

DOI: 10.7667/PSPC170431

# 基于 Zigbee 通信网络的低压微电网分布式功率控制

陈鹏飞, 邓玮璋

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200082)

**摘要:** 针对低压微电网中传统下垂控制难以实现多个分布式电源(Distributed Generations, DGs)按照下垂系数合理分配有功输出的问题, 提出了一种基于通信网络的分布式控制策略。采用并构建了 Zigbee 无线通信网络拓扑结构以实现 DG 间的信息交互。设计了基于一致性算法的分布式 PI 控制器以实现多个 DG 的有功输出按额定比分配。最后通过仿真验证了所提方法的可行性, 并表明网络延时和网络拓扑结构的变化会影响微电网系统的稳定性。

**关键词:** 低压微电网; 分布式控制; 一致性算法; Zigbee 通信

## Distributed power control for low voltage microgrid based on Zigbee communication network

CHEN Pengfei, DENG Weihua

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

**Abstract:** In low voltage microgrid, it is difficult for traditional droop control to make Distributed Generations (DGs) to output active power reasonably according to the droop coefficient. Aiming at this problem, a distributed control strategy based on the communication network is proposed. Zigbee wireless communication network is employed and the corresponding topology structure is built to realize information exchanging between DGs. The distributed PI controllers which are based on the consensus algorithm are designed to guarantee the active power output of DGs to meet the requirement of rated ratios. Finally, the simulation results show the feasibility of the proposed method, and indicate that the changes of network-induced delays and topology structures will affect the stability of the microgrid system.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shanghai (No. 15ZR1417500).

**Key words:** low voltage microgrid; distributed control; consensus algorithm; Zigbee communication

## 0 引言

微电网是在一定的区域内由 DG、储能装置、负荷和控制保护装置结合构成的系统, 它既能并网运行, 也能独立运行<sup>[1-2]</sup>。当微电网独立运行时, DG 常采用传统下垂控制来获取稳定的电压和频率, 并对输出的有功功率和无功功率进行控制, 能实现 DG 的即插即用和对等控制目标且 DG 间无需通信。而在低压微电网中, 线路呈现阻性, 所以 DG 采用有功功率-幅值(P-V)和无功功率-频率(Q-f)的阻性下垂控制方式<sup>[3]</sup>。

但是由于微电网存在拓扑结构变化和线路阻抗分布不均等原因, 传统下垂控制难以保证 DG 按预定比例出力, 且在低压微电网中有功功率的分配会受到线路阻抗的影响, 同时将会伴随电压跌落的问题

<sup>[4-5]</sup>。为提高 DG 功率分配精度, 许多学者对此展开研究, 如文献[3-15]。微电网系统通常采用分层控制架构<sup>[6]</sup>: 一级控制为 DG 的初级控制, 能实现基本量的调节; 二级控制依据微电网中各种测量值进行系统级调节; 三级控制能实现微电网的经济运行。本文通过二级控制对采用传统下垂控制的一级控制进行改进, 使 DG 有功出力能够达到预定目标。依据通信形式的不同, 二级控制可以通过集中式、分散式和分布式控制的方式实现<sup>[6-15]</sup>。集中式控制<sup>[6-7]</sup>将采集的各节点信息发送给中心控制器, 经过中心控制器处理得到调节指令并回馈给 DG 的本地控制器实现二级控制。但这种控制方式的通信系统结构复杂且可靠性低, 随着系统规模增大将造成通信堵塞。分散式控制<sup>[8-9]</sup>中 DG 根据本地信息进行自治控制且无需通信, 虽降低了成本和复杂程度, 但微电网难以达到额定电压和额定频率的指标。而分布式控制<sup>[10-11]</sup>能够克服两者的缺点, 只需 DG 建立稀疏

通信网络,提高了系统的可靠性和扩展性,在微电网中应用越来越广泛<sup>[12-15]</sup>。文献[12-13]采用多智能体理论, DG 通过相邻单元的信息交换实现分布式控制;文献[14]采用基于一致性算法的分布式控制实现微电网协调控制,适用于电压等级较高的微电网;文献[15]在低压微网中采用基于一致性算法的分布式控制实现微电网有功功率比例分配。然而以上文献只侧重分布式控制策略的研究,较少考虑具体通信网络的特性及其对微电网控制的影响。文献[16]在微电网控制中,采用 Zigbee 技术构建通信网络,分析了通信中网络延时特性及其对微电网的影响,但未考虑多个 DG 输出功率按额定比例分配控制的问题。

本文基于以上工作进行了拓展研究,主要贡献如下:构建了 Zigbee 无线通信拓扑网络,利用该通信网络实现了基于一致性算法的分布式控制策略;通过仿真分析了 Zigbee 无线通信网络延时和网络拓扑结构变化对分布式控制系统性能的影响。

## 1 传统下垂控制功率分配的限制性

图 1 是微电网中多个并联 DG 的功率传输简化图。其中  $E_i \angle \delta_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) 是  $DG_i$  (表示第  $i$  个 DG) 的逆变器经过滤波后得到的线路始端电压,  $E_i$  为电压有效值,  $\delta_i$  为电压相位,  $n$  代表微电网中的 DG 个数(下文中的  $i$  和  $n$  与此处指代相同);  $U_0 \angle 0$  为母线电压,  $U_0$  为母线电压有效值,电压相位为  $0$ ;  $Z_i \angle \theta_i = R_i + jX_i$  为  $DG_i$  与母线间的线路阻抗;  $S_i = P_i + jQ_i$  为线路传输的末端单相复功率,  $P_i$  和  $Q_i$  分别表示有功功率和无功功率。

