

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181161

基于多智能体一致性的微电网无功功率分配方法研究

王岳¹, 杨国华^{1,2}, 董晓宁¹, 邹琦琦¹, 李志明¹

(1. 宁夏大学电气工程与自动化系, 宁夏 银川 750021;
2. 宁夏电力能源安全自治区重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要: 在孤岛运行的微电网中, 由于各分布式电源到公共母线的距离和网络结构差异, 导致采用传统下垂控制的分布式电源难以按其额定容量分担负荷。为此, 提出一种基于多智能体一致性的分布式无功功率控制策略, 各分布式电源通过通信网络, 接收邻近微电源无功功率。应用动态一致性算法对无功功率差值进行迭代求和, 再利用比例-积分器对下垂特性曲线的参考额定电压幅值进行自适应补偿。该策略在实现无功功率合理分配的同时, 降低了系统对通信线路的要求, 提高了系统的可靠性。

关键词: 下垂控制; 一致性算法; 分布式控制; 电压补偿; 无功功率分配

Study on reactive power distribution method of microgrid based on multi-agent consistency

WANG Yue¹, YANG Guohua^{1,2}, DONG Xiaoning¹, ZOU Yuqi¹, LI Zhiming¹

(1. Department of Electrical Engineering and Automation, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2. Ningxia Key Laboratory of Power and Energy Security, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Due to the distance of each DG unit to the public bus and the difference of network structure, it is difficult for the traditional droop control of distributed power supply to share the load according to its rated capacity in a microgrid running on an island. Therefore, a distributed control strategy for microgrid based on the consensus of multi-agent system is proposed, which adopts the one-way communication links to realize the reactive-power exchange between adjacent micro-sources. The dynamic consistency algorithm is used to iteratively sum the reactive power difference, and then the proportional integrator is used to compensate the reference voltage amplitude of the droop characteristic curve. This strategy not only realizes the reasonable distribution of reactive power, but also reduces the requirement of communication line and improves the reliability of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71263043 and No. 61763040), Ningxia Natural Science Foundation (No. NZ17022), and Ningxia Key Research and Development Program (No. 2018BFH03004).

Key words: droop control; consistency algorithm; distributed control; voltage compensation; distribution of reactive power

0 引言

为充分利用可再生能源以及对各种分布式发电(Distributed Generation, DG)单元进行有效管理, 一种具有微型、清洁、稳定、可靠、自治、独立等优点的微电网成为了DG的有效应用方式^[1]。孤岛模

式下微电网中微源通常采用下垂控制策略, 即按照有功功率和无功功率下垂方程控制系统频率和电压^[2]。

下垂控制功率分配的特点决定于两个独立变量: 系统频率和电压幅值^[3]。由于系统频率是全局变量, 因此, 和频率相关联的功率可以实现合理分配, 但由于各DG源到公共母线的距离以及网络结构的差异, 导致各DG源与公共母线连接处的电压不相等, 因此, 和电压相关联的功率无法得到合理分配^[4-5]。

为实现功率均衡分配, 国内外许多学者对其展开了研究。文献[6]采用附加信号注入法, 可以很好

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(71263043, 61763040); 宁夏自治区自然科学基金项目资助(NZ17022); 宁夏自治区重点研发项目资助(2018BFH03004)

地降低微源等效线路阻抗不平衡对功率均衡分配的干扰, 但是会导致输出电压畸变。文献[7-8]采用自适应下垂控制法, 可以改善功率分配情况, 但不能实现功率的精确分配。文献[9-10]采用虚拟阻抗法, 提高了功率均衡分配的精度, 增强了系统的鲁棒性, 但该方法对 DG 的电压输出影响很大。文献[11]利用微电网中央控制器(Micro Grid Central Controller, MGCC)与低带宽通信技术实现了 DG 自适应功率分配。但是此方法对 MGCC 的可靠性要求高, 一旦 MGCC 故障, 微电网将无法实现功率均衡分配。

