

当 PCC 处实际功率与指令一致时,表明系统达到功率平衡,等式约束(3)可改写为

$$P_{\text{PCC}} - P_{\text{PCC,ref}} = 0 \quad (4)$$

式中, P_{PCC} 表示配电网与外部电网实际交换的功率, 以流入配电网为正。

经济调度模型的线性不等式约束为

$$P_{\text{DG},i}^{\min} \leq P_{\text{DG},i} \leq P_{\text{DG},i}^{\max} \quad (5)$$

式中, $P_{\text{DG},i}^{\max}$ 和 $P_{\text{DG},i}^{\min}$ 分别为第 i 个 DG 出力的上下限。

在网损变化相对各 DG 功率变化较小时, 经济调度问题式(1)、式(3)和式(5)为凸优化问题且具有唯一最优解, 且最优解可表示为

$$\lambda_1^* = \lambda_2^* = \dots = \lambda_n^* \quad (6)$$

式中, 对于除虚拟 DG 之外的分布式电源有

$$\lambda_i = \frac{dF_i(P_{\text{DG},i})}{dP_{\text{DG},i}} = 2a_i P_{\text{DG},i} + b_i, \text{ 即第 } i \text{ 个 DG 的微增成本, 上标 “*” 代表最优值。}$$

1.3 分布式经济调度系统控制模型

本文采用分布式一致性协议, 以分布式电源的微增成本 λ 为一致性变量实现分布式经济调度。

双向通信链路的情况下, 电力系统通信网络拓扑可用无向图 $G=(V, E)$ 表示, 其中 $V=\{1, 2, \dots, n\}$ 为拓扑图顶点的集合, 本文中为有源配电网中 n 个 DG; $E \subseteq V \times V$ 为边的集合, 本文中为 DG 之间的通信链路。节点对 $(i, j) \in E$ 表示节点 i 和节点 j 之间存在通信信道, 即第 i 个 DG 可以与第 j 个 DG 进行信息交互。两个具有通信链路的顶点可以称为彼此的“邻居”, 统一用 $N_i = \{j \in V : (i, j) \in E\}$ 表示节点 i 邻居的集合, $|N_i|$ 表示集合内元素的个数。

本文分布式经济调度系统为多智能体系统, 其控制策略可表示为

$$\dot{\lambda}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\lambda_j(t) - \lambda_i(t)] \quad (7)$$

式中: $\lambda_i(t)$ 、 $\lambda_j(t)$ 分别为第 i 个和第 j 个 DG 在 t 时刻的微增成本; $a_{ij} > 0$ 为第 i 个 DG 为接收到的第 j 个 DG 信息而设置的权重, 对 $j \in N_i$ 有 $a_{ij} = 1/|N_i|$, 对 $j \notin N_i$ 则 $a_{ij} = 0$ 。

将式(7)以矩阵形式表示, 得到该控制系统的状态方程为

$$\dot{\lambda} = -L\lambda \quad (8)$$

式中: L 为图 G 的拉普拉斯矩阵, 其元素 l_{ij} 由通信网络拓扑以及信息权重 a_{ij} 决定, 即

$$l_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ \frac{-1}{|N_i|} & j \in N_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

考虑虚拟 DG 的分布式经济调度策略为

$$\dot{\lambda}_i = -\sum_{j=1}^n l_{ij} \lambda_j + k_i d(P_{\text{PCC}} - P_{\text{PCC,ref}}) = -\sum_{j=1}^n l_{ij} \lambda_j + k_i d(P_D - P_{\text{PCC,ref}} - \sum P_{\text{DG},i}) \quad (10)$$

式中: 为将控制策略写成统一形式, 虚拟 DG 虽然成本函数恒为零也无实际功率输出, 但也具有微增成本, 称为虚拟微增成本; k_i 是虚拟 DG 标识, $k_i = 1$, 而对其他分布式电源有 $k_i = 0$; $d > 0$ 为反馈系数, 亦称其为收敛系数。

根据式(10)得到分布式调度系统整体状态方程为

$$\dot{\lambda} = -L\lambda + K \quad (11)$$

式中: 矩阵 L 元素按式(9)取值; $\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_n]^T$;

$$K = [d(P_D - P_{\text{PCC,ref}} - \sum P_{\text{DG},i}), 0, \dots, 0]^T。$$

根据微增成本计算可得各 DG 功率指令 $P_{\text{DG,ref},i}$ 如式(12)所示。

$$P_{\text{DG,ref},i} = \begin{cases} P_{\text{DG},i}^{\min} & \frac{\lambda_i - b_i}{2a_i} < P_{\text{DG},i}^{\min} \\ \frac{\lambda_i - b_i}{2a_i} & P_{\text{DG},i}^{\min} \leq \frac{\lambda_i - b_i}{2a_i} \leq P_{\text{DG},i}^{\max} \\ P_{\text{DG},i}^{\max} & \frac{\lambda_i - b_i}{2a_i} > P_{\text{DG},i}^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $i = 2, 3, \dots, n$; $P_{\text{DG,ref},1} = 0$ 。

向量 K 中 $P_{\text{DG},i}$ 与 λ_i 耦合, 因此根据 $P_{\text{DG},i} = \frac{\lambda_i - b_i}{2a_i}$, $i = 2, \dots, n$, 则式(11)可改写为

$$\dot{\lambda} = L_0 \lambda + B \quad (13)$$

其中:

$$L_0 = - \begin{bmatrix} 1 & l_{12} + \frac{d}{2a_2} & L & l_{1n} + \frac{d}{2a_n} \\ l_{21} & 1 & L & l_{2n} \\ M & M & M & M \\ l_{n1} & l_{n2} & L & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = d \begin{bmatrix} P_D - P_{PCC,ref} + \sum_{i=2}^n \frac{b_i}{2a_i} \\ 0 \\ M \\ 0 \end{bmatrix}$$

若一个 DG 接收到其自身信息以及接收到其邻居的信息均具有相同的时延 τ ，即对称通信时延，此时 ADN 的系统空间状态模型应修改为

$$\dot{\lambda}(t) = L_1 \lambda(t - \tau) + B \quad (14)$$

式中， $L_1 = L_0$ 。

实际中，DG 接收自身信息通常不存在时延，而接收到其邻居的信息具有时延，即不对称通信时延，此时系统空间状态模型为

$$\dot{\lambda}(t) = L_2 \lambda(t) + L_3 \lambda(t - \tau) + B \quad (15)$$

式中：因为智能体本身检测信息无时延， $L_2 = \text{diag}[-1, -1, L, -1]$ ，且 $L_0 = L_2 + L_3$ 。

式(13)、式(14)和式(15)分别为分布式经济调度控制系统在无时延、对称时延和不对称时延情况下的状态方程，相应的控制框图如图 2 所示。

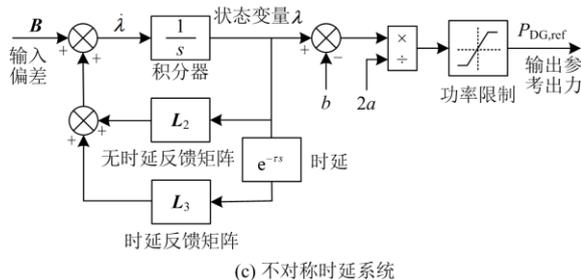
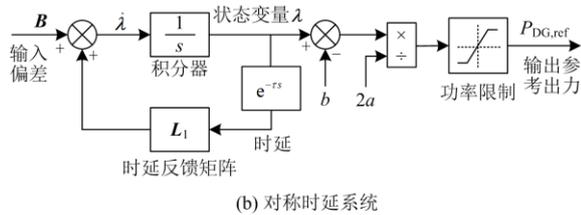
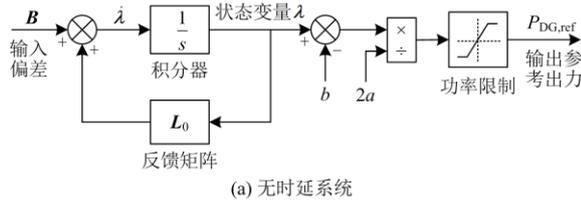


