

基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制策略

余志文, 艾 芊

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 利用智能体间的分布式通信, 提出了一种基于多智能体一致性的自适应下垂控制策略, 用于解决传统下垂控制中频率和电压偏差、系统稳定性和功率分配精度的问题。在传统下垂控制基础上, 建立了有功功率分配、有功-频率和无功-电压的二阶动态模型。在考虑通信延迟的基础上, 利用无领导的一致性控制分布式电源的有功出力满足传统下垂控制的要求; 利用含虚拟领导者的一致性修正传统下垂控制中的频率和电压偏差; 通过 Lyapunov 直接法验证了系统的渐进稳定性, 故而解决了传统控制中有功下垂系数对系统稳定性的影响问题; 分析了通信扰动对控制结果和稳定性的影响。通过仿真验证了所提策略的有效性。

关键词: 微电网; 自适应下垂控制; 多智能体系统; 延时; 渐进稳定

中图分类号: TM 761; TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.021

0 引言

分布式发电 DG (Distributed Generation) 因其具有能耗低、效率高、经济性和环境友好等优点受到越来越多的关注。然而, 受一次能源限制, 风力发电、光伏发电等 DG 的间歇性和低惯性给电力系统供电可靠性、稳定性和电能质量带来了许多挑战, DG 的利用受到限制。在低压配电区域, 微电网 (MG) [1-3] 通过集成不同类型分布式电源、重要负荷和储能可有效解决分散式小型 DG 的消纳, 同时向重要负荷提供不间断供电, 提高供电可靠性。

一般地, 微电网可工作在并网和离网 2 种模式下。正常运行时, 微电网与大电网连接, DG 工作在最大功率点跟踪状态。由于 DG 容量较小, 系统动态特性由大电网主导。当主网发生故障而使得微电网从主网断开时, 工作在离网模式。此时, DG 需改变运行模式并向重要负荷提供持续的电能; DG 和储能需协调运行实现微电网中有功和无功功率平衡, 维持系统频率和电压稳定 [4-5]。因此, DG 的协调控制在微电网的运行控制中具有非常重要的意义。

根据结构的不同, 微电网的控制可分为集中式和分布式 2 种。在集中式控制下, 微电网的协调工作主要由中央控制器完成。此时, 中央控制器需与所有监控设备进行通信, 且对控制系统的通信有非常强的依赖性, 通信中的任何失误均有可能造成系统运行的崩溃。近年来分布式控制成为研究的热点, 其中较为典型的是多智能体系统 (MAS) [6-8]。在 MAS 中, 智能体可对系统变化做出快速响应和调节, 具有

较强的自治性; 智能体通过相互之间的信息沟通, 可协作完成系统级的部分功能。在分布式控制系统中, 由于智能体间的信息交互在局部区域进行, 因而控制系统对通信的要求不高; 在保证智能体间信息互联的条件下, 局部的通信问题不会影响系统的协调性, 系统可靠性较高。

在微电网中, 小型 DG 主要通过电压型变流器并网, 系统惯性近似为 0。通过模拟传统发电机中功率调节特性, 提出下垂控制用于实现多个 DG 并联运行, 实现 DG 有功和无功功率的协调控制 [4-13]。文献 [4] 在分析 DG 内部各子系统及其控制器模型的基础上, 研究了采用下垂控制的微电网系统的小信号模型, 结果表明高增益的有功下垂系数可能造成系统的不稳定。针对此问题, 文献 [9] 设计了考虑稳定性的能量管理系统, 文献 [10-13] 分别提出了一系列改进方法用于提高系统的稳定性。文献 [10] 利用遗传算法优化下垂系数使得系统在负载变化的情况下可快速运行至新的稳定点。为提高弱负载时的有功控制精度和减小有功下垂系数对稳定性的影响, 文献 [11] 提出了非线性的变系数下垂控制方法。参考传统电力系统中电力系统稳定器的设计方法, 文献 [12] 提出了增加辅助控制环节来提高系统稳定性。上述文献对改善系统稳定性均有较好的作用, 但是没有对传统下垂控制中存在的电压和频率偏差进行深入分析。文献 [13] 在传统线性下垂控制器的结构上增加积分量用于修正稳定偏差, 但对于系统稳定性没有进行详细分析。文献 [14-15] 提出了基于有功-功角和虚拟磁通的下垂控制方法, 以解决传统下垂控制中的频率偏差问题, 但未涉及电压偏差的修正。

在传统下垂控制中, 虽然 DG 仅需要采集端口电压和频率, 不需要进行相互通信, 但不能与其他 DG 协调完成系统级的目标。在电力系统中, 由于能量管

收稿日期: 2016-10-27; 修回日期: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51577115); 国家重点研发计划项目 (2016YFB091300)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51577115) and the National Key Research and Development Program of China (2016YFB091300)