为解决上述功率分配中存在的问题。本文将多智能体一致性理论应用于微电网无功功率分配中。该方法为分布式控制, 不需要中央控制器, 本地 DG 单元控制器通过低带宽通信技术得到相邻微源信息, 利用动态一致性算法和比例-积分器对下垂控制参考额定电压幅值进行自适应迭代补偿, 实现并联微源无功功率合理分配的同时, 提高了系统的可靠性。

1 下垂控制分析

微电网孤岛运行时, DG 之间需协调运行实现微电网中有功和无功功率的平衡, 维持系统频率和电压的稳定^[12]。当微源等效输出阻抗呈感性时, DG 注入交流母线的有功、无功功率如式(1)所示^[13-14]。

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_i V_{pcc}}{X_i} \delta_i \\ Q_i = \frac{V_{pcc}(U_i - V_{pcc})}{X_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{pcc} 为交流母线电压幅值; δ_i 为 DG_i 输出电压相角和交流母线电压相角差; X_i 为 DG_i 输出端到交流母线的等效阻抗; P_i 和 Q_i 分别为 DG_i 输出的有功功率和无功功率; U_i 为 DG_i 输出电压幅值。

由式(1)所示, 调节电压相角可实现有功的控制, 调节电压差值可实现无功的控制^[15]。由频率和相角的关系, 得到传统下垂控制方程如式(2)。

$$\begin{cases} f_i = f_{ref} - m_i(P_i - P_i^*) \\ U_i = U_{ref} - n_i(Q_i - Q_i^*) \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_i 和 n_i 为下垂控制系数; f_{ref} 为微电网参考额定频率; U_{ref} 为微电源参考额定电压幅值; P_i^* 、 Q_i^* 为微电源额定功率; f_i 和 U_i 分别为系统运行的实际测量频率和对应微源的端电压测量值; P_i 和 Q_i 分别为微电源输出的有功功率和无功功率。

当微电网系统到达稳态时, 频率为全局变量, 因此各微电源的有功功率可以根据下垂增益合理分配。而输出电压为局部变量, 现对无功功率分配情

况进行分析。

以两台相同容量的微电源并联为例, 由式(1)可得无功功率控制线路特性曲线方程如式(3)所示。系统无功功率的分配由无功-电压下垂特性曲线和无功功率控制线路特性曲线共同决定, 如图 1 所示。

$$U_i = V_{pcc} + \frac{X_i}{V_{pcc}} Q_i \quad (3)$$

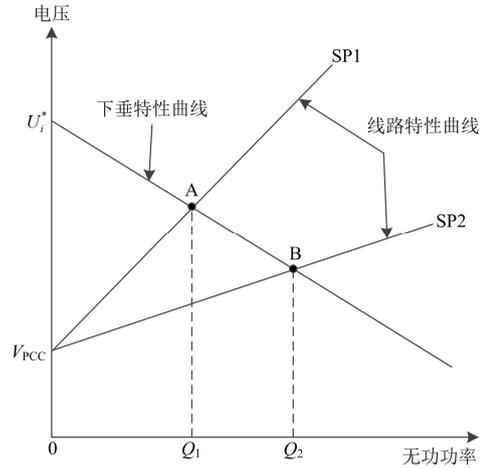


图 1 并联微电源无功功率分配图

Fig. 1 Parallel micro power supply reactive power distribution diagram

图 1 中, SP1 和 SP2 分别为两个线路阻抗不同的微电源线路特性曲线。由于微电源的额定容量相同, 所以设定下垂系数相同^[16]: 即下垂特性曲线斜率相同。下垂曲线和 SP1 相交的点 A 为微电源 1 的稳定运行工作点, 下垂曲线和 SP2 相交的点 B 为微电源 2 的稳定运行工作点。由式(3)可知, 线路阻抗越大, 其线路特性曲线斜率越大, 则图中 SP1 的线路阻抗大于 SP2。线路阻抗越大, 微电源承担的无功负荷越小。