图 2 分布式经济调度系统控制框图

Fig. 2 Control block diagram of distributed economic dispatch system

2 系统稳定性分析

2.1 无时延系统稳定性分析

对于无时延的分布式经济调度系统式(13)，可直接求解状态空间方程的特征根来判断系统的稳定性，矩阵 L_0 可改写为

$$L_0 = -L - \begin{bmatrix} 0 & d & L & d \\ 0 & 2a_2 & L & 2a_n \\ 0 & 0 & L & 0 \\ M & M & M & M \\ 0 & 0 & L & 0 \end{bmatrix} = -L - \Delta L \quad (16)$$

引理 1 (圆盘定理): 矩阵 $L = (l_{ij})_{n \times n}$ 的全部特征值在复平面 n 个圆域 $G_i = \{z \mid |z - l_{ii}| \leq R_i, z \in C\}$ 的并集中，其中： $R_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n |l_{ij}|, i=1, 2, L, n$ 。

由引理 1，结合式(9)可得矩阵 L 的全部 n 个特征值圆域的圆心均为 $(1, 0)$ ，且半径 $R = 1$ 。因此根据圆盘定理可得 L 全部特征值均大于等于 0，即 L 为半正定矩阵。

对矩阵 ΔL ，取非零向量 $z = [z_1, z_2, L, z_n]^T$ ，有

$$z^T \Delta L z = d \left(\frac{z_2^2}{2a_2} + L + \frac{z_n^2}{2a_n} \right) \quad (17)$$

显然，对于所有的 $d > 0, a_i > 0, i=1, 2, L, n$ ，式(17)均为正，即 ΔL 为正定矩阵。

根据上述分析可知矩阵 L_0 为负定矩阵，其所有特征根实部为负，因此系统(13)所有特征根均具有负实部。由此表明只要反馈系数 $d > 0$ ，即可确保无时延分布式经济调度系统具有稳定性。

2.2 时延系统稳定性分析

本文基于 Lyapunov 稳定性判断方法，采用自由权矩阵，结合 LMI 数值分析法分析式(14)和式(15)所示时延系统的稳定性，并求解时延稳定裕度。以不对称时延系统式(15)为例进行说明。

首先利用二次型方法构建式(15)所示时延系统的 Lyapunov 泛函为

$$V(t) = \lambda^T(t) P \lambda(t) + \int_{t-\tau}^t \lambda^T(s) Q \lambda(s) ds + \int_{-\tau}^0 \int_{+\theta}^t \dot{\lambda}(s) W \dot{\lambda}(s) ds d\theta \quad (18)$$

式中： P 和 Q 为对称正定矩阵； W 为对称半正定矩阵；从而 Lyapunov 泛函 $V(t)$ 正定。

沿系统轨迹求 Lyapunov 泛函对时间的导数可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}\boldsymbol{\lambda}(t) = & 2\boldsymbol{\lambda}^T(t)\mathbf{P}\dot{\boldsymbol{\lambda}}(t) + \boldsymbol{\lambda}^T(t)\mathbf{Q}\boldsymbol{\lambda}(t) - \\ & \boldsymbol{\lambda}^T(t-\tau)\mathbf{Q}\boldsymbol{\lambda}(t-\tau) + \tau\dot{\boldsymbol{\lambda}}^T(t)\mathbf{W}\dot{\boldsymbol{\lambda}}(t) + \\ & \int_{t-\tau}^t \dot{\boldsymbol{\lambda}}^T(s)\mathbf{W}\dot{\boldsymbol{\lambda}}(s)ds \end{aligned} \quad (19)$$

依据牛顿-莱布尼兹公式可得式(19)中 $\boldsymbol{\lambda}(t)$ 、 $\boldsymbol{\lambda}(t-\tau)$ 、 $\int \dot{\boldsymbol{\lambda}}(s)ds$ 三项间的关系为

$$\boldsymbol{\lambda}(t-\tau) = \boldsymbol{\lambda}(t) - \int_{t-\tau}^t \dot{\boldsymbol{\lambda}}(s)ds \quad (20)$$

扩展牛顿-莱布尼兹公式可得

$$\begin{aligned} & 2[\boldsymbol{\lambda}^T(t)\mathbf{N}_1 + \boldsymbol{\lambda}^T(t-\tau)\mathbf{N}_2] \cdot [\boldsymbol{\lambda}(t) - \boldsymbol{\lambda}(t-\tau) - \int_{t-\tau}^t \dot{\boldsymbol{\lambda}}(s)ds] = 0; \\ & \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}(t) \\ \boldsymbol{\lambda}(t-\tau) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tau(\mathbf{X}_{11} - \mathbf{X}_{11}) & \tau(\mathbf{X}_{12} - \mathbf{X}_{12}) \\ \tau(\mathbf{X}_{21} - \mathbf{X}_{21}) & \tau(\mathbf{X}_{22} - \mathbf{X}_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}(t) \\ \boldsymbol{\lambda}(t-\tau) \end{bmatrix} = 0; \\ & \begin{cases} \int_{t-\tau}^t \boldsymbol{\lambda}(t)ds = \tau\boldsymbol{\lambda}(t) \\ \int_{t-\tau}^t \dot{\boldsymbol{\lambda}}(t)ds = \tau\dot{\boldsymbol{\lambda}}(t) \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

可人为指定权矩阵 \mathbf{N}_1 、 \mathbf{N}_2 、 \mathbf{X}_{11} 、 \mathbf{X}_{12} 、 \mathbf{X}_{22} 来化简消除式(19)中的时延变量 $\boldsymbol{\lambda}(t-\tau)$ ，但若这些权矩阵选取不合适时将可能导致分析结果具有较大保守性。本文引入待求自由权矩阵 \mathbf{N}_1 、 \mathbf{N}_2 、 \mathbf{X}_{11} 、 \mathbf{X}_{12} 、 \mathbf{X}_{22} 来建立式(20)中三项间的关系。结合式(14)整理得出 Lyapunov 泛函对时间的导数为

$$\dot{\mathbf{V}}\boldsymbol{\varepsilon}_1(t) = \boldsymbol{\varepsilon}_1^T(t)\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\varepsilon}_1(t) + \int_{t-\tau}^t \boldsymbol{\varepsilon}_2^T(t,s)\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\varepsilon}_2(t,s)ds \quad (22)$$

式中:

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{12}^T & f_{22} \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} & \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{X}_{12}^T & \mathbf{X}_{22} & \mathbf{N}_2 \\ \mathbf{N}_1^T & \mathbf{N}_2^T & \mathbf{W} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1(t) = [\boldsymbol{\lambda}^T(t) \quad \boldsymbol{\lambda}^T(t-\tau)]^T;$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_2^T(t,s) = [\boldsymbol{\varepsilon}_1^T(t) \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}}^T(s)]^T.$$

其中:

$$f_{11} = \mathbf{P}\mathbf{L}_2 + \mathbf{L}_2^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} + \mathbf{N}_1 + \tau\mathbf{X}_{11} + \tau\mathbf{L}_2^T\mathbf{W}\mathbf{L}_1$$

$$f_{12} = \mathbf{P}\mathbf{L}_3 - \mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2^T + \tau\mathbf{X}_{12} + \tau\mathbf{L}_2^T\mathbf{W}\mathbf{L}_3$$

$$f_{22} = -\mathbf{Q} - \mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_2^T + \tau\mathbf{X}_{22} + \tau\mathbf{L}_3^T\mathbf{W}\mathbf{L}_3$$

若式(22)中满足 $\boldsymbol{\Phi} < 0$ 、 $\boldsymbol{\Psi} \geq 0$ ，则对于任意的 $\boldsymbol{\varepsilon}_1(t) \neq 0$ 总有 $\dot{\mathbf{V}}\boldsymbol{\varepsilon}_1(t, x_i) < 0$ ，则由 Lyapunov 定理可知此时系统渐进稳定。

本文给出线性矩阵不等式表示的系统判稳条件，进一步采用 LMI 数值分析方法对判稳条件进行求解，以确定最优的自由权矩阵系数和可接受的系统时延范围。式(15)所示不对称时延系统稳定性判据为

定理 1 (考虑时延的分布式经济调度系统稳定性判据): 对于满足 $0 < \tau < \tau_{\max}$ 的任意时延 τ ，若存在对称正定矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} ，对称半正定矩阵 \mathbf{W} 、 \mathbf{X}_{11} 和 \mathbf{X}_{22} ，任意矩阵 \mathbf{N}_1 、 \mathbf{N}_2 和 \mathbf{X}_{12} ，且满足 $\boldsymbol{\Phi} < 0$ 且 $\boldsymbol{\Psi} \geq 0$ ，则系统(15)渐进稳定。

令 $\mu = 1/\tau$ ，则系统时延上限的求解问题可转化为线性矩阵不等式中的广义特征值最小化问题，即

$$\begin{cases} \min & \mu \\ \text{s.t.} & \boldsymbol{\Phi}_1 < \mu\boldsymbol{\Phi}_2, \boldsymbol{\Phi}_2 > 0, \\ & \boldsymbol{\Psi} \geq 0, \mathbf{P} > 0, \mathbf{Q} > 0, \\ & \mathbf{W} \geq 0, \mathbf{X}_{ii} \geq 0 (i=1,2) \end{cases} \quad (23)$$

其中:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Phi}_1 &= \begin{bmatrix} -\mathbf{P}\mathbf{L}_2 - \mathbf{L}_2^T\mathbf{P} - \mathbf{Q} - \mathbf{N}_1 & -\mathbf{P}\mathbf{L}_3 + \mathbf{N}_1 - \mathbf{N}_2^T \\ -\mathbf{L}_3^T\mathbf{P} + \mathbf{N}_1^T - \mathbf{N}_2 & -\mathbf{Q} - \mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_2^T \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\Phi}_2 &= \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} + \mathbf{L}_2^T\mathbf{W}\mathbf{L}_2 & \mathbf{X}_{12} + \mathbf{L}_2^T\mathbf{W}\mathbf{L}_3 \\ \mathbf{X}_{12}^T + \mathbf{L}_3^T\mathbf{W}^T\mathbf{L}_2 & \mathbf{X}_{22} + \mathbf{L}_3^T\mathbf{W}\mathbf{L}_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

通过 LMI 求解得出最小广义特征值 μ_{\min} ，即能够得到满足系统稳定的最大时延 $\tau_{\max} = 1/\mu_{\min}$ 。当分布式经济调度系统具有对称时延时，由于系统(14)中时延矩阵 $\mathbf{L}_1 = \mathbf{L}_0 = \mathbf{L}_2 + \mathbf{L}_3$ ，所以只需要将定理 1

中矩阵 L_3 替换为 L_1 ，且令 $L_2 = 0$ 即可得到考虑对称时延的分布式经济调度系统的稳定性判据。

3 仿真验证

采用 IEEE-14 节点配电网系统进行仿真计算，系统结构和局部通信网络如图 3 所示。配电网共接入 5 个 DG，分别位于节点 2、3、7、10 和 12。整个网络总有功负荷为 28.7 MW，表 1 给出了各 DG 的具体信息。

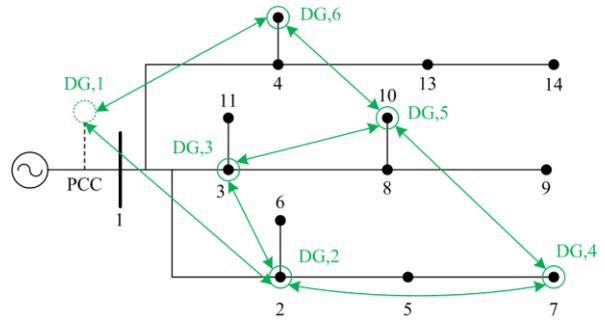


图 3 仿真系统拓扑结构及通信网络
Fig. 3 Topology of the simulation system and communication network

表 1 分布式电源参数
Table 1 Parameters of DG

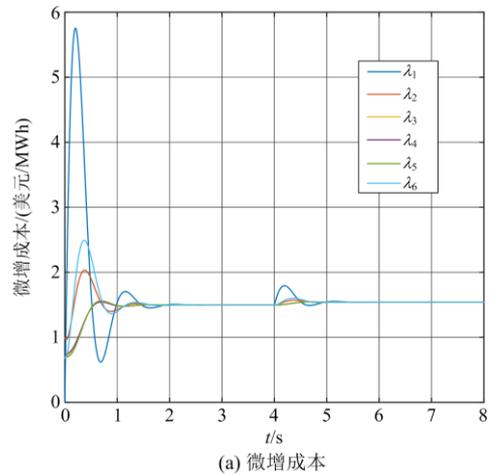
| DG 编号 | a_i /(美元/MW ² h) | b_i /(美元/MWh) | c_i /(美元/h) | $P_{DG,i}^{min}$ /MW | $P_{DG,i}^{max}$ /MW | 初值/MW |
|-------|-------------------------------|-----------------|---------------|----------------------|----------------------|-------|
| 1 | — | — | — | — | — | 0 |
| 2 | 0.094 | 0.62 | 90 | 0.5 | 15 | 2.0 |
| 3 | 0.078 | 0.53 | 87 | 1.0 | 20 | 1.0 |
| 4 | 0.105 | 0.41 | 86 | 0.8 | 20 | 1.5 |
| 5 | 0.082 | 0.45 | 45 | 0.6 | 15 | 1.5 |
| 6 | 0.074 | 0.57 | 73 | 0.5 | 18 | 0.8 |