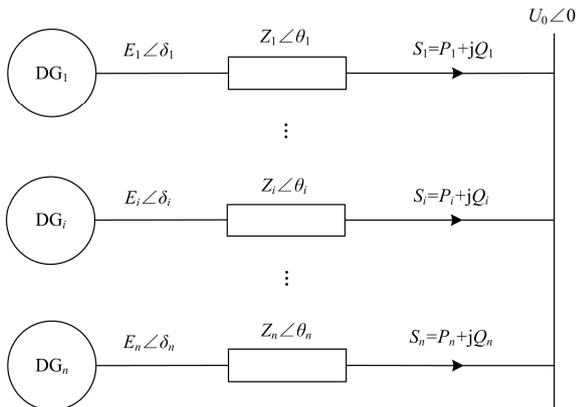


图 1 多并联 DG 功率传输简化图

Fig. 1 Simplified power transmission diagram for multiple parallel DGs

在低压微电网中线路阻抗主要呈现阻性<sup>[3]</sup>,即  $Z_i \approx R_i$ ,  $\theta_i \approx 0^\circ$ , 通常情况下功角差  $\delta_i$  很小,可认为

$\sin \delta_i \approx \delta_i$ ,  $\cos \delta_i \approx 1$ ,  $DG_i$  注入母线的有功功率和无功功率表示为

$$P_i = \frac{E_i}{Z_i} [(E_i - U_0 \cos \delta_i) \cos \theta_i + U_0 \sin \delta_i \sin \theta_i] \approx \frac{E_i (E_i - U_0)}{R_i} \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{E_i}{Z_i} [(E_i - U_0 \cos \delta_i) \sin \theta_i - U_0 \sin \delta_i \cos \theta_i] \approx -\frac{E_i U_0}{R_i} \delta_i \quad (2)$$

所以  $DG_i$  采用 P-V 和 Q-f 下垂<sup>[3,15]</sup>控制。

$$E_{\text{ref}i} = E_{Ni} + m_{pi} (P_{Ni} - P_{Ri}) \quad (3)$$

$$f_{\text{ref}i} = f_{Ni} + m_{qi} Q_{Ri} \quad (4)$$

式中:  $E_{\text{ref}i}$  和  $f_{\text{ref}i}$  分别为  $DG_i$  下垂控制得到的电压参考值和频率参考值;  $m_{pi}$  和  $m_{qi}$  分别为  $DG_i$  的 P-V 和 Q-f 下垂系数;  $E_{Ni}$ 、 $f_{Ni}$  分别为  $DG_i$  的额定电压值和额定频率值;  $P_{Ni}$  为  $DG_i$  的额定有功功率值;  $P_{Ri}$  和  $Q_{Ri}$  分别为  $DG_i$  输出实际有功功率和无功功率。

微电网系统稳定运行时频率全网一致,即各逆变器输出的频率  $f_{\text{ref}1} = f_{\text{ref}2} = \dots = f_{\text{ref}n}$ , 设置 DG 额定频率值都相同,根据式(4)可知无功功率能够按照下垂系数反比例分配,即满足式(5),下垂控制能够对无功功率分配进行有效控制。

$$m_{q1} Q_{R1} = m_{q2} Q_{R2} = \dots = m_{qn} Q_{Rn} \quad (5)$$

然而由于实际 DG 地理位置分散,每个 DG 与母线相连的线路阻抗都不相同,当微电网达到稳定状态时,各线路始端电压不相等,即  $E_{\text{ref}1} \neq E_{\text{ref}2} \neq \dots \neq E_{\text{ref}n}$ 。另外由式(3)可得

$$m_{pi} P_{Ri} = E_{Ni} + m_{pi} P_{Ni} - E_{\text{ref}i} \quad (6)$$

从式(6)中可知,有功功率难以通过传统下垂控制进行有效分配,即难以满足

$$m_{p1} P_{R1} = m_{p2} P_{R2} = \dots = m_{pn} P_{Rn} \quad (7)$$

因此,需要改进传统下垂控制才能实现 DG 输出有功功率按额定比分配。本文提出一种基于 Zigbee 通信网络的分布式控制方式,其只需邻近 DG 交互信息,通过一致性算法得到全网平均电压和平均频率信息用于二级控制,从而改进一级控制中的传统下垂控制,使得 DG 能够按照额定比分配有功功率输出。

## 2 微电网分布式功率控制

### 2.1 基于 Zigbee 通信网络的分布式控制架构

本文提出基于 Zigbee 通信网络的分布式控制架构,如图 2 所示。微电网由四个 DG 组成,每个

DG 都有一个本地控制器(Local Controller, LC), LC 中包含一级控制、二级控制和一致性算法三个功能, 其中一级控制由功率计算、下垂控制、电压电流双闭环控制和 PWM 四部分组成。同时每个 LC 都配备一个 Zigbee 全功能设备通信装置(Full Function Device, FFD)<sup>[16]</sup>用于组成 Zigbee 通信网络。