理系统的需要,通信网络是必然存在的。针对这一特点,本文以 DG 间的局部通信为基础,提出应用一致性控制使得 DG 协调合作,完成系统级目标,如频率稳定。以传统下垂控制中有功分配和电压/频率的调节特性为基础,提出了考虑通信网络延时和扰动情况下的下垂参数自适应控制策略,使得 DG 在满足下垂控制特性要求的同时,保持系统频率和电压稳定在目标值。同时,通过应用 Lyapunov 直接法分析系统的稳定性,结果表明在本文所提控制策略下,系统是渐进稳定的。

1 微电网多智能体模型

在忽略线路电阻的情况下,传统下垂控制为:

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_{0i} - m_i P_i \\ U_{di} = U_{0i} - n_{ai} Q_i \\ U_{qi} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, ω 为系统频率; U_d 和 U_q 分别为 DG 输出电压在直轴和交轴上的分量; P 和 Q 分别为 DG 输出的有功和无功功率; ω_0 和 U_0 分别为 DG 输出为 0 情况下的频率和电压; m 和 n_a 分别为有功和无功下垂系数。

图 1 给出了式(1)相对应的控制框图。图中 LPF 为低通滤波器, ω_c 为截止频率。

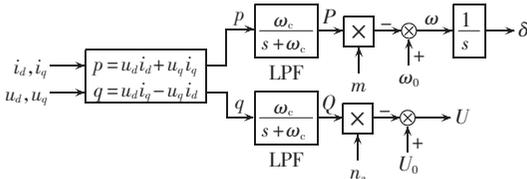


图 1 传统下垂控制框图

Fig.1 Block diagram of traditional droop control

ω_0 和 U_0 分别用于控制频率和电压的初值,在传统下垂控制中为常量,在小信号稳定性分析中常被忽略^[4]。而改进下垂策略主要通过控制其他电气量或增加辅助控制量来改善系统性能。本文主要通过自适应控制策略调整这 2 个控制量使其满足系统要求。

对式(1)求导可得:

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{0i} - m_i \dot{P}_i = x_{\omega i} \quad (2)$$

$$\dot{U}_{di} = \dot{U}_{0i} - n_{ai} \dot{Q}_i = x_{U_i} \quad (3)$$

其中, $x_{\omega i}$ 和 x_{U_i} 分别为频率和电压的一阶微分。

对式(2)和(3)再次求导可得:

$$\dot{x}_{\omega i} = u_{c\omega i} \quad (4)$$

$$\dot{x}_{U_i} = u_{cU_i} \quad (5)$$

其中, $u_{c\omega i}$ 和 u_{cU_i} 分别为频率和电压的二阶微分。式(2)—(5)共同构成了微电网的二阶动态调节模型。

对于式(1)所示的下垂控制, DG 间的有功功率分配需满足式(6)所示的分配特性。

$$m_1 P_1 = m_2 P_2 = \dots = m_n P_n \quad (6)$$

其中, n 为智能体的个数。类似于频率和电压的模型,

对式(6)连续 2 次求导得有功功率的控制模型为:

$$\begin{cases} m_i \dot{P}_i = x_{P_i} \\ \dot{x}_{P_i} = u_{cP_i} \end{cases} \quad (7)$$

由上述模型可知,合理调整 $u_{c\omega i}$ 、 u_{cU_i} 和 u_{cP_i} 可控制 $x_{\omega i}$ 、 x_{U_i} 和 x_{P_i} 为 0,修正 ω_0 和 U_0 可使得系统的频率和电压运行在额定值。

2 自适应下垂控制

2.1 图论基本知识

在电力系统中, DG 与 DG 之间、DG 与中央控制之间的通信一般通过串行总线的方式实现,因而微电网的分散式通信结构可用无向图来表示。在无向图中, DG 可看作图的节点,而 DG 之间的通信为图的边。分布式通信网络的图可用 $G=(V, E, A)$ 表示,其中 V 为节点的集合, $E \subseteq (V \times V)$ 为边的集合, A 表示图的邻接矩阵, A 中元素 a_{ij} 表示节点 j 通往节点 i 边的权重, $a_{ij}=0$ 表示 2 个智能体间无信息交互, a_{ii} 表示智能体自身与自身的信息交互,一般忽略不计,即 $a_{ii}=0$ 。图的拉普拉斯矩阵可表示为 $L=-A$ 。在图中,如果任意智能体 i 可收到其他智能体的信息,则表示图 G 是连通图。本文在后续的分析中主要通过图 2 所示的仿真系统进行说明。