3.1 系统稳定性分析

取反馈系数 $d = 0.5$ ，式(13)所示无时延分布式控制系统的特征值为 $e_1 = -0.67 + j1.34$ ， $e_2 = -0.67 - j1.37$ ， $e_3 = -1.89$ ， $e_4 = -1.08$ ， $e_5 = -0.68$ ， $e_6 = -1$ ，特征值实部均小于 0 表明系统稳定。

(1) 设置 $P_{PCC,ref} = 0$ MW， $d = 0.5$ ，在 $t = 4$ s 时配电网总有功负荷由初始 28.7 MW 增加至 30 MW，当 DG 微增成本之间差值满足 $|\Delta\lambda| < 0.0001$ 美元/MWh 时，认为系统已经收敛至最优值。采用集中式方法求解负荷在 28.7 MW 时各分布式电源最优出力分别为 [4.667, 6.202, 5.178, 6.387, 6.266] MW，在负荷增加为 30 MW 时，各分布式电源最优出力分别为 [4.903, 6.485, 5.389, 6.657, 6.566] MW，而分

布式经济调度系统的响应如图 4 所示。



(a) 微增成本

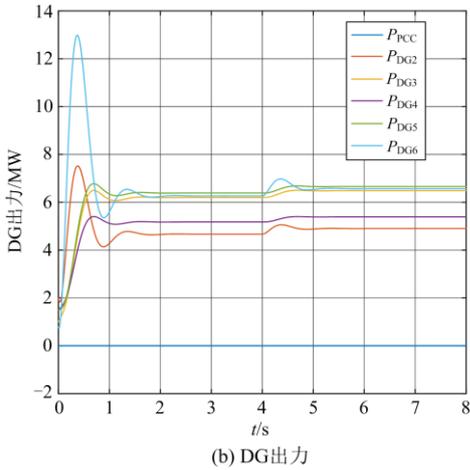


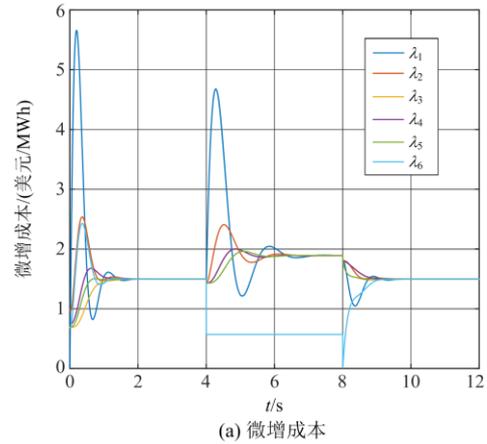
图4 无时延负荷变动仿真结果

Fig. 4 Simulation results of load fluctuation without delays

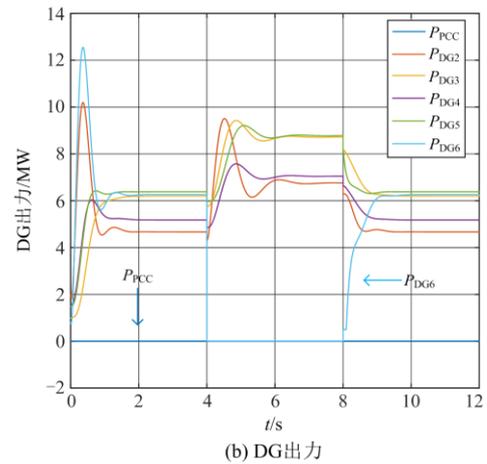
由图4可以看出,当负荷为28.7 MW时,DG微增成本由各自初值均收敛至相同的最优值 $\lambda^* = 1.497$ 美元/MWh,各DG出力之和与配电网内负荷平衡,PCC处交换功率为0 MW,初值收敛至最优值时间 $t_1 = 2.13$ s;负荷增大为30 MW时,各DG出力出现短暂波动,微增成本最终稳定至新的最优一致值 $\lambda^* = 1.542$ 美元/MWh,PCC处交换功率仍保持为0 MW,负荷波动后收敛至最优值时间 $t_2 = 5.04$ s,各阶段的仿真结果均与集中式方法一致。表明本文方法在负荷变动时能以分布式方式实现主动配电网经济调度的目标。

(2)设置 $P_{PCC,ref} = 0$ MW, $d = 0.5$,有功负荷为28.7 MW,DG2和DG3之间通信网络因为故障而断开,且在 $t = 4$ s时配电网DG6退出运行,并在 $t = 8$ s时再次并网运行,模拟DG通信中断以及DG“即插即用”的场景,得出分布式经济调度系统的响应如图5所示。

由图5可以看出,当DG2和DG3之间通信网络因为故障而断开,整个通信网络仍保持连通时,各DG微增成本和PCC处交换功率的动态过程发生变化,但是最终的稳定值没有变化,本文的分布式经济调度的控制仍有效;当 $t = 4$ s,DG6退出运行时,DG微增成本失去一致,但经过一段时间的调整后,其他DG仍可以达成新的最优值 $\lambda^* = 1.890$ 美元/MWh,在此过程中PCC处交换功率保持为0 MW;当DG6重新并网后,同样各DG微增成本失去一致,经过一段时间的调整后,所有DG微增成本重新回到 $\lambda^* = 1.497$ 美元/MWh,PCC处交换功率保持为0 MW。表明本文方法在DG投入/退出以及通信拓扑变化的情况下,能以分布式方式实现主动配电网经济调度的目标,具有较好的控制鲁棒性。



(a) 微增成本



(b) DG出力

图5 无时延通信故障和“即插即用”仿真结果
Fig. 5 Simulation results of communication fault and “plug and play” without delays

(3)设置 $P_{PCC,ref} = 6$ MW, $d = 0.5$,有功负荷为28.7 MW,在 $t = 4$ s时发生Leader智能体通信故障,即虚拟DG1“退出”运行,在 $t = 8$ s时配电网总有功负荷增加至30 MW,仿真分布式经济调度系统的响应如图6所示。

由图6可以看出,当设置 $P_{PCC,ref} = 6$ MW时,仿真DG微增成本由各自初值均收敛至相同的最优值 $\lambda^* = 1.293$ 美元/MWh,各DG出力之和与配电网内负荷平衡,PCC处交换功率为6 MW;当Leader智能体发生通信故障时,由于系统已经稳定且无外部干扰与运行条件的变化,对系统其他DG无影响;但是当发生负荷变动后,虽然各DG微增成本仍旧保持一致,却因通信故障导致系统通信网络不连通,从而无法达成控制目标,PCC处交换功率随负荷增加。表明当PCC处虚拟DG的通信保持连通时,本文方法可以满足在运行条件变化下不同PCC交换功率设定要求。