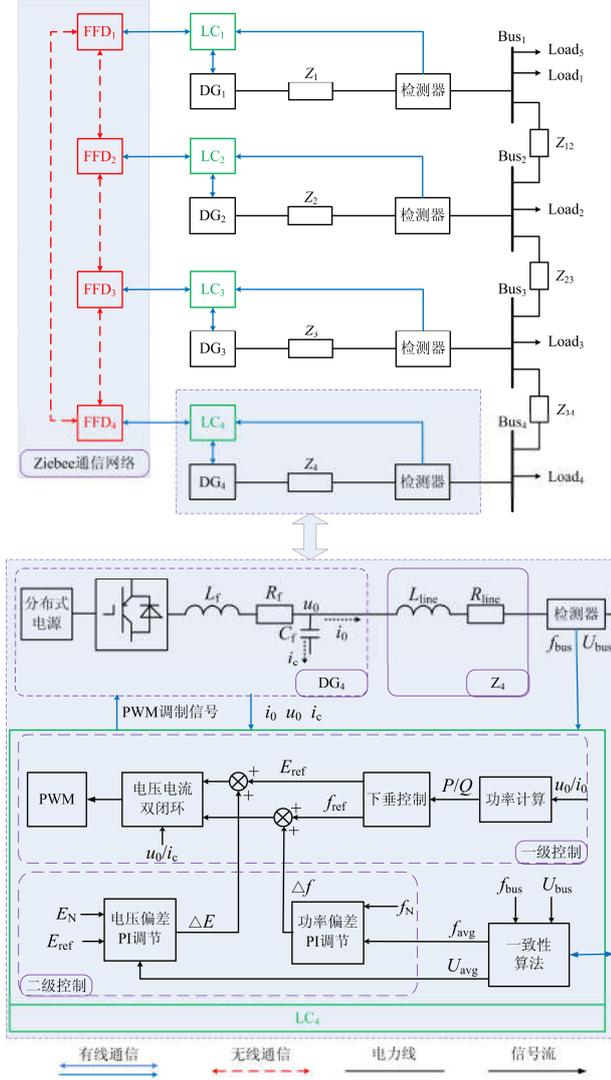


图 2 基于 Zigbee 通信网络的分布式控制架构

Fig. 2 Distributed control architecture based on Zigbee communication network

## 2.2 基于一致性算法的二级功率优化控制

一致性算法通过获取本地母线电压和频率信息, 以及通过 Zigbee 通信网络获取邻近 LC 的电压和频率状态量进行一致性迭代, 得到全网平均电压  $U_{avg}$  和平均频率  $f_{avg}$  用于二级控制。采用文献[15]中的一阶离散一致性算法计算得到全网平均电压  $U_{avg}$  和平均频率  $f_{avg}$  如下。

$$\begin{cases} U_{avg} = U_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} U_j[k] \\ f_{avg} = f_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} f_j[k] \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} U^{k+1} = \mathbf{D}U^k \\ f^{k+1} = \mathbf{D}f^k \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $n$  为总的 LC 数(与 DG 数相同);  $U_i[k+1], f_i[k+1]$  分别为  $LC_i$  中一致性算法在第  $k+1$  次迭代的电压和频率状态值,  $U_i[0]=U_{busi}, f_i[0]=f_{busi}$  为本地母线电压和频率初始状态值;  $\mathbf{D}$  为状态转移矩阵, 采用 Metropolis 方法<sup>[15]</sup>构造为双随机矩阵(其特征值小于或等于 1), 具有良好的收敛性, 可将电压和频率状态值收敛于初始状态的平均值。另外矩阵  $\mathbf{D}$  中元素  $d_{ij}$  为

$$d_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\lceil \max(l_i, l_j) + 1 \rceil}, & j \in L_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} \frac{1}{\lceil \max(l_i, l_j) + 1 \rceil}, & i = j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\max(l_i, l_j)$  为  $LC_i$  及其通过 Zigbee 通信网络邻接的  $LC_j$  所拥有邻接 LC 数目中的最大值;  $L_i$  为与  $LC_i$  相连的邻接 LC 集合。同时矩阵  $\mathbf{D}$  达到收敛需要的迭代次数  $K$  的计算表达式<sup>[15]</sup>如式(11)。

$$K = \frac{-1}{\log_{\epsilon} \left( \frac{1}{|\lambda_2|} \right)} \quad (11)$$

式中:  $\epsilon$  为精度;  $\lambda_2$  为矩阵  $\mathbf{D}$  的第二大特征值, 决定一致性的收敛速度。

通过一致性算法得到的全网平均电压  $U_{avg}$  用于对 DG 有功功率输出进行改进, 根据式(6)可得

$$m_{pi} P_{Ri} = E_{Ni} + m_{pi} P_{Ni} - U_{avg} \quad (12)$$

当微电网稳态运行时, 若每个 DG 的  $E_N + m_{pi} P_N$  值都设置相同, 则  $E_{Ni} + m_{pi} P_{Ni} - U_{avg}$  对于任意并联运行的  $DG_i$  都相等, 即  $m_{p1} P_{R1} = m_{p2} P_{R2} = \dots = m_{pn} P_{Rn}$ , 输出有功功率分配能够有效控制, 且不受线路阻抗影响, 并按照额定容量精确分配。利用式(12)进行 PI 调节得

$$\Delta E_{pi} = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) \left[ (E_{Ni} + m_{pi} P_{Ni} - U_{avg}) - m_{pi} P_{Ri} \right] \quad (13)$$

将式(6)代入式(13)得到

$$\Delta E_{pi} = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) (E_{refi} - U_{avg}) \quad (14)$$

式中:  $\Delta E_{pi}$  为  $DG_i$  二级控制功率偏差调节量;  $k_p$  和

$k_i$  为有功功率控制器的 PI 调节参数。

同时为保证母线电压和频率质量, 需要对偏差进行 PI 调节。

$$\Delta E_{vi} = \left( k_{vp} + \frac{k_{vi}}{s} \right) (E_{Ni} - U_{avg}) \quad (15)$$

$$\Delta f_i = \left( k_{fp} + \frac{k_{fi}}{s} \right) (f_{Ni} - f_{avg}) \quad (16)$$