综上所述, 两个额定功率相等、额定电压和下垂系数也都相等的微电源并联运行, 若要实现功率均分, 必须使各微电源等效线路阻抗相等(即 $X_1 = X_2$)。但由于微电源的分散性, 微电网结构复杂多样, DG 单元到公共交流母线的线路阻抗不相同, 甚至有很大差异^[17]。因此, 在应用传统下垂控制策略的微电网中, 各并联微源输出无功功率无法按照额定容量的比值进行精确分配。

2 基于一致性算法的分布式无功功率分配

2.1 分布式控制与图论描述

目前, 微电网有三种控制方式: 无需通信的分散控制、需要通信线路的集中控制与分布式控制。

分散控制中微电源之间的协调性较差；集中控制依赖中央控制器，可靠性较差；而分布式控制不需要中央控制器，各分布式单元只需获得本地信息和相邻微源信息，提高了系统的协调性和可靠性^[18-20]。

分布式控制方法中，相邻微电源之间存在通信连接，每个微电源可以看成是一个节点。这些通信线路在微电网系统内形成通信网络，通信网络可以用图论知识加以描述。

有向图可以用 $G=\{V,E,A\}$ 表示，其中 $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ 表示具有 n 个节点的集合， $E\subseteq V\times V$ 为有向边集， $A=(a_{ij})_{n\times n}$ 为邻接矩阵，当节点 j 可以直接向节点 i 发送信息时，记作 $(j,i)\in V$ 且 $a_{ij}=1$ ，此时就说节点 j 是节点 i 的邻居，否则 $a_{ij}=0$ 。定义节点 i 的邻居集合为 $N_i=\{j:a_{ij}=1\}$ 。如果图 G 中存在一个节点，以该节点为起点，与其他任意节点之间至少存在一条有向路径，此节点称为根节点。包含根节点的有向图称其含有生成树。

2.2 分布式无功功率分配方法

基于多智能体一致性协调控制理论^[21]，设计了可实现并联微电源无功功率合理分配的一致性算法，具体如式(4)所示。

$$\dot{Q}_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \left(Q_i \frac{Q_j^*}{Q_i^*} - Q_j \right) \quad (4)$$

式中： Q_i 为微网系统本地 DG_i 无功功率输出； \dot{Q}_i 为 DG_i 参考额定电压幅值补偿量； Q_i^* 为本地 DG_i 额定无功功率； Q_j 为 DG_j 无功功率测量值， Q_j^* 为 DG_j 额定无功功率； N_i 为第 i 个智能体的邻居集； a_{ij} 为通信网络的邻接矩阵元素。

下垂方程调整为式(5)。

$$\begin{cases} f_i = f_{\text{ref}} - m_i(P_i - P_i^*) \\ U_i = U_{\text{ref}} - n_i(Q_i - Q_i^*) - (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s})\dot{Q}_i \end{cases} \quad (5)$$

基于一致性算法的改进下垂控制策略功率分配原理如图2所示。为便于对改进控制策略原理进行分析，以两台相同容量的微电源并联运行为例，各自互相发送无功功率实时测量值。因为额定容量相同，则式(4)变为式(6)。线路阻抗特性和无功功率分配情况如图1所示， $X_1 > X_2$ ， $Q_1 < Q_2$ 。对于 DG_1 ， Q_1 为本地无功功率， Q_2 为邻居微电源无功功率，则 $\dot{Q}_1 < 0$ ，如式(5)所示，相当于增大了参考额定电压幅值，在比例-积分器的作用下将 DG_1 的下垂曲线向上平移，直至 $\dot{Q}_1=0$ ，即平移到图2中 KP1 位置， DG_1 的稳定运行点由 A 点沿线路特性曲线移动至 A' 点处。同理，对于 DG_2 ， $\dot{Q}_2 > 0$ ，相当于减小参

考额定电压幅值，直至 $\dot{Q}_2=0$ ，即下垂曲线平移到 KP2 的位置， DG_2 的稳定运行点由 B 点移动至 B' 点，此时在线路阻抗不同的情况下，实现了两个相同容量的微源输出无功功率相等。

$$\dot{Q}_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (Q_i - Q_j) \quad (6)$$