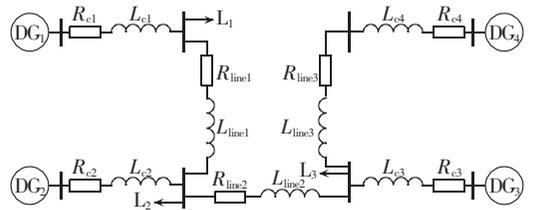


图 2 仿真系统

Fig.2 Simulation system

2.2 有功功率控制

由于 DG 的有功功率随负荷的变化而改变,因而不存在固定的目标值。假设 t_d 为通信系统中的延时,本文提出采用无领导者的一致性实现 DG 有功功率的控制,具体如式(8)所示,通信拓扑如图 3 所示。

$$u_{cP_i} = u_{cP_{\alpha i}} + u_{cP_{\beta i}} \quad (8)$$

$$u_{cP_{\alpha i}} = -k_{P1} \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ij} \Delta m P_{ij})$$

$$u_{cP_{\beta i}} = \sum_{i=1, i \neq j}^n [a_{ij} \text{sign}(x_{P_{ji}}) |x_{P_{ji}}|^{k_{P2}}]$$

$$\Delta m P_{ij} = m P_i(t) - m P_j(t - t_d)$$

$$x_{P_{ji}} = x_{P_j}(t - t_d) - x_{P_i}(t)$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

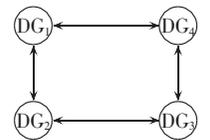


图 3 无领导的通信系统

Fig.3 Communication system without leader

其中, $u_{cP_{\alpha i}}$ 和 $u_{cP_{\beta i}}$ 表示 u_{cP_i} 中的 2 个相互独立的部分, $u_{cP_{\alpha i}}$ 主要作用是控制所有 DG 的有功下垂系数与有功功率的乘积 (mP) 相等, $u_{cP_{\beta i}}$ 主要作用是控制其微分量相等; k_{p1} 、 k_{p2} 为一致性协议中的控制参数, 且 $k_{p1} > 0$ 。

结合式(7)所示的有功调节模型, 可获得有功功率调节的平衡点。

$$m_i P_i(t) = m_j P_j(t - t_d) \quad (9)$$

$$m_i \dot{P}_i(t) = m_j \dot{P}_j(t - t_d) \quad (10)$$

当系统稳定运行时, 有功的一阶和二阶导数均为 0, 即 DG 的输出功率为常数。文献[7-8]提出的一阶一致性只考虑式(9), 因此通信的延时对系统的控制结果和稳定性具有较大的影响。同时, 在控制系统中, 需要进一步分析系统的稳定性。

本文应用 Lyapunov 直接法分析系统的渐进稳定性。根据 Lyapunov 直接法原理可以知道, 若存在能量函数 $V(\mathbf{x})$ 满足以下 4 个方面要求则系统渐进稳定。

- $V(0) = 0$ 。
- 当 $\mathbf{x} \neq 0$ 时, 存在 $V(\mathbf{x}) > 0$ 。
- 当 $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$ 时, 存在 $V(\mathbf{x}) \rightarrow \infty$ 。
- 对于所有的 $\mathbf{x} \neq 0$, $\dot{V}(\mathbf{x}) < 0$ 。

针对式(7)和(8)构成的系统, 本文选用式(11)所示的能量函数。

$$V(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_{P_i}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n [k_{p1} a_{ij} (\Delta m P_{ij})^2] \quad (11)$$

通过分析子函数特性可知, 式(11)满足上述的前三方面要求, 还需要进一步分析其导数。

对式(11)求导可得:

$$\dot{V}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n x_{P_i} u_{cP_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (k_{p1} a_{ij} \Delta m P_{ij} m \dot{P}_{ij}) \quad (12)$$

将式(8)的控制方程代入式(12)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}) = & \sum_{i=1}^n x_{P_i} \sum_{j=1, j \neq i}^n [-k_{p1} a_{ij} \Delta m P_{ij} + a_{ij} \text{sign}(x_{P_{ji}}) |x_{P_{ji}}|^{k_{p2}}] + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (k_{p1} a_{ij} \Delta m P_{ij} x_{P_{ij}}) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)等号右侧的第一和第三部分满足:

$$\sum_{i=1}^n x_{P_i} \sum_{j=1, j \neq i}^n (k_{p1} a_{ij} \Delta m P_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (k_{p1} a_{ij} \Delta m P_{ij} x_{P_{ij}}) \quad (14)$$

因此, $\dot{V}(\mathbf{x})$ 可简化为:

$$\dot{V}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n [a_{ij} x_{P_{ij}} \text{sign}(x_{P_{ji}}) |x_{P_{ji}}|^{k_{p2}}] \quad (15)$$

故对所有的 $\mathbf{x} \neq 0$, $\dot{V}(\mathbf{x}) < 0$ 恒成立, 即在式(8)所示的一致性协议作用下, 系统是渐进稳定的。

在传统的一阶一致性协议中, 通信延时 t_d 对系统的稳定性存在较大的影响, 尤其是当 t_d 超过拉普拉斯矩阵的第二大特征根的绝对值时, 系统是不稳定的^[16]。