式中:  $\Delta E_{vi}$  和  $\Delta f_i$  分别为 DG<sub>i</sub> 二级控制电压偏差调节量和频率偏差调节量;  $k_{vp}$  和  $k_{vi}$  为电压控制器的 PI 调节参数;  $k_{fp}$  和  $k_{fi}$  为频率控制器的 PI 调节参数;  $f_{avg}$  为全网平均频率。DG<sub>i</sub> 二级控制输出的两个调节量为  $\Delta E_i = \Delta E_{pi} + \Delta E_{vi}$  和  $\Delta f_i$ 。

### 2.3 Zigbee 通信网络构建

Zigbee 是无线通信技术的一种, 具有低成本低功耗的特性<sup>[16]</sup>, 故本文将采用它来构建 DG 间的通信网络。Zigbee 无线通信网络如图 2 中所示, 每个 LC 都配有一个 FFD, FFD 间通过无线拓扑网络连接(红色虚线双箭头)。每个 FFD 视为一个通信节点, 可得到  $n$  个通信节点, 通信节点与 LC 相对应(即 LC<sub>i</sub> 对应 FFD<sub>i</sub>)。这样 LCs 之间将通过 FFD 传递电压和频率等变量信号。

定义 1: 通信节点总数为  $n$  时, 限定每个节点的度为  $d \in [1, d_{max}]$ (某一节点的度等于与该节点直接相连的节点数目,  $d_{max}$  为度的最大取值), 限定无线通信线路数目为  $n^*$  且该无线通信线路为双向通信线路。通过对通信网络搜索, 可以得不同网络拓扑结构。

本文选取通信节点数为  $n=4$ , 结合图 2 构建四种类型的 Zigbee 通信网络拓扑结构, 分别如图 3(a)~图 3(d)所示。同时在选取迭代精度为  $\varepsilon=0.01$  时, 给出状态转移矩阵  $D$  第二大特征值  $\lambda_2$  和所需迭代次数如表 1 所示。

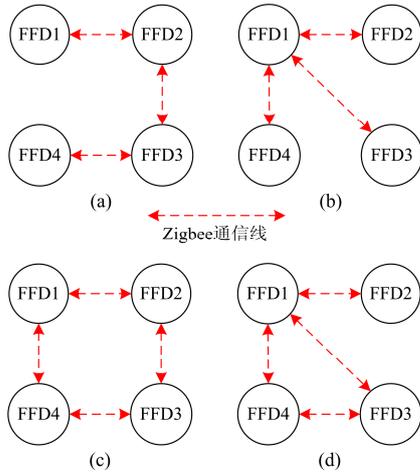


图 3 Zigbee 通信网络拓扑结构

Fig. 3 Topology construction of Zigbee communication network

表 1 不同通信网络拓扑 K 值

Table 1 K of different network topologies

网络拓扑类型	参数			
	$n^*$	$d_{max}$	$\lambda_2$	$K$
图 3(a)	3	2	0.804 7	22
图 3(b)	3	3	0.75	17
图 3(c)	4	2	0.333 3	5
图 3(d)	4	3	0.75	17

然而由于实际数据传输过程中需要考虑 Zigbee 通信特性<sup>[16]</sup>, 即 FFD 间进行通信时存在网络延时。FFD<sub>i</sub> 与 FFD<sub>j</sub> 之间的通信机制如图 4 所示: 数据帧用于数据传输, 确认帧是为保证通信的可靠性向发送者返回的一个确认信息。FFD<sub>i</sub> 发送一个数据帧给 FFD<sub>j</sub>, 经过一个响应过程后 FFD<sub>j</sub> 开始接收数据帧, 当 FFD<sub>j</sub> 接收完数据帧后经过一个等待过程发出确认帧, 同样经过一个响应过程后 FFD<sub>i</sub> 开始接收确认帧。响应过程和等待过程用时分别表示为  $T_r$  和  $T_w$ , 数据帧和确认帧用时分别表示为  $T_d$  和  $T_s$ , 所以完成一次数据传输的进程时间为  $T_a=2T_r+T_w+T_d+T_s$ 。本文采用文献[16]中载波频率为 2.45 GHz 的 Zigbee 通信技术和二进制的编码形式, 表 2 列出三种不同载波频率所对应上述进程时间(暂不考虑响应过程时间)。在构建 Zigbee 通信网络中, 所有 FFD 能够同时接收来自邻接 FFD 的电压和频率状态量并反馈给邻接 FFD 自生的电压和频率状态量, 所以进行一次迭代所需时间为  $2T_a$ , 本文将这段时间定义为网络延时。

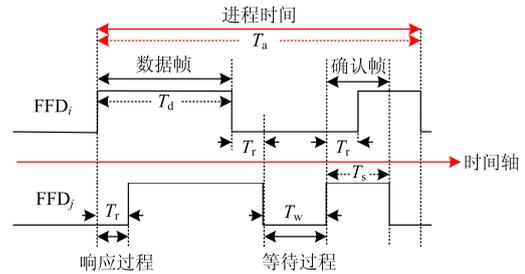


图 4 通信机制

Fig. 4 Communication mechanism

表 2 进程时间

Table 2 Process time

进程	载波频率		
	868 MHz	915 MHz	2.45 GHz
确认帧 $T_s/\mu s$	4 400	2 200	352
数据帧 $T_d/\mu s$	7 300	3 650	592
等待时间 $T_w/\mu s$	600	300	192
进程时间 $T_a(T_r=0)/ms$	12.3	6.15	1.136

### 3 仿真分析

本文用 Matlab/Simulink 搭建基于 Zigbee 通信网络的低压微电网分布式功率控制模型, 其中无线通信网络结合 Matlab 编程实现: Zigbee 通信网络拓扑结构采用图 3(c)并通过在编程中设置  $K$  进行模拟, 其中  $K$  是由状态转移矩阵  $D$  诱导生成, 即不同的拓扑结构生成的  $D$  不同, 从而一致性迭代次数  $K$  也不同; 另外本文主要考虑 Zigbee 通信网络的网络延时特性对微电网分布式功率控制带来的影响, 故在仿真中只刻画了网络延时这一特性, 并且 Zigbee 通信网络延时是通过在 Matlab Function 文件中编程设定每次迭代用时进行模拟的。