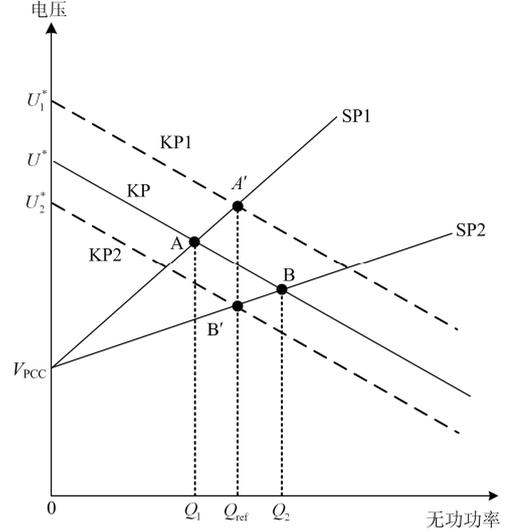


图2 无功功率合理分配原理图

Fig. 2 Schematic diagram of rational distribution of reactive power

利用矩阵论对一致性算法(式(4))进行分析。令 $\dot{\mathbf{Q}}=[\dot{Q}_1,\dot{Q}_2,\dots,\dot{Q}_n]^T$ 表示各微电源参考额定电压幅值补偿量的列向量， $\mathbf{Q}=[Q_1,Q_2,\dots,Q_n]^T$ 表示各微电源输出功率的列向量，则式(4)的向量形式可表示为

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{F}\mathbf{Q} \quad (7)$$

其中矩阵 \mathbf{F} 表示如式(8)： a_{ij} 为微电源组成的有向图的邻接矩阵元素； Q_i^* 为分布式电源额定无功功率。当微电网系统搭建完成后，系统有向图不变，额定无功功率也为定值，即矩阵 \mathbf{F} 固定不变，为实矩阵。

$$F_{ij} = \begin{cases} -a_{ij}, & i \neq j \\ \frac{\sum_{j \in N_i} Q_j^*}{Q_i^*}, & i = j \end{cases} \quad (8)$$

当系统达到稳态后， $\dot{\mathbf{Q}}=0$ ，则有

$$\mathbf{F}\mathbf{Q} = 0 \quad (9)$$

当通信拓扑结构图中包含生成树时，矩阵 \mathbf{F} 的阶梯型如式(10)所示，其中矩阵 \mathbf{A} 为单位矩阵， \mathbf{b} 为列向量 $[-\frac{Q_1^*}{Q_n^*}, -\frac{Q_2^*}{Q_n^*}, \dots, -\frac{Q_{n-1}^*}{Q_n^*}]^T$ ，则矩阵 \mathbf{F} 的秩 $\text{rank}(\mathbf{F})=n-1$ ，0 是 \mathbf{F} 的单重特征根，相应的特征向

量为 $(\mathbf{X})_n = [\frac{Q_1^*}{Q_n^*}, \frac{Q_2^*}{Q_n^*}, \dots, \frac{Q_{n-1}^*}{Q_n^*}, 1]^T \in R^{n \times 1}$, 因此齐次线性方程组(9)只有唯一解向量 $(\mathbf{X})_n$, 即 $\mathbf{Q} = c \cdot (\mathbf{X})_n$, 其中 c 为常数。于是采用所提出的分布式控制策略, 其通信网络拓扑结构必须包含生成树。当系统稳定后, 式(11)成立, 即微电源输出功率的比值等于其额定容量的比值。控制框图如图3所示。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{(n-1) \times (n-1)} & \mathbf{b}_{1 \times (n-1)} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (10)$$

$$Q_i \frac{Q_j^*}{Q_i^*} - Q_j = 0 \Rightarrow \frac{Q_j^*}{Q_i^*} = \frac{Q_j}{Q_i} \quad (11)$$

