第 49 卷 第 1 期：269-278 高电压技术 Vol.49, No.1: 269-278
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211306

基于撑网逆变器的交流微电网分布式协调控制

魏珊珊[1,2]，高　飞[1,2]，廖达威[1,2]，颜长鑫[3]，蔡位焜[4]，刘　东[1,2]
（1. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240；2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院电气工程系，上海 200240；3. 国网江苏省电力有限公司淮安供电分公司，淮安 223001；4. 上海空间电源研究所，上海 200240）

摘　要：为了解决分层控制体系中下垂控制存在电压调节性能和功率分配的固有矛盾，以及功率分配受线路阻抗影响的缺点，针对基于电网支撑型逆变器的交流微电网，采用扩散算法，提出了一种不依赖下垂机制的分布式协调控制策略：首先引入权重系数以协调各分布式电源所承担的负荷比例；其次，电压调节器、无功功率调节器和有功功率调节器中采用分布式控制，并基于扩散算法，控制功率分配和电压/频率精准调节。理论分析了扩散算法和一致性算法的收敛性能，并通过仿真对比基于传统下垂机制的分层控制策略，和基于一致性算法的分布式协调控制，结果表明：所提基于扩散算法的分布式协调控制策略在线路阻抗不匹配、负荷突变、通信故障、通信延时、变流器故障等情况下，能够同时实现电压/频率的精准调节和功率的精确分配，具有较高的稳定性。
关键词：交流微电网；撑网逆变器；分布式协调控制；扩散算法；下垂控制；分层控制

Distributed Coordinated Control of AC Microgrids Based on Grid-supporting Inverters

WEI Shanshan[1,2], GAO Fei[1,2], LIAO Dawei[1,2], YAN Changxin[3], CAI Weikun[4], LIU Dong[1,2]
(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Department of Electrical Engineering, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Huaian Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd , Huaian 223001, China; 4. Shanghai Institute of Space Power-Source, Shanghai 200240, China)

Abstract：In a droop-based hierarchical control, the primary control has the inherent compromise between voltage regulation performance and power distribution, and the secondary control is commonly installed to solve these problems in a long-time scale, which significantly affects the system stability. To solve these problems, this paper proposes a distributed cooperative control strategy for grid supporting inverters-based AC microgrid. This strategy is independent of droop mechanism. Firstly, a weight coefficient is introduced to coordinate the load proportion born by each distributed generation. Secondly, distributed control and diffusion algorithm are adopted in voltage regulator, reactive power regulator, and active power regulator,and the power sharing and voltage/frequency regulation are controlled on the basis of the diffusion algorithm. The convergence performance of diffusion algorithm and consensus algorithm is analyzed theoretically. In addition, by comparison with droop-based hierarchical control, the consensus algorithm-based cooperative control strategy is conducted in simulation. The results show that, the proposed strategy has high stability and can realize high-quality voltage/frequency regulation and accurate power sharing can be realized in the case of line impedance mismatch, load mutation, communication link failure, inverter failure and communication delay.
Key words: AC microgrid; grid-supporting inverter; distributed coordinated control; diffusion algorithm; droop control; hierarchical control

0　引言

随着化石燃料日益枯竭以及其造成环境污染等问题，清洁环保的可再生能源受到越来越多的关注。微电网是一种能有效整合和高效利用分布式可再生能源、储能、负荷的重要形式[1]。由于分布式电源 (distributed generator, DG)输出特性各异，多以电力电子逆变器为接口并入微电网，从而构成了微电网多逆变器环境[2]。根据逆变器的运行模式，将

基金资助项目：国网公司科技项目：含新能源、储能及柔性负荷的无功电压协调控制关键技术 (5108-202018028A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC: Key Technologies of Reactive Power and Voltage Coordinated Control Including New Energy, Storage and Flexible Load (5108-202018028A-0-0-00).