基于图 2, 具体仿真参数设置如下: 微电网系统含四个 DG, 四个母线 Bus 和五个负荷, 系统参数列于表 3—表 5。其中  $Z_i$  为  $DG_i$  与相应母线  $Bus_i$  之间的线路阻抗;  $Z_{ij}$  为母线  $Bus_i$  和母线  $Bus_j$  间的连接阻抗;  $Load_1$  和  $Load_5$  为母线  $Bus_1$  上的连接负荷,  $Load_2—Load_4$  分别为母线  $Bus_2—Bus_4$  上的连接负荷; DG 额定有功功率比设置为  $P_{N1}:P_{N2}:P_{N3}:P_{N4}=1:2:3:3$ , DG 最大允许输出无功功率比为  $Q_{max1}:Q_{max2}:Q_{max3}:Q_{max4}=1:1:1:1$ 。额定电压设置为  $E_N=311$  V(相电压峰值), 额定频率设置为  $f_N=50$  Hz。

表 3 DG 模型参数

Table 3 Parameters of DG model

DG	参数			
	$m_p/(V/kW)$	$m_q/(Hz/kvar)$	$P_N/kW$	$Q_{max}/kvar$
1	1.5	$1.25 \times 10^{-2}$	10	40
2	0.75	$1.25 \times 10^{-2}$	20	40
3	0.5	$1.25 \times 10^{-2}$	30	40
4	0.5	$1.25 \times 10^{-2}$	30	40

表 4 负荷参数

Table 4 Parameters of load

负荷	参数值/kVA	负荷	参数值/kVA
Load <sub>1</sub>	15+j10	Load <sub>3</sub>	15+j5
Load <sub>2</sub>	10+j15	Load <sub>4</sub>	10+j10
Load <sub>5</sub>	8+j8		

表 5 线路阻抗参数

Table 5 Parameters of line impedance

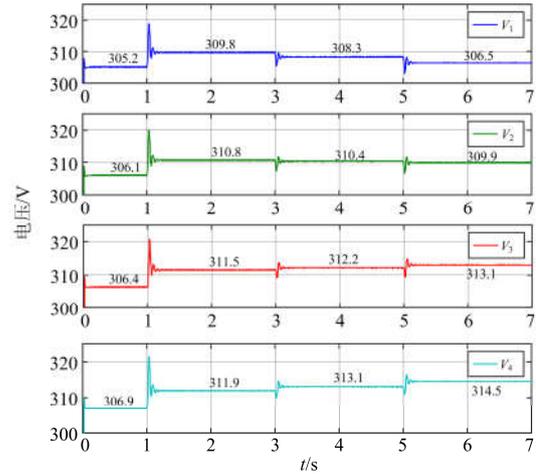
阻抗	参数值/ $\Omega$	阻抗	参数值/ $\Omega$
$Z_1$	0.3+j0.063	$Z_3$	0.3+0.061
$Z_2$	0.2+j0.031	$Z_4$	0.2+0.034
$Z_{12}$	0.04+j0.006 3	$Z_{23}$	0.05+j0.009 4
$Z_{34}$	0.05+j0.008 3		

#### 3.1 无网络延时的分布式控制策略仿真分析

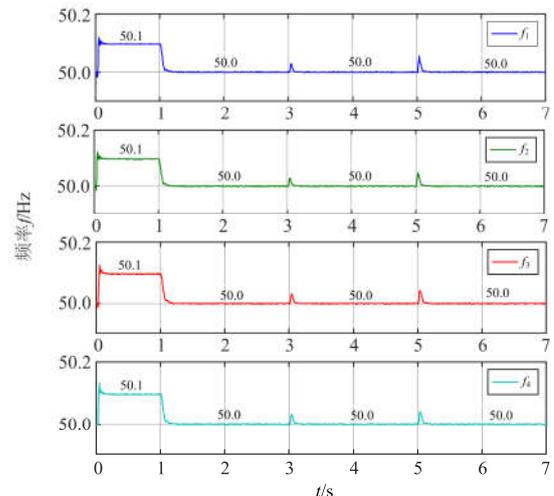
设置仿真时间为 7 s, 通信网络拓扑构建为图 3(c), 迭代精度为  $\varepsilon=0.01$ , 无网络延时的影响(即  $T_a=0$ )。在  $t=1$  s 前 DG 采用传统下垂控制, 当  $t=1$  s 时启动分布式控制策略, 当  $t=3$  s 时, 系统突增负荷  $Load_5$ , 当  $t=5$  s 时,  $DG_1$  因故障退出运行。仿真结果如图 5(a)—图 5(d)所示。

图 5(a)为微电网母线  $Bus_1—Bus_4$  电压  $V_1—V_4$ 。在未启动控制策略之前, 各母线电压低于额定电压  $E_N(311$  V)。启动分布式控制策略后, 各母线电压达到额定电压  $E_N$  值附近。在系统突增负荷后, 各母线电压略有变动依然维持在额定电压  $E_N$  值附近。 $DG_1$  因故障退出运行, 各母线电压相对于额定电压的偏差将有所扩大。