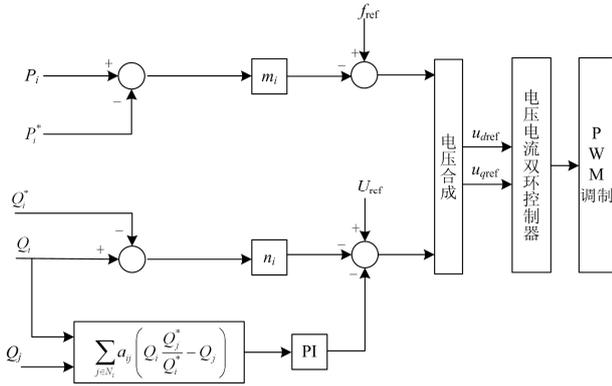


图 3 分布式一致性算法功率分配控制框图

Fig. 3 Distributed consistency algorithm power allocation control block diagram

3 仿真分析

本文以图 4 所示的微电网结构进行仿真模型搭建, 验证控制策略的正确性和有效性。该微电网系统由 4 台分布式电源并联组成, 额定电压及频率为 380 V/50 Hz。额定有功功率相同为 400 kW, 无功功率 $Q_1^* = Q_2^* = 200$ kvar, $Q_3^* = Q_4^* = 100$ kvar。公共负荷 $P_{load1} = 922$ kW, $Q_{load1} = 300$ kvar, $P_{load2} = 400$ kW, $Q_{load2} = 150$ kvar; 线路阻抗参数 $X_1 = 0.002 + j0.0002 \Omega$, $X_2 = 0.004 + j0.0004 \Omega$, $X_3 = 0.006 + j0.0006 \Omega$, $X_4 = 0.008 + j0.0008 \Omega$; 一致性算法无功功率分配比例系数均为 0.3, 积分系数均为 0.2。为使微电源功率按额定容量比输出, 有功-频率下垂系数相等 $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 0.001$ Hz/kW, 无功-电压下垂系数与额定功率成反比, 即 $n_1 = n_2 = 0.05$ V/kvar, $n_3 = n_4 = 0.1$ V/kvar。

本文采用的通信网络如图 5 所示。为了确保单一通信线路故障和单一微电源故障, 一致性算法仍然可以实现状态一致, 通信拓扑图采用环形双向通信网络。图 5 所对应的邻接矩阵如式(12)所示。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

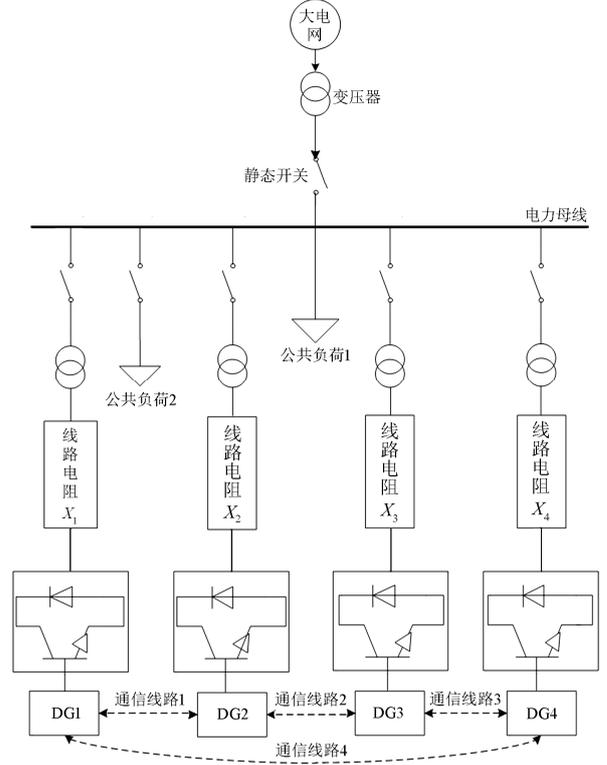


图 4 微电网结构

Fig. 4 Microgrid structure

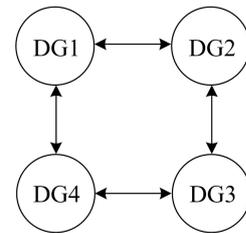


图 5 通信网络拓扑图

Fig. 5 Communication network digraph

为验证控制策略的正确性和有效性, 利用 PSCAD 搭建如图 4 所示的仿真模型。并设计不同的工作状态, 对控制策略的性能进行分析。

工作状态 1: 仿真时长为 4 s; 0~0.5 s 由大电网单独供电, 0.5 s 时大电网故障切除, 由四台采用传统下垂控制的微电源并联供电; 1.5 s 后切换本文控制策略; 为验证控制策略的动态性能, 在 3 s 时并入公共负荷 2, 运行至 4 s 结束。输出无功功率仿真结果如图 6 所示。