其划分为组网逆变器(grid-forming inverter)，馈网逆变器(grid-feeding inverter)，和撑网逆变器(grid-supporting inverter, GSI)[3-4]。组网逆变器为微电网提供电压和频率的支撑，既可运行在孤岛模式也可运行在并网模式。馈网逆变器可看成理想的电流源，为微电网提供功率。GSI 应用了下垂机制，是组网逆变器和馈网逆变器的一般形式。根据其控制方式和外特性的不同，可分为输出电压型支撑逆变器(voltage-source-based GSI, VS-GSI)和输出电流型支撑逆变器(current-source-based GSI, CS-GSI)。然而，下垂控制存在很多弊端，易受线路阻抗特性和网络拓扑的影响，存在功率分配和电压/频率偏移的固有矛盾[5-7]。改进的下垂控制，如自适应下垂控制[8]和虚拟阻抗法[9-10]依然受线路阻抗的影响，难以消除电压和频率的偏移。目前，针对下垂机制中存在的电压/频率偏差和功率分配问题，通常由二次控制在相对较长的时间尺度内消除[11]。

集中式的二次控制依赖于集中控制器收集微电网运行的信息，利用通信线和各 DG 的本地控制单元进行高带宽的点对点通信，调节准确度高，但增加了通信和计算成本[12]。此外，集中控制器本身容易导致单点故障，不利于微电网的拓展和 DG、负荷的“即插即用”[13]。分布式二次控制利用稀疏通信网络，与相邻网络交换信息，在某些通信链路故障时也能保障系统正常运行，克服了集中式控制的缺点[14-16]。文献[14]在二次控制中采用一致性算法估算全网电压和频率的平均值，对本地下垂控制器的电压和频率进行修正，实现电压/频率的二次调节。文献[15]在二次控制中采用模型预测控制优化下垂控制的电压和频率参考值。文献[16]提出了基于分布式多代理的孤岛微电网二次电压控制策略，利用事件触发控制器更新系统状态。然而，这些方法仍是基于下垂机制，二次控制无法从根本上解决下垂控制的缺点。

目前的研究中，文献[17-19]提出了不依赖下垂机制的分布式控制方法。文献[17]利用分布式拟牛顿法优化各 DG 的有功功率，在实现一次调频的同时使得发电成本最低。文献[18]综合一次和二次控制，提出了一种基于一致性算法且满足电压/频率调节和功率分配的无下垂控制方法。该方法由电压调节器，有功功率调节器和无功功率调节器组成。为保证各 DG 的输出电压一直能满足要求，文献[19]在文献[18]的基础上，提出了一种基于电压方差控制器和松弛无功功率控制器的控制策略，进一步减小输出电压的稳态偏差。相比一致性算法，扩散算法具有更快的收敛速度和较小的均方差，能更好地解决分布式估计和自适应问题[20]。然而，VS-GSI 和 CS-GSI 的控制结构不同，故上述方法只适用于多个 VS-GSI 并联的微电网系统，并不适用于多个 VS-GSI 和 CS-GSI 并联的微电网系统。

目前的研究中，学者大多研究 VS-GSI 系统，而很少关注混合 VS-GS 和 CS-GSI 系统。多 VS-GSI 系统中包含多个并联 VS-GSI，能够为微电网提供电压和频率支撑，实现功率按比例分配。混合 VS-GS 和 CS-GSI 系统中包含多个并联的 VS-GSI 和 CS-GSI，本文作者在文献[21]中发现混合 VS-GSI 和 CS-GSI 系统同样能够为微电网提供电压和频率支撑，实现功率按比例分配。此外，混合 VS-GSI 和 CS-GSI 系统的控制结构比多 VS-GSI 系统简单。在实际应用中，风机和光伏等分布式电源的输出功率受天气影响大，具有明显的间歇性和波动性，无法为系统提供稳定的电压和频率支撑，多作为电流源并入电网。因此，本文针对混合 VS-GSI 和 CS-GSI 交流微电网并基于扩散算法，提出一种分布式协调控制策略，能够同时实现电压/频率的高质量调节和功率的精确分配。且不失一般性，该方法同样可应用在多 VS-GSI 或多 CS-GSI 并联的交流微电网。

本文首先介绍混合 VS-GSI 和 CS-GSI 微电网的基本原理。其次，在此基础上提出基于扩散算法的分布式协调控制策略，包括电压调节器，有功功率调节器和无功功率调节器。通过理论证明，扩散算法的收敛性优于一致性算法。最后通过仿真，验证本文提出的控制策略在不依赖下垂机制的条件下，能够同时实现电压/频率的高质量调节和功率的精确分配，且在通信网络故障、逆变器故障和通信延时等多种情况下保障系统稳定运行。