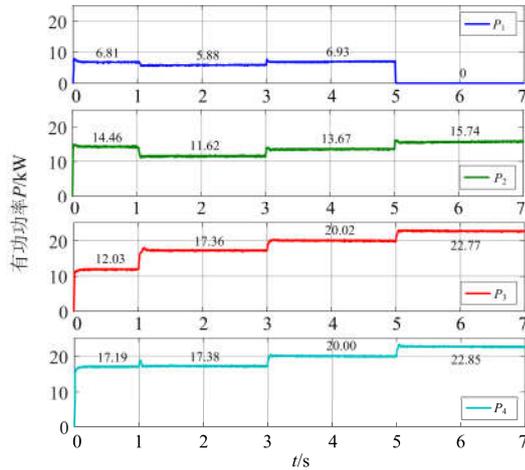
图 5(b)为微电网母线  $Bus_1—Bus_4$  频率  $f_1—f_4$ 。在未启动控制策略之前, 各母线频率都为 50.1 Hz, 高于频率  $f_N(50$  Hz)。启动分布式控制策略后, 各母



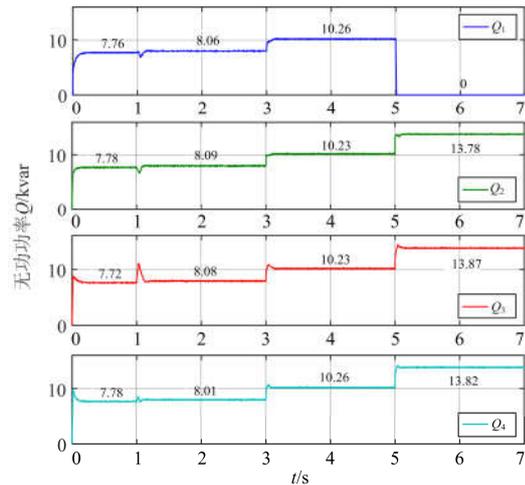
(a) 母线电压



(b) 母线频率



(c) 有功功率



(d) 无功功率

图 5 无网络延时的分布式控制

Fig. 5 Distributed control without network-induced delays

线频率稳定于额定频率  $f_N$ 。在系统突增负荷后,各母线频率经过较小波动后稳定到额定频率  $f_N$ 。DG<sub>1</sub> 因故障退出运行,各母线频率经过较小波动后稳定到额定频率  $f_N$ 。

图 5(c)为 DG<sub>1</sub>—DG<sub>4</sub> 输出有功功率  $P_1$ — $P_4$ 。在未启动控制策略之前, DG 输出有功功率比不满足额定比  $P_{N1}:P_{N2}:P_{N3}:P_{N4}=1:2:3:3$ 。启动分布式控制策略后, DG 输出有功功率达到额定有功功率比。在系统突增负荷后, DG 输出有功功率增加, 依旧保持额定比不变。DG<sub>1</sub> 因故障退出运行, DG<sub>2</sub>—DG<sub>4</sub> 输出有功功率比为额定比  $P_{N2}:P_{N3}:P_{N4}=2:3:3$ 。

图 5(d)为 DG<sub>1</sub>—DG<sub>4</sub> 输出无功功率  $Q_1$ — $Q_4$ 。在未启动控制策略之前, DG 输出无功功率比为  $Q_1:Q_2:Q_3:Q_4=1:1:1:1$ 。启动分布式控制策略后, 无功功率比保持不变。在系统突增负荷后, 输出无功功率增加, 无功功率比依旧保持不变。DG<sub>1</sub> 因故障退出运

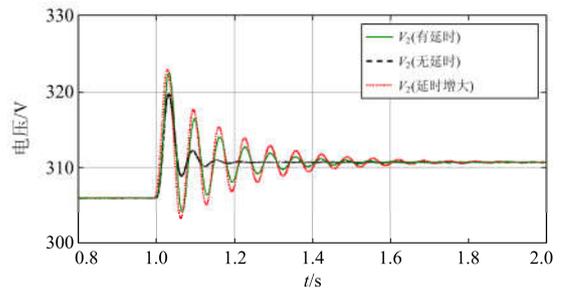
行, DG<sub>2</sub>—DG<sub>4</sub> 输出无功功率比  $Q_2:Q_3:Q_4=1:1:1$ 。

以上仿真验证了在无网络延时条件下, 所提分布式控制策略能够使微电网中各个 DG 按照额定比例输出有功功率, 同时保证母线电压和频率的质量, 并适应负荷变化和 DG 切出的情况。

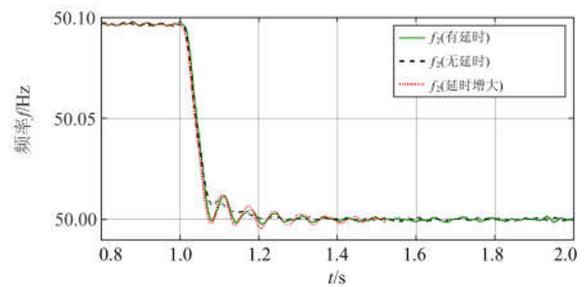
### 3.2 考虑网络延时的分布式控制策略仿真分析

本节考虑网络延时对分布式功率控制策略带来的影响。以 3.1 节仿真条件为基础, 在仿真中加入网络延时 ( $T_a=1.136$  ms) 以及适当增大网络延时 (即加入较小响应过程  $T_r=100$   $\mu$ s, 增大  $T_a=1.336$  ms), 为便于跟无网络延时情况进行比较 (其他母线和 DG 情况类似), 只观察母线 Bus<sub>2</sub> 电压  $V_2$ 、频率  $f_2$  和 DG<sub>2</sub> 输出有功功率  $P_2$ 、输出无功功率  $Q_2$  在分布式控制策略启动后的情况 (仿真  $t=0.8\sim 2$  s 段的结果), 如图 6(a)—图 6(d) 所示。