2.3 有功-频率下垂控制

本节主要分析通过 ω_{0i} 的自适应调节修正系统频率偏差。在电力系统中, 系统频率的控制目标为预先设定的额定值, 即在稳定运行状态下, 所有 DG 保持额定频率运行。本文应用含虚拟领导的一致性实现频率的自适应控制。含虚拟领导的通信拓扑如图 4 所示, 控制方程如式(16)所示。

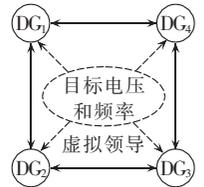


图 4 含虚拟领导的通信系统
Fig.4 Communication network with virtual leader

$$u_{c\omega i} = u_{c\omega\alpha i} u_{c\omega\beta i} + u_{c\omega\gamma i} \quad (16)$$

$$u_{c\omega\alpha i} = -k_{\omega 1} \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} \omega_{ij}$$

$$u_{c\omega\beta i} = \sum_{i=1, i \neq j}^n [a_{ij} \text{sign}(x_{\omega_{ji}}) |x_{\omega_{ji}}|^{k_{\omega 2}}]$$

$$u_{c\omega\gamma i} = k_{\omega 3} [-k_{\omega 1} \omega_{iL} + \text{sign}(x_{\omega_{Li}}) |x_{\omega_{Li}}|^{k_{\omega 2}}]$$

$$\omega_{ij} = \omega_i(t) - \omega_j(t - t_d)$$

$$\omega_{iL} = \omega_i - \omega_L$$

$$x_{\omega_{ji}} = x_{\omega_{j}}(t - t_d) - x_{\omega_i}(t)$$

$$x_{\omega_{Li}} = x_{\omega_L} - x_{\omega_i}$$

其中, 下标 L 表示含控制目标的虚拟领导, 可以是中央控制器; $u_{c\omega\alpha i}$ 、 $u_{c\omega\beta i}$ 和 $u_{c\omega\gamma i}$ 表示一致性控制中的 3 个子控制分量, 其中前两控制部分的作用与式(8)类似, 第三部分主要用于控制 DG 的频率和虚拟领导相同; $k_{\omega 1}$ 、 $k_{\omega 2}$ 和 $k_{\omega 3}$ 为一致性协议中的控制参数, 且 $k_{\omega 1} > 0$, $k_{\omega 3} > 0$ 。在频率控制中, 由于虚拟领导中的额定频率是提前设定的, 因而可忽略虚拟领导与 DG 间的通信延时。

类似于有功功率的分析, 一致性协议作用下的平衡点为:

$$\omega_i(t) = \omega_j(t - t_d) = \omega_N \quad (17)$$

$$\dot{\omega}_i(t) = \dot{\omega}_j(t - t_d) = 0 \quad (18)$$

式(17)表明, 稳定状态下, 各 DG 输出电压的频率为系统的额定频率 ω_N , 即系统频率控制的目标。

同理, 选定式(19)所示的能量函数分析系统的稳定性。

$$\begin{aligned} V(\mathbf{x}) = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_{\omega_{iL}}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (k_{\omega 1} a_{ij} \omega_{ij}^2) + \\ & \sum_{i=1}^n (k_{\omega 1} k_{\omega 3} \omega_{iL}^2) \end{aligned} \quad (19)$$

对式(19)求导, 同理应用式(12)~(14)的分析方法化简可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}) = & \sum_{i=1}^n \hat{x}_{\omega_i} \sum_{j=1, j \neq i}^n [a_{ij} \text{sign}(\hat{x}_{\omega_{ji}}) |\hat{x}_{\omega_{ji}}|^{k_{\omega 2}}] + \\ & k_{\omega 3} \sum_{i=1}^n [\hat{x}_{\omega_i} \text{sign}(-\hat{x}_{\omega_i}) |-\hat{x}_{\omega_i}|^{k_{\omega 2}}] \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $\hat{x}_{\omega_i} = x_{\omega_i} - x_{\omega_{iL}}$ 。

综上, 式(19)所示的能量函数满足用 Lyapunov

直接法分析系统渐进稳定性的所有要求。因而在式(16)所示的一致性协议作用下,系统是渐进稳定的。

结合式(2)和(4)的参数调节模型可计算得到 ω_{0i} 为:

$$\omega_{0i} = \int \left(m_i \dot{P}_i + \int u_{c\omega i} dt \right) dt + \omega_{0i0} \quad (21)$$