1 混合 VS-GSI 和 CS-GSI 的交流微电网

VS-GSI 的控制原理如图 1 所示。图中：L_f 为滤波电感；C_f 为滤波电容；r_c 和 L_c 为线路阻抗；$i_{g,abc}$、$i_{o,abc}$ 分别表示逆变器侧三相电流和网侧三相电流；$u_{g,abc}$ 为三相输出电压。三相电压和电流经 park 变换为 dq 两相，有助于实现逆变器控制。控制回路包含下垂控制、电压环、电流环和 PWM 调制。下垂控制根据实际输出功率 P_m 和 Q_m，得到电压和频率的参考值(u_{gd}^*, f^*)。其中，f^*控制相角 θ，u_{gd}^* 为电压环

的参考值。电压环和电流环常采用比例积分(PI)控制器，用于控制逆变器的输出电压和逆变器侧电流，为系统提供电压支撑。因此，VS-GSI 可运行在并网模式，也可运行在孤岛模式。

CS-GSI 的控制原理如图 2 所示，包括下垂控制、电流环和 PWM 调制。通过下垂控制得到输出功率的参考值(P^*, Q^*)，再经过公式(1)得到电流环的参考值(i_{gd}^* ,i_{gq}^*)。电流环中的 PI 调节器调控输出电流，其输出信号经过 PWM 调制形成逆变器的门极控制信号，控制逆变器的输出功率。因此，CS-GSI 被控为电流源，向交流母线输送功率，承担一定的负荷。且不需要设计电压环，控制较为简单。但值得注意的是，CS-GSI 需要大电网或 VS-GSI 为其提供电压和频率的支撑。

$$\begin{cases} i_{gd}^* = P^* / u_{gd} \\ i_{gq}^* = -Q^* / u_{gd} \end{cases} \tag{1}$$

文献[22]理论分析并验证了混合 VS-GSI 和 CS-GSI 系统同样能够给孤岛微电网提供电压和频率支撑，实现功率分配。此外，风机和光伏等分布式电源的输出功率受天气影响较大，具有明显的间歇性和波动性，无法为系统提供稳定的电压和频率支撑，多作为电流源接入电网。在控制层面，适用 VS-GSI 的控制方法并不适用于 CS-GSI。为不失一般性，本文研究的微电网结构如图 3 所示。其中，DG_1 – DG_3 通过 VS-GSI 连接交流母线，为系统提供电压和频率支撑；DG_4–DG_5 通过 CS-GSI 连接交流母线，向电网输送功率，参与系统电压和频率调节。Z_{line1} – Z_{line6} 为线路阻抗。