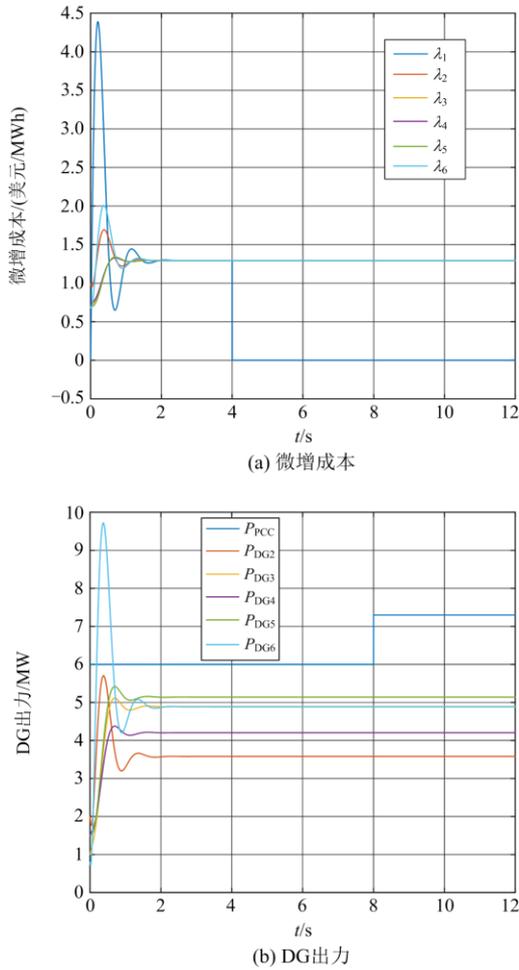


图 6 无时延领导者通信故障仿真结果

Fig. 6 Simulation results of leader communication fault without delays

(4) 设置 $P_{PCC,ref} = 0 \text{ MW}$, 保持负荷为 28.7 MW , 增大参数 d 从 0.1 至 50 , 系统根轨迹变化如图 7 所示。

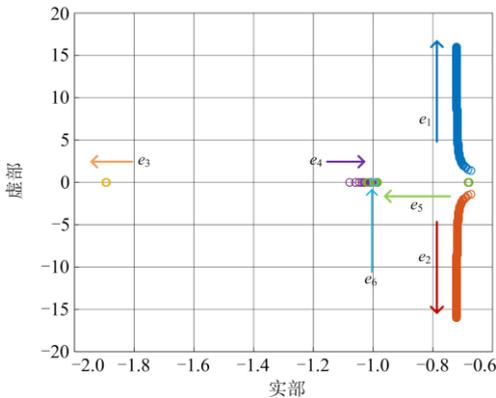


图 7 系统根轨迹变化图

Fig. 7 Evolution chart of the system root trajectory

由图 7 可知, 特征值 e_6 固定保持为 -1 , 系统其他 5 个特征根在反馈系数 d 变化时均保持在左半平面内运动: 共轭的一对特征值 e_1 、 e_2 虚部绝对值增大, 实部逼近 -0.72 ; 特征值 e_3 、 e_4 、 e_5 均为实数, 特征值 e_3 缓慢减小并逼近 -1.9 , 特征值 e_4 、 e_5 变化较大, 但均逼近于 -1 处。上述结果表明所有特征值均逐渐收敛到左半平面固定区域, 分布式经济调度系统在反馈系数 d 变动较大时仍可保持稳定运行。

不同反馈系数 d 时的微增成本的对比如图 8 所示。

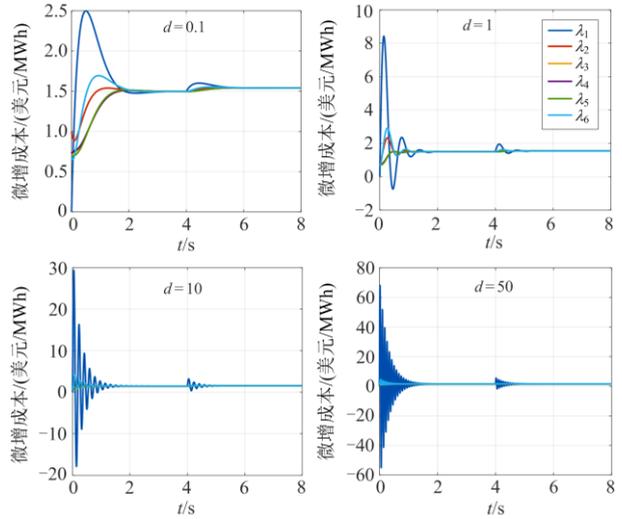


图 8 不同反馈系数时微增成本的比较

Fig. 8 Comparison of the incremental costs for different values of d

由图 8 可知, 当反馈系数 d 分别取 0.1 、 1 、 10 和 50 时, 初值收敛至最优值的时间 t_1 分别为 3.51 s 、 2.07 s 、 1.87 s 和 1.34 s , 负荷波动后收敛时间 t_2 分别为 5.57 s 、 4.93 s 、 4.50 s 和 4.34 s 。反馈系数的不同取值不影响分布式经济调度系统的最终稳定状态, 即负荷为 28.7 MW 时各 DG 的微增成本均能从初值收敛至最优一致值 $\lambda^* = 1.497 \text{ 美元/MWh}$; 负荷变化后微增成本重新收敛至最优一致值 $\lambda^* = 1.542 \text{ 美元/MWh}$ 。

3.2 系统的时延上界分析

考虑系统存在通信时延, 按照式(14)和式(15)分别得出系统不对称以及对称时延下的状态方程, 根据定理 1, 利用 Matlab LMI Toolbox 求解式(23), 即可得出系统的时延稳定裕度(反馈系数 $d=0.5$)。

(1) 求解得出系统对称时延下的稳定裕度为 0.2952 s , 分别取时延为上界 0.2952 s 、超过时延上界的 0.3 s 和不超过时延上界的 0.1 s 和 0.2 s , 仿真得到分布式电源的微增成本的变化如图 9 所示。

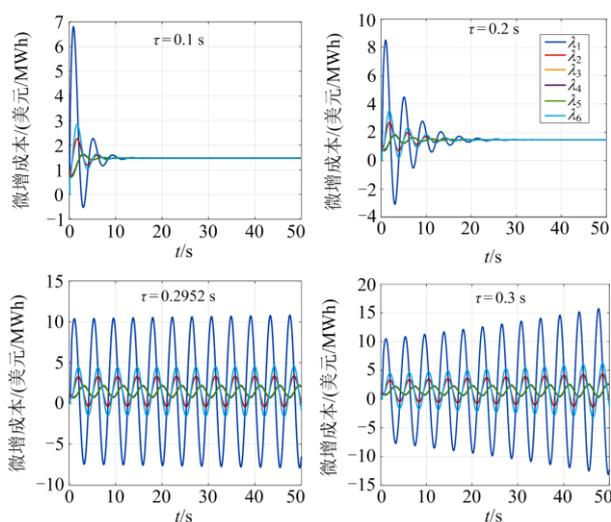


图 9 不同对称时延下微增成本

Fig. 9 Incremental costs at different symmetric delays

由图 9 可知, 对于具有对称通信时延的系统, 当时延为所求的时延稳定裕度时, 各 DG 的微增成本将围绕最优一致值振荡, 系统处于临界稳定状态; 当时延超过稳定上界 0.2952 s 时, 各 DG 的微增成本围绕最优一致值振荡并逐渐发散, 系统无法保持稳定; 而当系统时延小于稳定裕度, 即 $\tau = 0.1$ s 或 0.2 s 时, 各 DG 的微增成本将可逐渐收敛至最优一致值, 系统可保持稳定运行; 且初值收敛至最优的时间 t_1 分别为 14.81 s 和 25.45 s, 随着时延的增大, 各 DG 微增成本收敛至稳定状态的时间将增加。上述结果验证了本文对称时延情况下系统稳定裕度求解方法的正确性。