其中, ω_{0i0} 为 ω_{0i} 的初始值,为提高收敛速度,可设置为系统频率的额定值。

结合 2.2 节的有功功率控制,式(21)中的 $m\dot{P}$ 可由式(7)和(8)获得,即:

$$m_i \dot{P}_i = \int u_{cP_i} dt + m_i \dot{P}_{i0} \quad (22)$$

其中, \dot{P}_{i0} 为有功功率一阶导数 \dot{P}_i 的初始值。由于控制的目标是使得 P 为恒定值,因而 \dot{P}_i 可设置为0。

因此,联合式(21)和(22)可获得频率的自适应下垂控制,其控制框图如图5所示。

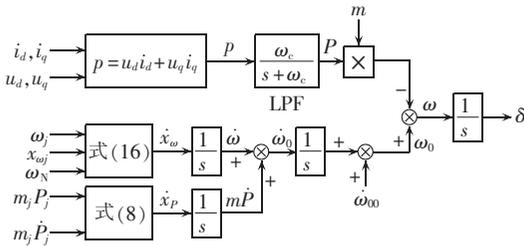


图5 频率自适应下垂控制框图

Fig.5 Block diagram of adaptive frequency droop control

2.4 无功-电压下垂控制

在传统下垂控制中,由于线路电阻和各节点电压的不同,DG的无功功率不满足特定的关系。本文主要通过自适应下垂控制使得DG的节点电压维持在额定值,从而为负荷提供优质的电能质量。在额定电压已知的情况下,电压的自适应下垂控制类似于频率, u_{cU} 可用式(16)所示的一致性协议获得,式(16)中的频率(ω)由电压(U)替换即可。

类似于频率控制,可得如式(23)所示的无功-电压的自适应下垂控制,其控制框图如图6所示。

$$U_{0i} = \int \left(\int u_{cU i} dt \right) dt + U_{0i0} \quad (23)$$

其中, U_{0i0} 为 U_{0i} 的初始值,为加快稳定速度,可设置为额定电压。

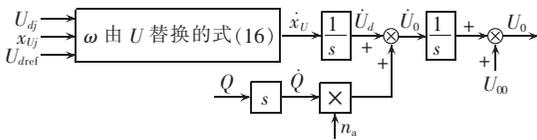


图6 电压自适应下垂控制框图

Fig.6 Block diagram of adaptive voltage droop control

2.5 扰动下的控制特性

在实际微电网中,控制器中的采集、传输数据精度和通信失误等扰动可能影响DG的控制精度,甚至稳定性。以频率调节为例,分析考虑扰动的控制

特性。

设 δ_{ω_j} 和 $\delta_{x_{\omega_j}}$ 分别表示智能体 i 受到智能体 j 的频率及其导数中的扰动,则如式(16)所示的一致性方程需要进行修正,即:

$$\widehat{\omega}_{ij} = \omega_i(t) - [\omega_j(t-t_d) + \delta_{\omega_j}] \quad (24)$$

$$\widehat{x}_{\omega_{ji}} = x_{\omega_j}(t-t_d) + \delta_{x_{\omega_j}} - x_{\omega_i}(t) \quad (25)$$

系统平衡点为:

$$\omega_i(t) = \omega_j(t-t_d) + \delta_{\omega_j} = \omega_N \quad (26)$$

$$\omega_{\omega_i}(t) = x_{\omega_j}(t-t_d) + \delta_{x_{\omega_j}} = 0 \quad (27)$$

由式(26)和(27)可知,稳定状态下,DG i 以虚拟领导的频率运行,即智能体 i 的控制目标基本不受传输信息中扰动的影响,具有较强的鲁棒性。

在稳定性分析中,用含扰动量的 $\widehat{\omega}_{ij}$ 和 $\widehat{x}_{\omega_{ji}}$ 代替 ω_{ij} 和 $x_{\omega_{ji}}$ 同样可得式(20)所示的结果,即在通信扰动的情况下,系统仍然是渐进稳定的。

3 仿真分析

本文采用的微电网仿真系统如图2所示,其分布式通信网络如图3所示。在无向图中,系统的拉普拉斯矩阵为:

$$L = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

微电网中的线路和负载参数如下:线路中 $R_{c1} = R_{c2} = R_{c3} = R_{c4} = 0.2 \Omega$, $L_{c1} = L_{c2} = L_{c3} = L_{c4} = 1 \text{ mH}$, $R_{line1} = R_{line3} = 0.23 \Omega$, $L_{line1} = L_{line3} = 0.318 \text{ mH}$, $R_{line2} = 0.35 \Omega$, $L_{line2} = 1.847 \text{ mH}$;负载中 $P_1 = P_2 = 36 \text{ kW}$, $Q_1 = Q_2 = 36 \text{ kvar}$, $P_3 = 45.9 \text{ kW}$, $Q_3 = 22.8 \text{ kvar}$ 。下垂控制参数和各一致性控制中的参数如下:下垂系数中 $m_{P1} = m_{P2} = 0.000094$, $n_{aQ1} = n_{aQ2} = 0.0013$, $m_{P3} = m_{P4} = 0.000125$, $n_{Q3} = n_{Q4} = 0.0015$, $U_{0i} = 330 \text{ V}$, $\omega_{0i} = 325.3 \text{ rad/s}$;一致性控制参数中 $k_{\omega 1} = 50$, $k_{\omega 2} = 0.8$, $k_{\omega 3} = 800$, $k_{U1} = 150$, $k_{U2} = 0.8$, $k_{U3} = 3$, $k_{P1} = 500$, $k_{P2} = 0.8$ 。本节主要通过3个仿真案例说明本文所提方法的有效性。