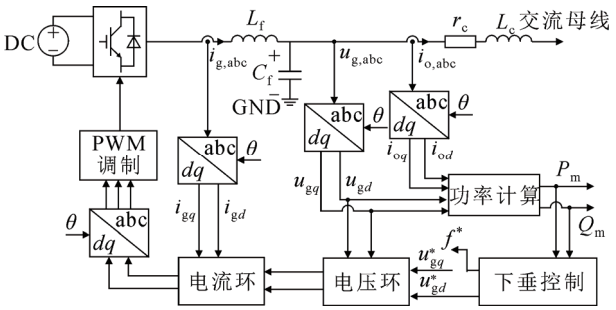


图 1　VS-GSI 控制框图

Fig.1　Control block diagram of VS-GSI

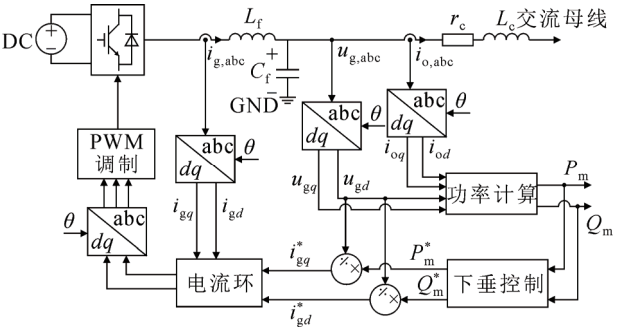


图 2　CS-GSI 控制框图

Fig.2　Control block diagram of CS-GSI

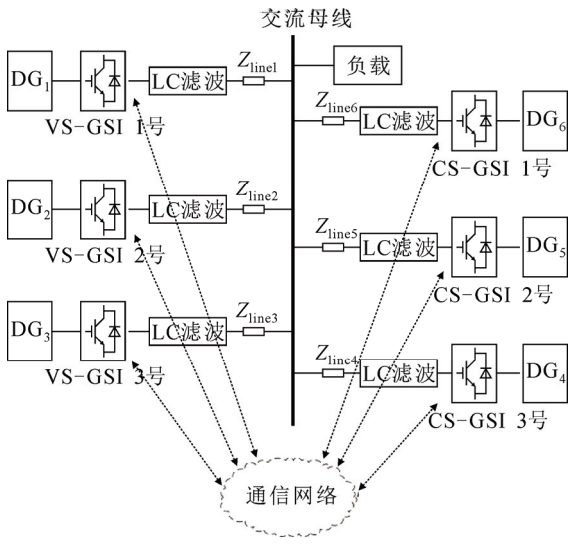


图 3　混合 VS-GSI 和 CS-GSI 交流微电网的结构图

Fig.3　Structure diagram of AC microgrid with hybrid VS-GSI and CS-GSI

2　微电网分布式协调控制

传统的微电网控制策略往往基于下垂控制，而本文提出一种不依赖下垂机制的控制策略，如图 4 所示。所提分布式协调控制策略能够代替 VS-GSI 和 CS-GSI 中的下垂控制，实现高质量电压/功率调节，以及功率的精确分配。系统中共有 N 个节点，i 和 j 表示系统节点。图 4 中，Φ_i=[u_{gi}, p_i^{norm}, q_i^{norm}]是节点 i 的本地测量信息。p_i^{norm}=m_ip_1 和 q_i^{norm}=n_iq_1 是标准有功功率和无功功率，p_1 和 q_1 为第一个 GSI 的实际输出功率。m_i 和 n_i 分别是有功功率和无功功率的权重系数，与功率分配的比例呈反比。若节点 i 为 VS-GSI，则 u_{gi} 是输出电压的幅值，若节点 i 为 CS-GSI，则不测量其输出电压，令 u_{gi}=0。每个逆变器的本地信息经通信网络与相邻节点交换信息。电压调节器、无功功率调节器和有功调节器根据相邻节点和本地节点的信息 Φ_j=[u_{gj}, p_j^{norm}, q_j^{norm}]，$j\in N_i$。其中，N_i 是与节点 i 相邻节点的集合。利用扩散算法迭代更新各个逆变器电压和标准功率的平