工作状态 2: 一致性算法中有通信线路的存在, 因此相邻微电源之间通信延迟是不可避免的(通信延迟指相邻微源信息传递一次的延迟时间), 为分析通信延迟对控制策略的影响, 在工作状况 1 的基础上加入通信延迟, 延迟时间设置为 25 ms、32 ms, 仿真结果如图 7 所示。

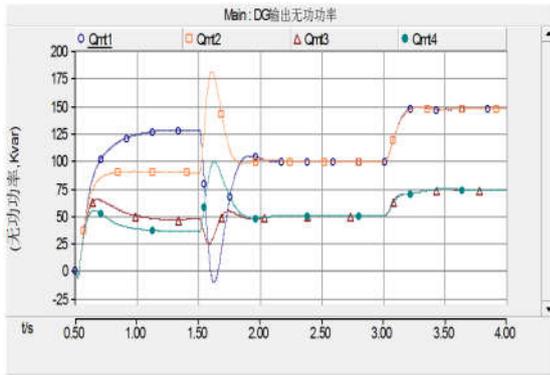
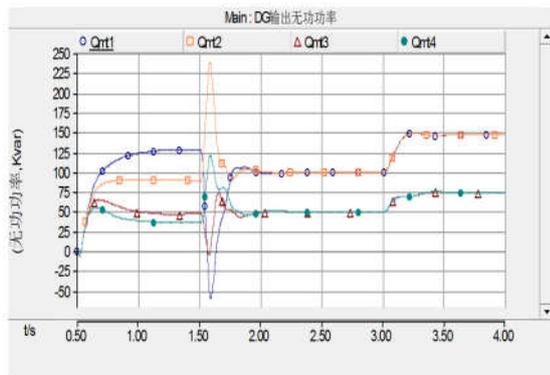
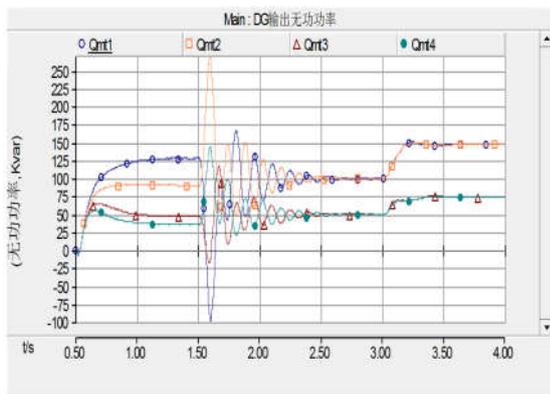


图 6 基于一致性算法的无功功率分配仿真结果
Fig. 6 Simulation results based on the distribution of reactive power consensus algorithm



(a) 通信延迟为 25 ms 的仿真结果



(b) 通信延迟为 32 ms 的仿真结果

图 7 考虑通信延迟的无功功率分配仿真结果
Fig. 7 Simulative results of reactive-power allocation considering communication delay

工作状态 3: 为了验证控制策略的可靠性, 对通信线路故障进行了仿真。在工况 1 仿真条件设置的基础上, 假设 2.5 s 时 DG3 和 DG4 的通信线路故障, 之间无信息交互。仿真结果如图 8 所示。