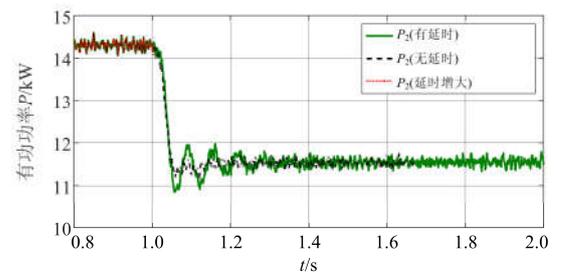
图 6(a)为母线 Bus<sub>2</sub> 的电压  $V_2$  情况。从图中可以看出无网络延时, 分布式控制策略启动后母线电压经过较小波动趋于稳定。当存在网络延时或者适当增大网络延时, 其波动变大且需要经过较长时间才



(a) 母线电压



(b) 母线频率



(c) 有功功率

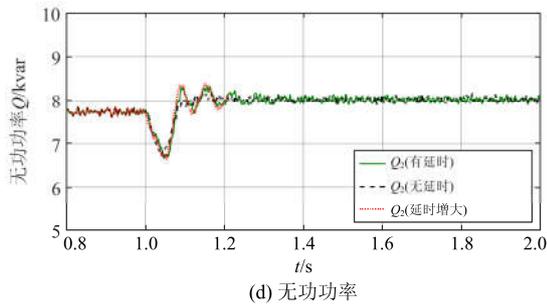


图 6 考虑较小网络延时的分布式控制

Fig. 6 Distributed control with less network-induced delays

能趋于稳定。当通信延时增大, 其波动越大, 趋于稳定需要更长时间。同样对于母线 Bus<sub>2</sub> 频率  $f_2$ , DG<sub>2</sub> 输出有功功率  $P_2$  和无功功率  $Q_2$  得到类似情形, 分别如图 6(b)、图 6(c)和图 6(d)所示。

如果再将网络延时增大(即加入较大响应过程增大为  $T_r=500 \mu s$ , 增大  $T_a=2.336 ms$ ), 如图 7(a)—图 7(d)中母线 Bus<sub>2</sub> 电压  $V_2$ 、频率  $f_2$  和 DG<sub>2</sub> 输出有功功率  $P_2$  和无功功率  $Q_2$  都不能趋于稳定, 得到过大的网络延时将导致分布式控制策略失效。

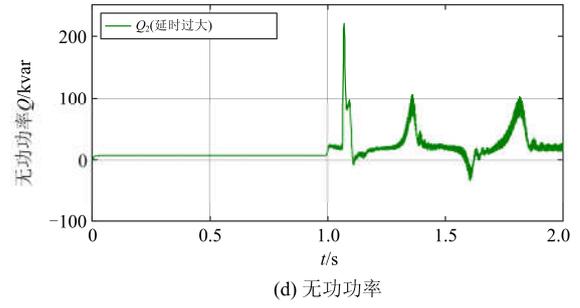
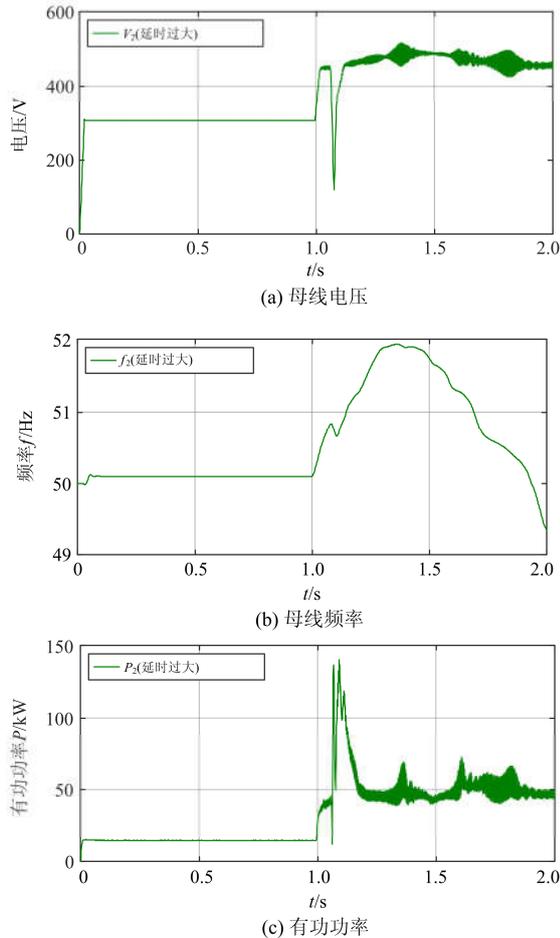
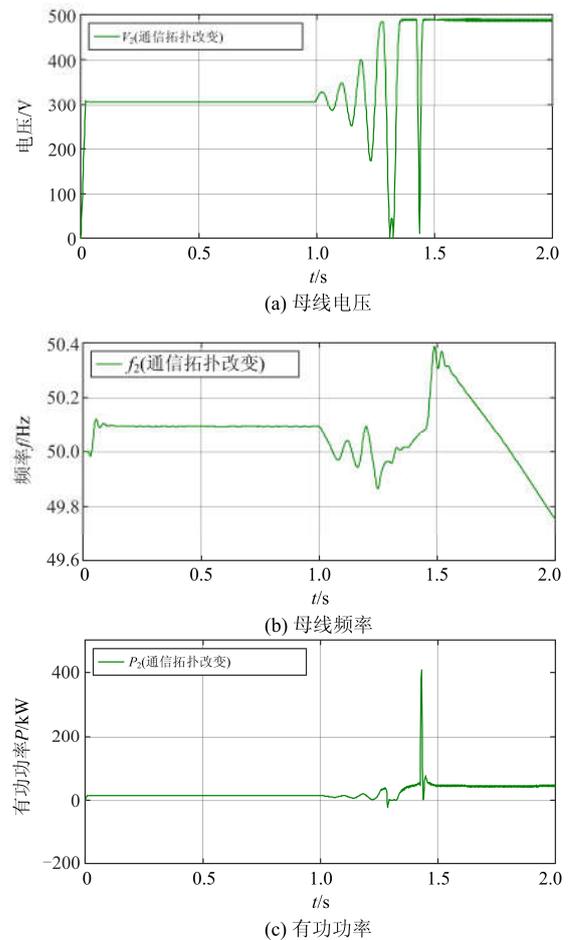