(2) 求解此时系统不对称时延下的稳定裕度为 0.5478 s, 分别取时延为上界 0.5478 s、超过时延上界的 0.7 s 和不超时延上界的 0.2 s 和 0.4 s, 仿真得到 DG 微增成本的变化如图 10 所示。

由图 10 可知, 对于具有不对称通信时延的分布式控制系统, 当系统时延为所求稳定裕度 0.5478 s 时, 各 DG 的微增成本围绕最优一致值振荡, 系统接近临界稳定状态; 而当时延超过稳定上界时, 各 DG 的微增成本将围绕最优一致值振荡并逐渐发散, 系统无法保持稳定; 当系统时延小于所求稳定裕度, 即 $\tau = 0.2$ s 或 0.4 s 时, 各 DG 的微增成本将逐渐收敛至最优一致值, 系统将保持稳定运行; 且随着时延的增大, 各 DG 微增成本进入最终稳定状态的时间将增长。上述结果验证了本文不对称时延情况下系统稳定裕度分析和求解方法的正确性。

(3) 当采用文献[20]使用的方法计算以上时延稳定裕度时, 求解得出系统对称和不对称时延下的

稳定裕度分别为 0.2877 s、0.5248 s, 分别取时延为以上结果, 仿真得到分布式电源的微增成本的变化如图 11 所示。

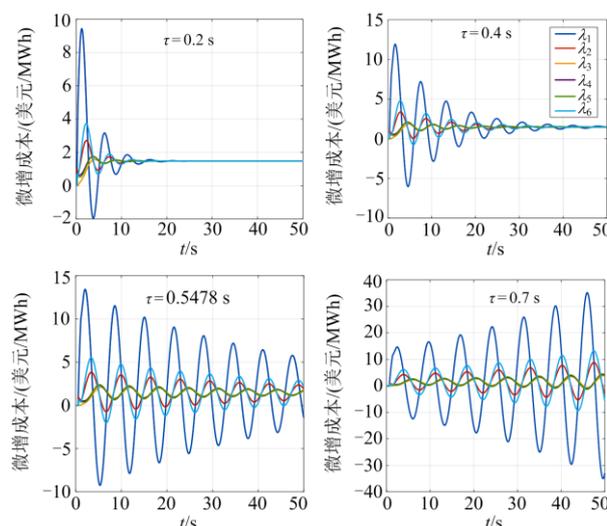


图 10 不同不对称时延下微增成本变化

Fig. 10 Incremental costs at different asymmetric delays

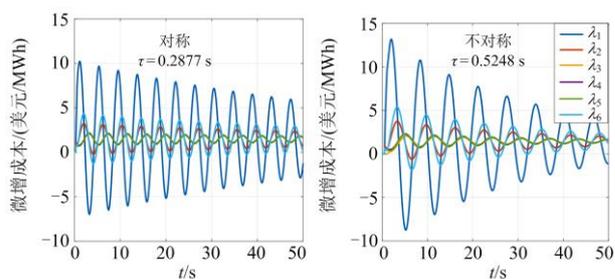


图 11 文献[20]方法时延裕度下微增成本变化

Fig. 11 Incremental cost change under delay margin of the method in literature [20]

相比本文方法, 文献[20]使用的方法所求的时延稳定裕度较小, 通过图 11 对比图 9 和图 10 的仿真结果, 本文所采用的方法所求得系统时延稳定裕度更接近系统实际仿真的裕度, 即本文的方法有效降低了结果的保守性。

3.3 时延稳定裕度的影响因素分析

(1) 由图 5 和图 6 可以看出: 当系统通信网络不连通时, 无法达成控制目标, 也会影响系统的稳定性; 而当拓扑连通时, 通信故障等导致拓扑发生变化, 节点的度数发生变化, 虽然不会影响系统控制目标, 但也对变化过程产生了影响。因此, 改变系统的通信拓扑, 探究其对系统时延稳定裕度的影响。

为了实现控制目标, 仿真均保持系统连通, 以度数衡量系统的通信拓扑, 例如图 3 所示 DG 节点 i 的度数 D_i 分别为 2、3、2、2、3、2, 总计 $D = 14$;

DG2 与 DG3 因通信故障而断开后, DG2 和 DG3 节点的度均减少 1, 总度数 D 减少 2。以对称时延为例, 仿真不同通信故障或通信拓扑改变的时延稳定裕度如表 2 和图 12 所示。

表 2 不同通信拓扑下的对称时延稳定裕度

Table 2 Symmetric delay stability margins for different communication topology

| 通信变化 | D | τ_{\max}/s |
|--------------------------|-----|-----------------|
| DG2 与 DG3、DG5 与 DG6 通信故障 | 10 | 0.1857 |
| DG2 与 DG3 通信故障 | 12 | 0.2922 |
| DG5 与 DG6 通信故障 | 12 | 0.2042 |
| 无变化 | 14 | 0.2952 |
| DG3 与 DG4 添加连接 | 16 | 0.3200 |
| DG4 与 DG6 添加连接 | 16 | 0.3117 |
| DG3 与 DG4、DG4 与 DG6 添加连接 | 18 | 0.4107 |

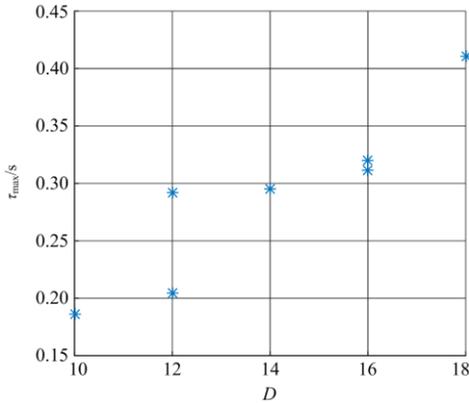


图 12 不同通信拓扑下的对称时延稳定裕度

Fig. 12 Symmetric delay stability margins for different communication topology

分析表 2 和图 12 可知, 系统通信拓扑连通下, 当总度数 D 逐步增大时, 系统的时延稳定裕度均逐渐增大; 相同度数 D 下不同的连接方式导致的拓扑差异对系统时延稳定裕度也有一定的影响。从提高系统时延稳定裕度的角度出发, 应该适当增加系统的通信连接。

图 6 表明, 尽管主动配电网分布式经济调度系统的反馈系数不影响系统的稳定性, 但将影响系统收敛至稳定状态的过渡时间以及稳定前的振荡幅度; 而 3.2 节中仿真结果表明系统具有不同的对称和非对称时延稳定裕度。改变反馈系数 d 得到系统对称和非对称时延稳定裕度分别如表 3 和表 4 所示, 图 13 给出了两种时延稳定裕度的对比。