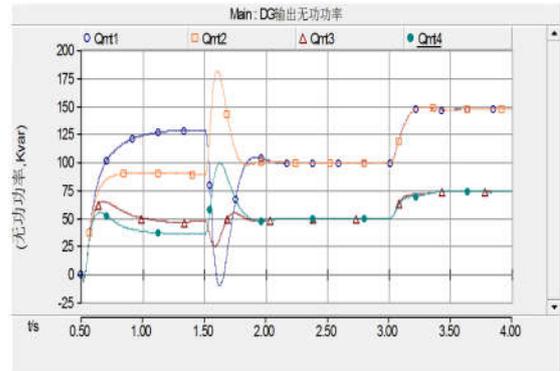


图 8 单一通信线路故障时的无功分配仿真结果
Fig. 8 Simulative results of reactive-power allocation with single communication line failure

工作状态 4: 在微电网运行过程中, 微电源故障也可能出现, 与其相关的通信线路不再起作用。在 2.5 s 时, 模拟 DG4 故障被切离微电网系统, 仿真时长为 5 s, 其余仿真设计与工况 1 相同。仿真结果如图 9 所示。

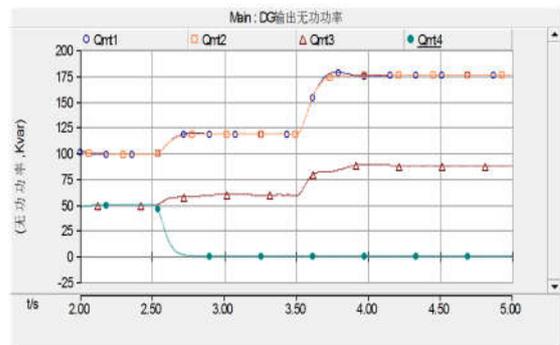


图 9 单一微源故障时的无功功率仿真结果
Fig. 9 Simulative results of reactive-power allocation with single micro-source failure

如图6所示, 0.5~1.5 s采用传统下垂控制策略, 无功功率并未按照额定容量比输出。在1.5 s后采用一致性算法无功功率控制策略, 经过短暂的调节, 使得无功功率均分效果明显提升, 输出无功功率按照额定容量2:2:1:1的比例分配。在3 s时加入公共负荷后, 系统仍然可以很快恢复稳定, 稳定后的功率分配依然合理。

图 7 所示是考虑相邻微源之间通信延迟的仿真结果。在多智能体一致性算法中, 通信延迟不会影响系统的稳定性, 但会影响系统的动态性能。可以

看到在 1.5 s 切换控制策略时,随着系统通信延时的增大,动态过程中无功功率最大幅值也增大。由于对功率进行测量时,采用了低通滤波器对瞬时功率进行滤波,滤波器的截止频率对存在通信延迟的系统有一定影响,如图 7(b)中,当通信延迟为 32 ms 时,系统振荡时间变长。本文低通滤波器的截止频率为 5 Hz,其时间常数近似为 32 ms,而 25 ms 远小于 32 ms,因此对系统稳定性的影响可以忽略。而 32 ms 接近滤波器时间常数,因此,通信延迟的影响不可以忽略。通过以上分析可以看到,当系统通信延迟时间小于 25 ms 时,有很好的稳态性能和动态性能,因此本文控制策略对通信的要求不是很高,具有可实践性。

如图 8 所示,当 DG3 和 DG4 之间的通信线路故障后,通信网络依然包含生成树,因此,系统在一致性算法分布式控制策略下可以保持稳定,并且稳定后微电网内微源的无功功率按照额定容量的比值输出。3 s 时负荷增加,控制策略满足功率分配要求。

如图 9 所示,在 2.5 s 时 DG4 故障被切除微电网,其他微电源按照额定容量的比值分担了 DG4 所承担的负荷。3.5 s 时系统公共负荷增加,系统可以恢复稳定,稳定后,各微电源依然按照额定容量的比值分担负荷。仿真结果表明,系统在单一微源故障时,依然具有良好的动态性能和稳态性能。

4 结论

本文针对孤岛微电网功率分配问题,提出了一种基于一致性算法的无功功率控制策略。该方法利用低带宽通信技术获得相邻微源输出无功功率,通过一致性算法得到下垂控制参考额定电压幅值补偿量,再利用比例-积分器对下垂控制参考额定电压幅值进行自适应迭代补偿,实现无功功率均衡分配的同时,使系统具有很好的稳态和动态性能。所提控制策略为分布式控制方式,使各 DG 单元只需获得部分微电源信息,避免对全局信息的需求,具有较高的可靠性。控制策略对通信延迟的要求较低,通信网络包含生成树的要求也易于满足。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 刘海霞, 李岚, 叶吉亮, 等. 独立微电网中功率精确分

配与频率电压恢复控制[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 54-60.