图 7 网络延时过大的分布式控制

Fig. 7 Distributed control with large network-induced delays

### 3.3 考虑网络拓扑结构变化的分布式控制策略仿真分析

当选取通信网络结构为图 3(b)时, 迭代精度  $\varepsilon=0.01$ , 网络延时为  $T_a=1.136 ms(T_r=0)$ 。依旧以母线 Bus<sub>2</sub> 电压  $V_2$ 、频率  $f_2$  和 DG<sub>2</sub> 输出有功功率  $P_2$  和输出无功功率  $Q_2$  为例, 其分别如图 8(a)—图 8(d)所示(取仿真  $t=0\sim 2 s$  段的结果), 可以得到分布式控制策略失效。因为通信拓扑结构图 3(b)完成一次一致性迭代所需次数  $K$  比通信拓扑结构图 3(c)多, 二级控制不能及时进行信息更新, 导致分布式控制策略失效。



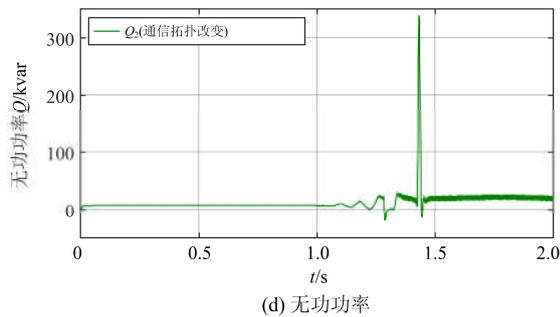


图 8 基于网络拓扑结构图 3(b)的分布式控制

Fig. 8 Distributed control with network topology Fig. 3 (b)

## 4 结论

本文通过分析传统下垂控制功率分配的局限性,提出一种基于 Zigbee 通信网络的分布式控制策略。采用 Zigbee 技术构建无线通信网络,并分析了网络延时对分布式功率控制性能的影响。通过 Matlab/Simulink 仿真分析,表明较大的网络延时和较多的迭代次数会使得分布式控制策略失效。

目前的工作只是从网络延时角度采用 Matlab 编程模拟 Zigbee 通信,下一步将构建实际的 Zigbee 网络并结合 Matlab/Simulink 进行半实物仿真研究。

## 参考文献

- [1] IPAKCHI A, ALBUYEH F. Grid of the future[J]. Power and Energy Magazine, 2009, 7(2): 52-62.
- [2] KUMAR M, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. Control strategies of a DC microgrid for grid connected and islanded operations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1588-1601.
- [3] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低电压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.  
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [4] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.  
CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research of micro-grid based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.
- [5] VASQUEZ J C, MASTROMAURO R A, GUERRERO J M, et al. Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4510-4519.
- [6] CHE L, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Hierarchical coordination of a community microgrid with AC and DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3042-3051.
- [7] 马艺玮, 杨苹, 吴捷. 含多分布式电源独立微电网的混合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 103-109.  
MA Yiwei, YANG Ping, WU Jie. Hybrid control strategy of island microgrid with numerous distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 103-109.
- [8] 欧阳丽, 周丽红, 何海斌. 无需互联通信的直流微电网事实功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3449-3456.  
OUYANG Li, ZHOU Lihong, HE Haibin. Real-time power coordinated control strategy for DC microgrid without communication[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3449-3456.
- [9] 唐昆明, 王俊杰, 张太勤. 基于自适应下垂控制的微电网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 68-74.  
TANG Kunming, WANG Junjie, ZHANG Taiqin. Research on control strategy for microgrid based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 68-74.
- [10] YAZDANIAN M, MEHRIZI-SANI A. Distributed control techniques in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2091-2909.
- [11] BOLOGNANI S, ZAMPIERI S. A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrid[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(11): 2818-2833.
- [12] 李鹏, 王旭斌, 马剑. 基于非线性多智能体系统的微网分布式功率控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4277-4286.  
LI Peng, WANG Xubin, MA Jian. Distributed power control method of microgrid based on nonlinear multi-agent system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4277-4286.
- [13] LI Qiang, CHEN Feixing, CHEN Minyou, et al. Agent-based decentralized control method for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 637-649.
- [14] LAI Jingang, ZHOU Hong, LU Xiaoqing, et al. Droop-based distributed cooperative control for microgrids with time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1775-1789.
- [15] 苏晨, 吴在军, 吕振宇, 等. 孤立微电网分布式二级功率优化控制[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2689-2697.  
SU Chen, WU Zaijun, LÜ Zhenyu, et al. Distributed secondary power optimization control for islanded microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2689-2697.
- [16] SETIAWAN M A, SHAHNIA F, RAJAKARUNA S, et al. Zigbee-based communication system for data transfer within future microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2343-2355.

收稿日期: 2017-03-25; 修回日期: 2017-05-19

作者简介:

陈鹏飞(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网技术; E-mail: 15900427238@163.com

邓玮璋(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能电网、网络控制、鲁棒控制等。E-mail: dwh197859@126.com

(编辑 魏小丽)