分析表 3、表 4 和图 13 可知, 当反馈系数 d 逐步增大时, 系统的对称和非对称时延稳定裕度均逐渐减小; 相同反馈系数 d 下非对称时延稳定裕度要

表 3 不同反馈系数下的对称时延稳定裕度

Table 3 Symmetric delay stability margins for different d

| d | τ_{\max}/s | d | τ_{\max}/s | d | τ_{\max}/s |
|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|
| 0.1 | 0.7486 | 0.7 | 0.2008 | 4 | 0.0351 |
| 0.2 | 0.7474 | 0.8 | 0.1783 | 5 | 0.0280 |
| 0.3 | 0.5071 | 0.9 | 0.1597 | 10 | 0.0127 |
| 0.4 | 0.3725 | 1 | 0.1436 | 15 | 0.0091 |
| 0.5 | 0.2952 | 2 | 0.0708 | 20 | 0.0070 |
| 0.6 | 0.2438 | 3 | 0.0469 | 50 | 0.0025 |

表 4 不同反馈系数的非对称时延稳定裕度

Table 4 Asymmetric delay stability margins for different d

| d | τ_{\max}/s | d | τ_{\max}/s | d | τ_{\max}/s |
|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|
| 0.1 | 73212 | 0.7 | 0.2797 | 4 | 0.0336 |
| 0.2 | 71310 | 0.8 | 0.2497 | 5 | 0.0272 |
| 0.3 | 4.3644 | 0.9 | 0.1869 | 10 | 0.0136 |
| 0.4 | 0.8845 | 1 | 0.1611 | 15 | 0.0095 |
| 0.5 | 0.5478 | 2 | 0.0737 | 20 | 0.0071 |
| 0.6 | 0.3910 | 3 | 0.0504 | 50 | 0.0028 |

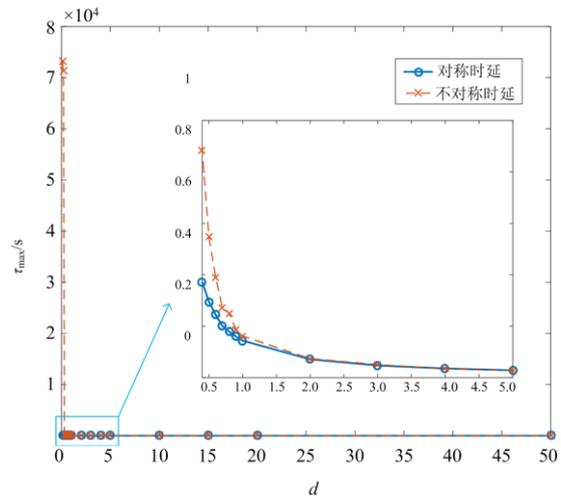


图 13 不同反馈系数下的系统时延稳定裕度

Fig. 13 System delay stability margins for different d

大于对称时延下的稳定裕度, 但随着反馈系数 d 的增大, 非对称时延稳定裕度减小的速度更快, 当 $d > 1$ 时, 系统的非对称与对称时延稳定裕度将基本相同。从提高系统时延稳定裕度的角度出发, 分布式经济调度策略应选择较小的反馈系数 d 。

表 4 和图 13 还表明, 当反馈系数 d 较小时, 系统具有很大的非对称时延裕度。图 14 给出了 d 较小时非对称时延稳定裕度的变化情况。

可以看出, 当 $d < 0.25$ 时, 系统具有很大的非对称时延稳定裕度, 可以认为此时即使各 DG 不接收其他 DG 的信息, 而仅仅依靠自身的状态信息也

可保持系统稳定。而当 $d > 0.25$ 时, 系统非对称时延稳定裕度将急剧下降。图 15 给出了 $d = 0.1$ 且不对称时延为 100 s 时各 DG 的微增成本变化。

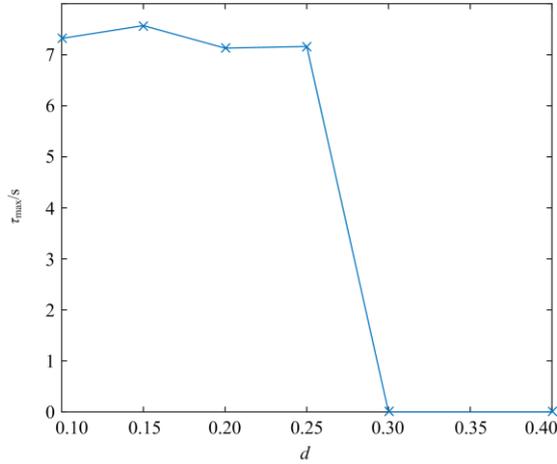


图 14 反馈系数较小时的非对称时延稳定裕度

Fig. 14 Asymmetric delay stability margins for d with smaller values

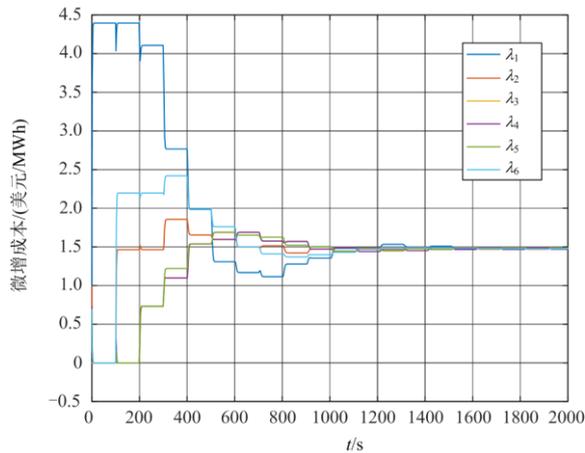


图 15 很长不对称时延下的微增成本

Fig. 15 Incremental costs for very long asymmetric delays

从图 15 中可以看出, 由于存在 100 s 时延, 各 DG 在 100 s 内将无法实现一致性, 但各 DG 仅依靠自身的状态信息也可满足系统稳定性的需求。在很长的时间范围内, 各 DG 开始接收到的其他 DG 的时延信息, 经过长时间的调整后可以最终达成一致, 实现最优经济的目标。

综上所述, 从提高系统时延稳定性的角度出发, 应尽量为分布式经济调度控制策略式(10)选取较小的反馈系数 d , 以增大系统的时滞稳定裕度; 同时由于相同反馈系数 d 下非对称时延稳定裕度要大于对称时延下的稳定裕度, 因此应尽可能减小各 DG 获取自身状态信息的时延, 因为相同反馈系数 d

下非对称时延稳定裕度要大于对称时延下的稳定裕度。

4 结论

本文以微增成本为一致性变量, 设计了 Leader-Follower 模式下的主动配电网分布式经济调度策略, 建立了考虑通信时延的主动配电网分布式经济调度控制系统稳定性分析模型。利用 Lyapunov 稳定性定理和自由权矩阵方法得出系统考虑通信时延时的稳定条件并求解时延稳定裕度。仿真分析结果表明:

(1) 本文提出的分布式经济调度控制策略可同时有效满足主动配电网功率平衡和发电成本最小的要求, 且主动配电网可保持稳定运行, 可以应对负荷变动、DG “即插即用”、PCC 功率指令变化以及通信拓扑连通下的通信故障等情况, 提高了主动配电网分布式经济调度策略的实用性与可靠性。

(2) 本文给出的时延稳定判据可有效分析主动配电网分布式经济调度系统对称和非对称的时延稳定性, 以此为基础利用 LMI 可求得系统保持稳定的时延上界, 降低了结果的保守性。当实际时延小于稳定裕度时, 随着时延的增大各 DG 的微增成本进入稳定的时间将增加且波动幅度增大, 但系统可保持稳定; 而当时延超过稳定裕度时系统将失去稳定性。