3.1 无延时和扰动的仿真

忽略通信延时和扰动的仿真结果如图7所示。为说明本文所提策略的有效性,图8给出了相同参数条件下采用传统下垂控制的仿真结果。仿真过程中, L_1 和 L_3 在 $t=0$ 时接入系统, L_2 在 $t=2 \text{ s}$ 时接入系统。

由图7(a)和(b)可知,在负载变化的情况下,本文提出的控制策略可自适应调整下垂参数,从而使系统频率保持为额定值;而在图8(a)中,尽管通过设定初值使系统的初始频率在额定值附近,但在负荷变化的情况下,系统的频率会发生较大偏差。电压控制的仿真结果如图7(c)和(d)所示,在自适应控制

中, U_0 随着负荷的变化而做出相应的调整, 使得 DG 的端电压 U 维持在额定值; 而在图 8(b) 中, 各 DG 的端电压随负荷变化而改变。上述结果表明, 本文提出的自适应下垂控制可较好地修正传统下垂控制中的频率和电压偏差, 改善供电质量。

由图 7(e) 可知, 在修正频率和电压的同时, DG 的有功功率分配仍满足式(6)的要求。相比于图 8(c) 中的有功功率, 由于在自适应下垂控制中节点的端电压均维持在额定值, 而仿真中的负载为恒阻抗负载, 因而 DG 输出的有功功率有所上升。在自适应下垂控制中, 由于节点电压维持在额定值, $t=2$ s 时所增