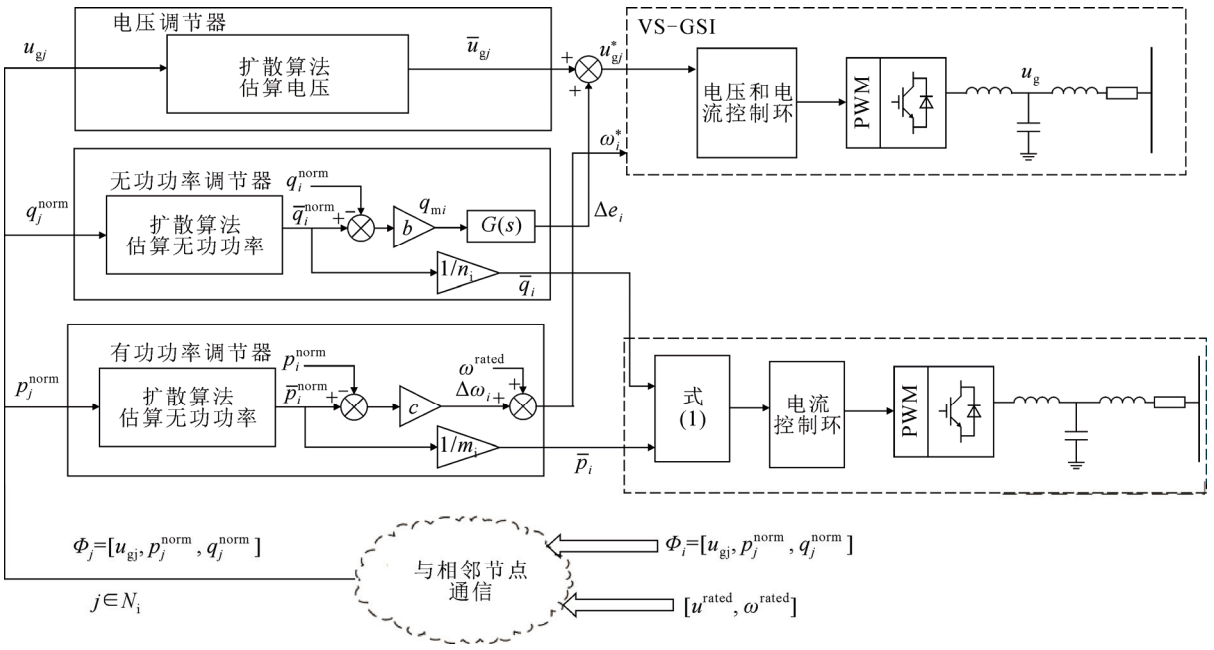


图 4 混合 VS-GSI 和 CS-GSI 交流微电网的分布式协调控制框图

Fig.4 Distributed coordinated control block diagram of ac microgrid with hybrid VS-GSI and CS-GSI

均值，进而得到逆变器所需的参考值。图 4 中，“Δ”表示差值，上标“–”表示平均值，上标“*”表示控制器的参考值，上标“rated”表示额定值，b、c 为常系数。

2.1 扩散算法

扩散算法是基于最小均方算法的分布式优化算法[20]，本地节点通过与相邻节点交换信息得到自身的中间估计量，再通过线性组合的方式融合相邻节节点的估计值，得到新的中间估计量。根据适应和组合的顺序，可以分为两类[22]：自适应后组合(adapt-then-combine, ATC) 和先组合后适应(combine-then-adapt, CTA)扩散策略。本文将简介扩散算法的 ATC 形式，迭代公式为

$$\begin{cases}\psi_i(k)=x_i(k-1)+\mu_i\left(x_i(k)-x_i(k-1)\right)\\ x_i(k)=\sum\limits_{j\in N_i}a_{ij}\psi_j(k)\end{cases}\tag{2}$$

式中：$i=1, 2, \cdots, N$；$x_i(k)$是节点 i 在时间 k 时的状态；$\psi_i(k)$是节点 i 在时间 k 时的中间变量；$\psi_j(k)$是节点 j 在时间 k 时的中间变量；μ_i 是节点 i 的步长，N_i 表示与节点 i 相连节点的集合。a_{ij} 是组合权重，依据 Metropolis 权重准则生成[12]，即

$$a_{ij}=\begin{cases}1/\max\{s_i,s_j\}, & i\text{和}j\text{相邻}\\ 1-\sum\limits_{j\neq i}a_{ij}, & i=j\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\tag{3}$$

式中：s_i 表示与节点 i 相连节点的数量；s_j 表示与节点 j 相连节点的数量。将 a_{ij} 组合为 N 阶的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$，则 $\boldsymbol{A}$ 矩阵满足以下特征

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_n=\boldsymbol{I}_n\tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{I}_n$ 表示元素全为 1 的 N 维列向量。

2.2 电压调节器

VS-GSI 具有控制微电网电压的能力，因此每个 VS-GSI 所在的节点都有一个电压调节器，如图 4 所示。本地测量电压直接输入到估算协议中，在节点 i 处的电压 u_{gi} 发生的任何变化都将通过通信网络传播，并影响其他节点的电压估算，最终电压估算模块应用扩散算法实现电压平均，故节点 i 的平均电压 $\overline{u}_{gi}$ 可表示为

$$\begin{cases}\psi_{ugi}(k)=u_{gi}(k-1)+\mu_i\left(u_{gi}(k)-u_{gi}(k-1)\right)\\ \overline{u}_{gi}(k)=\sum\limits_{j\in N_i}a_{ij}\psi_{ugj}(k)\end{cases}\tag{5}$$

为了简化控制，本文在电压的通信网络中设置一个虚拟节点，将其设为额定电压 u^{rated}，从而将各个 VS-GSI 所在节点的输出电压通过扩散算法估算为电压参考值。

2.3 无功功率调节器

在微电网实际运行中，个别母线电压可以略微偏离额定值(通常小于 5%)[23]，这为无功功率按比例分配提供了至关重要的条件。

在混合 VS-GSI 和 CS-GSI 的微电网中，标准无功功率 q_i^{norm} 经通信网络与相邻节点交换信息。无功

功率调节器中的估算模块(扩散算法)则根据本地和相邻节点的信息，估算出系统各节点标准无功功率的平均值 $\overline{q}_i^{\text{norm}}$ 。

$$\begin{cases}\psi_{q_i^{\text{norm}}}(k)=q_i^{\text{norm}}(k-1)+\mu_i\left(q_i^{\text{norm}}(k)-q_i^{\text{norm}}(k-1)\right)\\ \overline{q}_i^{\text{norm}}(k)=\sum_{j\in N_i}a_{ij}\psi_{q_j^{\text{norm}}}(k)\end{cases} \tag{6}$$