LIU Haixia, LI Lan, YE Jiliang, et al. Accurate power sharing and restoration of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 54-60.

- [3] 孙孝峰, 郝彦丛, 赵巍, 等. 孤岛微电网无通信功率均分和电压恢复研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 55-61.

SUN Xiaofeng, HE Yancong, ZHAO Wei, et al. Research of power sharing and voltage restoration without communication for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 55-61.

- [4] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.

WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.

- [5] 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 operation control of micro-grid based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.

- [6] HE Jinwei, LI Yunwei. An enhanced microgrid load demand strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.

- [7] 孙孝峰, 王娟, 田艳军, 等. 基于自调节下垂系数的 DG 逆变器控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 71-78.

SUN Xiaofeng, WANG Juan, TIAN Yanjun, et al. Control of DG connected inverters based on self-adaptable adjustment of droop coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 71-78.

- [8] 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.

- [9] 张平, 石健将, 李荣贵, 等. 低压微电网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1844-1852.

- ZHANG Ping, SHI Jianjiang, LI Ronggui, et al. A control strategy of 'virtual negative' impedance for inverters in low-voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [10] 赵巧娥, 张乐乐, 武晓冬, 等. 基于并联虚拟电阻的多逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 30-39.
- ZHAO Qiao'e, ZHANG Lele, WU Xiaodong, et al. Control strategy for multi-inverters based on parallel virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 30-39.
- [11] 郑连清, 庄琛, 马世强, 等. 微电网改进负荷功率分配策略与并网稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 17-23.
- ZHENG Lianqing, ZHUANG Chen, MA Shiqiang, et al. Improved load power allocation strategy for microgrid and grid-connection stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 17-23.
- [12] 余志文, 艾芊. 基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 150-156.
- YU Zhiwen, AI Qian. Adaptive droop control strategy for microgrid based on consensus of multi-agent system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 150-156.
- [13] 颜湘武, 王月茹, 王星海, 等. 基于动态一致性的分布式微源并联控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 17-21.
- YAN Xiangwu, WANG Yueru, WANG Xinghai, et al. Parallel control based on dynamic consistency for distributed micro-sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 17-21.
- [14] SHUAI Zhikang, MO Shanglin, WANG Jun, et al. Droop control method for load share and voltage regulation in high-voltage microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 4(1): 76-86. DOI: 10.1007/s40565-015-0176-1.
- [15] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Distributed secondary control for islanded microgrids—a novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.
- [16] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 5(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [17] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 独立型微电网中基于虚拟阻抗阻抗的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 7-13.
- BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. An improved droop control strategy based on virtual impedance in islanded micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 7-13.
- [18] 颜湘武, 王星海, 王月茹. 微电网的新型无差调频控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 1-6.
- YAN Xiangwu, WANG Xinghai, WANG Yueru. Research on novel zero-error frequency regulation control method for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 1-6.
- [19] SIMPON-PORCO J W, SHAFIEE Q, DÖRFLER F, et al. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7025-7038.
- [20] GUO F H, WEN C Y, MAO J F, et al. Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4355-4364.
- [21] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.

收稿日期: 2018-09-08; 修回日期: 2018-10-24

作者简介:

王岳(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网技术、新能源电网; E-mail: wangyue3546@126.com

杨国华(1972—), 男, 通信作者, 工学硕士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源发电与微网技术、电力系统通信技术等方面的研究; E-mail: ygh@nxu.edu.cn

董晓宁(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电。E-mail: 1007284850@qq.com

(编辑 魏小丽)