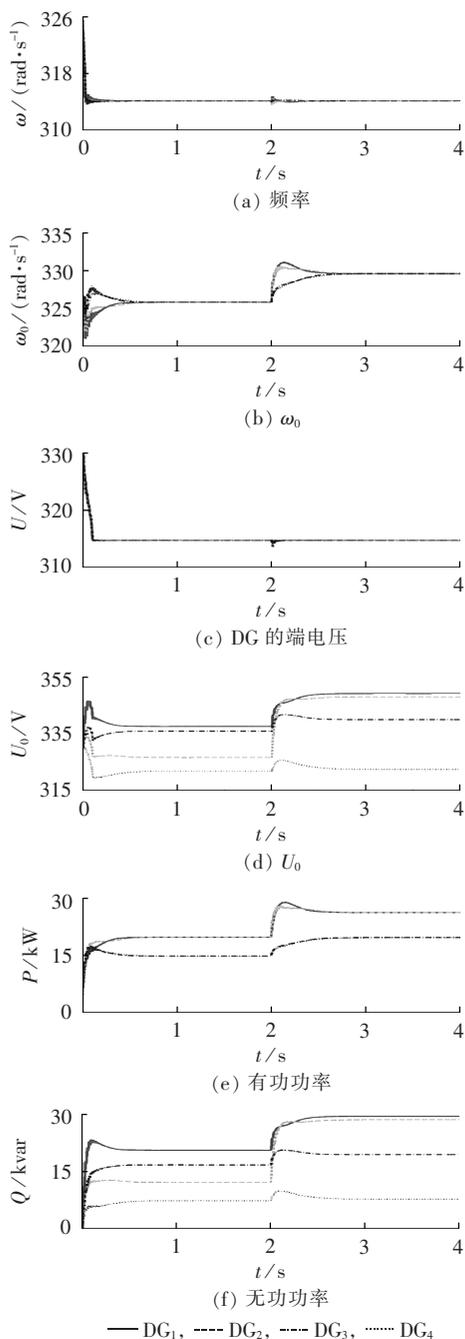


图 7 自适应下垂控制仿真结果

Fig.7 Simulative results with adaptive droop control

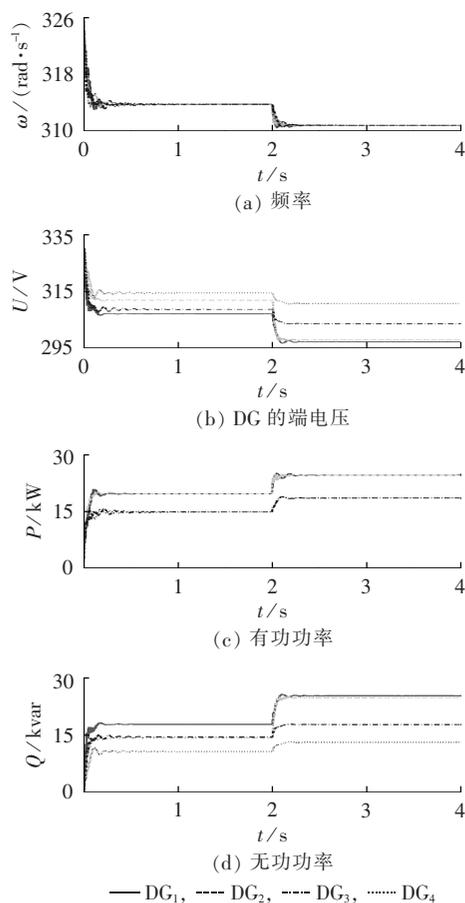


图 8 传统下垂控制仿真结果

Fig.8 Simulative results with traditional droop control

加的 L_2 的无功负荷主要由 DG₂ 承担, 实现了无功的就地平衡, 其结果如图 7(f) 所示。

3.2 考虑延时情况下的仿真

在 MAS 中, 智能体一般通过串行的方式实现相互之间的信息交互, 主要方式包括 RS485、CAN 和 Ethernet 等。在上述通信方式中, RS485 的通信速度最慢; 在考虑通信稳定性的条件下, 一般选用 9600 bit/s 的波特率。本文中, 智能体间需交换的数据包括 DG 的有功功率与有功下垂系数的乘积 (mP) 及其导数、无功功率 Q 、输出频率及其导数、输出电压及其导数 7 个模拟量。为提高数据传输精度, 上述各传输量均采用 32 位有符号整型进行传输。在考虑串口通信的控制位 (一般为 16 位) 及校验码 (通常采用 CRC 校验, 为 16 位) 的情况下, 综合上述分析, 智能体间一次通信的有效数据为 256 位, 在考虑串口通信的其他数据, 智能体单向传输的数据不大于 512 位。因此, 数据交换一次的最大时间 $t_{\max} = 512 \times 2 / 9600 = 0.107$ (s)。在图 3 和 4 的通信系统中, 智能体需和 2 个相邻智能体实现数据交换, 因而单一智能体和相邻智能体完成数据交换的总时间为 0.214 s。在考虑 DG 计算速度等其他因素的影响条件下, 可假设分布式通信系统中的延时为 0.5 s。同时设定 L_2 在 $t=10$ s 时接入系统。该情况下的仿真结果如图 9 所示。

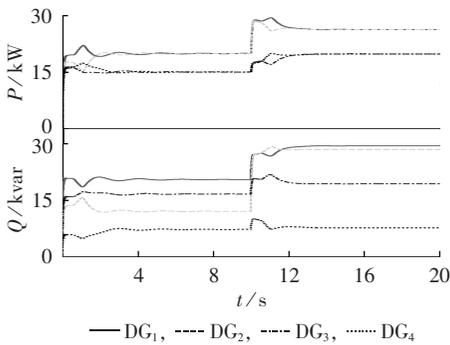


图 9 考虑延时的仿真结果

Fig.9 Simulative results considering time-delay

由图 9 可知,在 t 为 10~10.5 s 期间,由于通信延时的影响,DG 从相邻智能体间接收到的信息未能更新,由式(8)和(16)可知,下垂控制中的辅助控制量仍保持负荷变化前的状态值,因而式(21)和(23)中的 ω_{0i} 和 U_{0i} 保持恒定,即 DG 按传统的下垂控制规律实现控制。当 $t > 10.5$ s 时,DG 接收到邻近 DG 的功率、频率和电压的更新信息后对下垂参数进行自适应调整;由 2.2 和 2.3 节中的稳定性分析可知,本文所提自适应下垂控制策略下系统是渐进稳定的,即在通信时延后,DG 的状态可根据式(8)和(16)进行调整。由式(9)、(10)、(17)和(18)的分析可知,在经过一段时间的调整后,系统将稳定运行于额定频率和电压。图中,系统在 2.5 s 后调节至稳定运行状态。图 9 的结果表明,本文提出的自适应协调控制策略在通信延时的系统中仍有较好的控制效果。

3.3 考虑延时和扰动情况下的仿真

假设分布式通信系统中的延时为 0.5 s,频率和有功功率的扰动分别为 $\delta_{\omega_j} = 1.25 \sin(2\pi \times 500 t)$ 和 $\delta_{P_j} = 50 \sin(2\pi \times 500 t)$ 。同时考虑通信延时和扰动的仿真结果如图 10 所示。

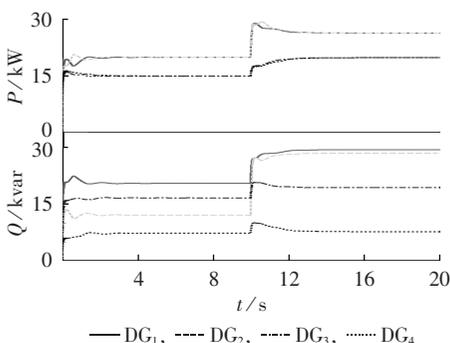


图 10 考虑延时和扰动的仿真结果

Fig.10 Simulative results considering time-delay and disturbance

由图 10 可知,在考虑通信延时和固定扰动的情况下,当系统负荷恒定时(0~10 s)稳定运行,即系统的稳定状态不受通信延时和扰动的影响。在 $t = 10$ s 时增加负荷,DG 在通信延迟的时间段内以传统下垂控制运行,实现对负荷的快速响应;在接收到其他 DG