各节点标准无功功率的平均值 $\overline{q}_i^{\text{norm}}$ 经过公式(7)，得到各节点无功功率的估算值 $\overline{q}_i$ 。

$$\overline{q}_i=\overline{q}_i^{\text{norm}}/n_i \tag{7}$$

对于 CS-GSI，估算出的平均无功功率可直接通过式(1)得到 d 轴电流的参考值，控制 CS-GSI 的输出无功功率。而 VS-GSI 输出的无功功率只能通过微调输出电压 u_{gi} 而间接控制。无功功率的估算值与实际值的差经调整后的量 q_{mi} 为

$$q_{\text{m}i}=b\left(\overline{q}_i^{\text{norm}}-q_i^{\text{norm}}\right) \tag{8}$$

式中 b 是常系数。q_{mi} 经过 PI 控制器 $G_i(s)$后得到电压的微调量Δe_i，进而控制实际输出的无功功率。因此，VS-GSI 外环电压控制器的参考值为

$$u_{\text{g}i}^*=\overline{u}_{\text{g}i}+\Delta e_i \tag{9}$$

值得注意的是，式(9)将电压与无功功率联系在一起，无功功率通过电压微调量Δe_i影响电压。

2.4　有功功率调节器

标准有功功率 p_i^{norm} 与相邻节点通信，通过有功功率估算模块（扩散算法），估算出系统各节点标准有功功率的平均值 $\overline{p}_i^{\text{norm}}$ 。

$$\begin{cases}\psi_{p_i^{\text{norm}}}(k)=p_i^{\text{norm}}(k-1)+\mu_i\left(p_i^{\text{norm}}(k)-p_i^{\text{norm}}(k-1)\right)\\ \overline{p}_i^{\text{norm}}(k)=\sum_{j\in N_i}a_{ij}\psi_{p_j^{\text{norm}}}(k)\end{cases} \tag{10}$$

各节点标准有功功率的平均值 $\overline{p}_i^{\text{norm}}$ 经式(11)，得到各节点有功功率的估算值 $\overline{p}_i$ 。

$$\overline{p}_i=\overline{p}_i^{\text{norm}}/m_i \tag{11}$$

对于 CS-GSI，有功功率的估算值通过公式(1)得到 q 轴电流的参考值，控制 CS-GSI 输出的有功功率。对于 VS-GSI，在有功功率调节器中，根据有功功率的估算值和实际值之间的差，可以得到频率的微调量$\Delta\omega_i$。

$$\Delta\omega_i=c\left(\overline{p}_i^{\text{norm}}-p_i^{\text{norm}}\right) \tag{12}$$

式中 c 为常系数。$\Delta\omega_i$ 与额定频率 ω^{rated} 相加后得到参考频率 ω_i^* (如图 4 所示)，为微电网提供频率支撑。值得注意的是，式(13)将频率与有功功率联系在一起，有功功率通过频率微调量$\Delta\omega_i$ 间接影响频率。同时，频率的变化也将影响 VS-GSI 输出的有功功率。

$$\omega_i^*=\Delta\omega_i+\omega^{\text{rated}} \tag{13}$$

3　扩散算法和一致性算法的收敛性

3.1　扩散算法的谱半径

根据公式(2)，扩散算法的矩阵形式为

$$\boldsymbol{x}(k)=\left((1-\mu)(\boldsymbol{I}-\mu\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}\right)\boldsymbol{x}(k-1) \tag{14}$$

式中 $\boldsymbol{I}$ 表示 N 阶单位矩阵。令权重矩阵 $W_{\text{diff}}=(1-\mu)\ (I-\mu A)^{-1}\boldsymbol{A}$。扩散算法收敛时，最终稳态值 x_{eq} 为[24]

$$\boldsymbol{x}_{\text{eq}}=\lim_{k\to\infty}\boldsymbol{x}(k)=\lim_{k\to\infty}\boldsymbol{W}_{\text{diff}}^k\boldsymbol{x}(0)=\left(\frac{1}{N}\boldsymbol{I}_n\cdot\boldsymbol{I}_n^T\right)\boldsymbol{x}(0) \tag{15}$$