(3) 分布式经济调度策略中通信拓扑和反馈系数将影响系统的时延稳定裕度。当拓扑连通的度数增大时, 系统时延稳定裕度增大; 而当反馈系数增加时, 系统对称和非对称时延稳定裕度均减小, 反馈系数相同时系统不对称时延稳定裕度要大于对称时延下的系统稳定裕度。因此, 从提高主动配电网分布式经济调度系统稳定性的角度而言, 应适当增加系统的通信连接, 选择较小的反馈系数, 并尽可能减小 DG 检测自身状态信息的时延。

本文研究中考虑的是具有二次项形式的分布式电源成本-功率函数, 而实际成本函数可能是非凸的, 甚至是不连续的, 给设计分布式经济调度策略带来了困难。此外, 分布式经济调度系统运行时还需要考虑除了功率平衡约束和分布电源出力上下限约束之外的安全性约束, 例如节点电压约束和支路潮流约束等, 如何在分布式框架下在经济调度模型中对这些全局性因素进行处理也是需要进一步深入研究的问题。

参考文献

[1] 乐健, 周谦, 王曹, 等. 无功补偿设备和分布式电源协

- 同的配电网优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 38-47.
- LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on distributed optimal control strategy for a distribution network based on the cooperation of DGs and Var compensators[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 38-47.
- [2] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
- ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Ziang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.
- [3] 唐程辉, 张凡, 张宁, 等. 基于风电场总功率条件分布的电力系统经济调度二次规划方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2069-2078.
- TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Quadratic programming for power system economic dispatch based on the conditional probability distribution of wind farms sum power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2069-2078.
- [4] 李晓明, 刘翔宇, 李安昌, 等. 配电网电压控制的分布式光伏无功仿射可调鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 124-131.
- LI Xiaoming, LIU Xiangyu, LI Anchang, et al. Distributed photovoltaic reactive power affine adjustable robust optimization method for voltage control of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 124-131.
- [5] 李哲, 付明, 张晓燕, 等. 提高分布式储能系统放电效率的分散协调优化方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 98-104, 119.
- LI Zhe, FU Ming, ZHANG Xiaoyan, et al. Decentralized cooperative optimization method enhancing discharging efficiency of distributed energy storage system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 98-104, 119.
- [6] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊): 365-373.
- ZHUANG Huaidong, WU Hongbin, LIU Haitao, et al. Multi-objective economic dispatch of microgrid system considering electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 365-373.
- [7] LI Q, GAO W, ZHANG H W, et al. Consensus based distributed economic dispatch control method in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 941-954.
- [8] 李慧琴, 陈燕, 王岗红, 等. 计及功率预测误差的主动配电网实时经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 100-107.
- LI Huiqin, CHEN Yan, WANG Ganghong, et al. Real-time economic dispatching method for active distribution networks considering power prediction errors[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 100-107.
- [9] 张志荣, 邱晓燕, 孙旭, 等. 协调柔性负荷与储能的交直流配电网经济优化调度[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 116-123.
- ZHANG Zhirong, QIU Xiaoyan, SUN Xu, et al. Economic optimal scheduling of AC/DC distribution network coordinating flexible load and energy storage systems[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 116-123.
- [10] 张刘冬, 丁昊, 袁晓冬, 等. 考虑价格需求响应的主动配电网动态经济调度[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 31-35, 42.
- ZHANG Liudong, DING Hao, YUAN Xiaodong, et al. Active and reactive power coordinated economic dispatch of active distribution networks with consideration of price-based demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 31-35, 42.
- [11] 温广辉, 余星火, 刘智伟. 智能电网中分布式经济调度研究进展: 综述(英文)[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(1): 25-40.
- WEN Guanghui, YU Xinghuo, LIU Zhiwei. Recent progress on the study of distributed economic dispatch in smart grid: an overview[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(1): 25-40.
- [12] 乐健, 周谦, 赵联港, 等. 考虑个体欺骗的有源配电网完全分布式经济调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5445-5454.
- LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Fully distributed economic dispatch of active distribution network considering individual cheating[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5445-5454.
- [13] 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.
- [14] LE J, ZHOU Q, ZHAO L, et al. Research on the real-time distributed economic dispatch strategy for microgrids[J]. Energies, 2019, 12(20): 1-16.
- [15] YANG T, WU D, SUN Y, et al. Impacts of time delays on distributed algorithms for economic dispatch[C] // 2015

- IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-28, 2015, Denver CO: 1-5.
- [16] CHEN G, ZHAO Z. Delay effects on consensus-based distributed economic dispatch algorithm in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 602-612.
- [17] HUANG B, LIU L, ZHANG H, et al. Distributed optimal economic dispatch for microgrids considering communication delays[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(8): 1634-1642.
- [18] 闻秉科. 考虑稳定性的微电网经济运行优化策略研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- WEN Bingke. Economic operation optimization strategy of microgrid considering stability[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [19] XU Yan. A review of cyber security risks of power systems: from static to dynamic false data attacks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 190-201.
- [20] 康慨, 邓少平, 张超, 等. 考虑联络线功率稳定的微电网鲁棒经济调度模型[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 60-67.
- KANG Kai, DENG Shaoping, ZHANG Chao, et al. Robust economic dispatch model of interconnected microgrid considering tie line power stability[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 60-67.
- [21] NI B, XIAO D, SHAH S L. Time delay estimation for MIMO dynamical systems with time-frequency domain analysis[J]. Journal of Process Control, 2010, 20(1): 83-94.
- [22] 陈萌, 肖湘宁, 罗超. 基于虚拟同步发电机的微电网延时补偿二次频率控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3845-3854.
- CHEN Meng, XIAO Xiangning, LUO Chao. Secondary frequency control including delay compensation in microgrids based on virtual synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3845-3854.
- [23] 贾宏杰, 安海云, 余晓丹. 电力系统时滞依赖型鲁棒稳定判据及其应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 6-11.
- JIA Hongjie, AN Haiyun, YU Xiaodan. A delay-dependent robust stability criterion for power system and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 6-11.
- [24] 钱伟, 王晨晨, 费树岷. 区间变时滞广域电力系统稳定性分析与控制器设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3640-3650.
- QIAN Wei, WANG Chenchen, FEI Shumin. Stability analysis and controller design of wide area power system with time varying delay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3640-3650.
- [25] 丁贵立, 林涛, 陈汝斯, 等. 抗饱和和广域时滞阻尼控制器参量 Lyapunov 设计策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 181-191.
- DING Guili, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Research on design method of anti-windup wide-area time-delay damping controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 181-191.
- [26] HE Y, WU M, SHE J H, et al. Parameter-dependent Lyapunov functional for stability of time-delay systems with polytopic-type uncertainties[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(5): 828-832.
- [27] YAO W, JIANG L, WU Q H, et al. Delay-dependent stability analysis of the power system with a wide-area damping controller embedded[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 233-240.

收稿日期: 2022-01-02; 修回日期: 2022-03-17

作者简介:

乐健(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量问题及其控制技术; E-mail: lej01@tsinghua.org.cn

蔡淦(1999—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统经济调度及优化控制。E-mail: 1679264596@qq.com

(编辑 魏小丽)