的更新信息后,下垂参数自适应调整,使得系统保持额定频率和电压运行。但是由于扰动的影响,系统的调节时间有所增加,在本文选取的仿真参数下,调节时间约为 3 s。

4 结论

微电网的分布式控制可避免中央控制器的使用和降低控制系统对通信网络的要求,且该控制下系统的可靠性较高。在考虑通信延时和扰动的情况下,本文提出了基于 MAS 一致性的自适应下垂参数控制策略。针对下垂控制中有功功率的分配规律,应用无领导者的一致性协调 DG 的有功功率,使其能快速响应负荷的变化;提出了含虚拟领导者的一致性自适应调整下垂参数,实时降低频率和电压的动态偏差,保证供电质量。同时,在本文所提策略的控制下,系统是渐进稳定的,从而避免了传统下垂控制中高增益有功下垂系数对稳定性的影响。仿真结果表明本文所提策略在维持系统稳定性的同时,能较好地改善系统电压和频率。

参考文献:

- [1] 徐意婷,艾芊. 含微电网的主动配电网协调优化调度方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):18-26.
XU Yiting,AI Qian. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):18-26.
- [2] 张晓波,张保会,吴雄. 风光预测后微电网的优化运行[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):21-25.
ZHANG Xiaobo,ZHANG Baohui,WU Xiong. Optimal microgrid operation based on wind/PV power prediction[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):21-25.
- [3] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei,et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.
- [4] POGAKU N,PRODANOVIC M,GREEN T C. Modeling,analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):613-625.
- [5] GUERRERO J M,MATAS J,CASTILLA M,et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2006,53(5):1461-1470.
- [6] YU Z,AI Q,GONG J,et al. A novel secondary control for microgrid based on synergetic control of multi-agent system[J]. Energies,2016,9(4):243.
- [7] 陈刚,李志勇,赵中原. 微电网系统的分布式优化下垂控制[J]. 控制理论与应用,2016,33(8):999-1006.
CHEN Gang,LI Zhiyong,ZHAO Zhongyuan. Distributed optimal droop control in micro-grid systems[J]. Control Theory & Applications,2016,33(8):999-1006.

- [8] 张孝顺,余涛. 互联网 AGC 功率动态分配的虚拟发电部落协同一致性算法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15):3750-3759. ZHANG Xiaoshun, YU Tao. Virtual generation tribe based robust collaborative consensus algorithm for dynamic generation command dispatch optimization of smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3750-3759.
- [9] BARKLUND E, POGAKU N, PRODANOVIC M, et al. Energy management in autonomous microgrid using stability constrained droop control of inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2346-2352.
- [10] AZADANI E N, HOSSEINIAN S H, DIVSHALI P H, et al. Stability constrained optimal power flow in deregulated power systems[J]. Electric Power Components and Systems, 2011, 39(8): 713-732.
- [11] ROWE C N, SUMMERS T J, BETZ R E, et al. Arctan power-frequency droop for improved microgrid stability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 3747-3759.
- [12] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, GHOSH A, et al. Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 796-808.
- [13] 谢玲玲, 时斌, 华国玉, 等. 基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 992-998.
- XIE Lingling, SHI Bin, HUA Guoyu, et al. Parallel operation technology of distributed generations based on improved droop control[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 992-998.
- [14] HU J, ZHU J, DORRELL D G, et al. Virtual flux droop method—a new control strategy of inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4704-4711.
- [15] MAJUMDER R, LEDWICH G, GHOSH A, et al. Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2768-2778.
- [16] LOPEZ-MARTINEZ M, DELVENNE J C, BLONDE V D. Optimal sampling time for consensus in time-delayed networked systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(15): 2467-2476.

作者简介:



余志文(1987—),男,湖南冷水江人,博士,从事分布式资源协调控制、微电网稳定性分析和控制方面的研究工作(E-mail: yuzhiwen20061304@163.com)。

Adaptive droop control strategy for microgrid based on consensus of multi-agent system

YU Zhiwen, AI Qian

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the distributed communication between agencies, an adaptive droop control strategy for microgrid based on the consensus of multi-agent system is proposed. The proposed strategy is designed to solve the problems of frequency and voltage deviation, system stability and power allocation accuracy in traditional droop control. The secondary-order dynamic models of active power allocation, active power-frequency and reactive power-voltage droop control are proposed based on the traditional droop control. Considering the time-delay of communication, the leaderless synergetic control is proposed to control the active power of distributed generations to meet the traditional droop control requirements. Meanwhile, the synergetic control with a virtual leader is proposed to correct the system frequency and voltage deviations. Moreover, the direct Lyapunov method is employed to verify the asymptotical stability of the system, and the influence of communication disturbances on the control result and stability is analyzed. The simulative results verify the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: microgrid; adaptive droop control; multi-agent system; time-delay; asymptotical stability