式中初值向量 $\boldsymbol{x}(0)=[x_1(0), x_2(0), \cdots, x_N(0)]$。

根据谱半径的定义，系统稳定的充分必要条件是，选择合适的步长，使得权重矩阵的谱半径小于 1。且谱半径越小，收敛速度越快。

扩散算法的谱半径 ρ_{diff} 为可表述为

$$\rho_{\text{diff}}=\rho\left(\boldsymbol{W}_{\text{diff}}-\frac{1}{N}\boldsymbol{I}_n\cdot\boldsymbol{I}_n^T\right) \tag{16}$$

式中 $\rho(\bullet)$表示谱半径算子。

3.2　一致性算法的谱半径

一致性算法的迭代公式为

$$x_i(k)=x_i(k-1)+\varepsilon\sum_{j\in N_i}a_{ij}\left(x_j(k-1)-x_i(k-1)\right) \tag{17}$$

式中 ε 是节点 i 的步长。其矩阵形式为

$$\boldsymbol{x}(k)=\left((1-\varepsilon)\boldsymbol{I}+\varepsilon\boldsymbol{A}\right)\boldsymbol{x}(k-1) \tag{18}$$

令权重矩阵 $W_{\text{cons}}=(1-\varepsilon)I+\varepsilon A$，当扩散算法收敛时，最终的稳态值 x_{eq} 为[24]

$$\boldsymbol{x}_{\text{eq}}=\lim_{k\to\infty}\boldsymbol{x}(k)=\lim_{k\to\infty}\boldsymbol{W}_{\text{cons}}^k\boldsymbol{x}(0)=\left(\frac{1}{N}\boldsymbol{I}_n\cdot\boldsymbol{I}_n^T\right)\boldsymbol{x}(0) \tag{19}$$

则一致性算法的谱半径 ρ_{cons} 表示为

$$\rho_{\text{cons}}=\rho\left(\boldsymbol{W}_{\text{cons}}-\frac{1}{N}\boldsymbol{I}_n\cdot\boldsymbol{I}_n^T\right) \tag{20}$$

3.3　收敛性分析

针对图 3 所示混合 VS-GSI 和 CS-GSI 系统，通信网络拓扑采用环形结构，由式(3)得邻接矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}0&1&0&0&0&1\\1&0&1&0&0&0\\0&1&0&1&0&0\\0&0&1&0&1&0\\0&0&0&1&0&1\\1&0&0&0&1&0\end{bmatrix} \tag{21}$$

根据式(16)和(20)，扩散算法和一致性算法的谱半径与步长之间的关系如图 5 所示。可以看出，取相同的步长时，一致性算法的谱半径始终大于扩散

算法，并且当 μ 小于 1.5，ε 小于 1.0 时，系统收敛。由谱半径的性质可知，扩散算法的收敛速度要优于一致性算法的收敛速度。

图 5 中，扩散算法和一致性算法的谱半径与步长之间的关系对应的数值仿真如图 6 所示。在图 6(a)、(b)中，在 μ 等于 1.5，ε 等于 1.0 时，系统不收敛，故步长的取值范围与图 5 的理论分析结果一致。此外，在 t=0.5 s，μ 和 ε 都为 0.7 时，扩散算法在 0.08 s 后收敛，而一致性算法的收敛速度较慢，收敛时间为 0.12 s。图 6(c)、(d)为扩散算法和一致性算法的谱半径相等(0.8519)，即收敛速度相等时对应的数值仿真。可以看出，当 μ 为 0.08 和 1.46，ε 为 0.3 和 0.93 时，其收敛速度相等，均为 0.65 s，进一步验证了理论的正确性。

4 算例仿真分析

为了验证上述交流微电网协调控制策略的有效性与优越性，在 PLECS 中搭建了如图 3 所示的仿真模型。6 台不同容量的 DG 通过撑网逆变器(3 台 VS-GSI、3 台 CS-GSI)并联接入公共母线。主电路与控制回路的主要参数见表 1。通信网络的结构为环形。表 2 为交流微电网的负荷变化情况。t<5 s，负荷为 869 W，178 VA；在 t = 5 s 时，负荷增加了 869 W，178 VA；在 t=10 s 时，负荷再次增加了 869 W，178 VA。设置 DG 功率分配的比例均为 6:6:3:3:2:2，6 台 DG 所需承担的功率分别为 237 W +

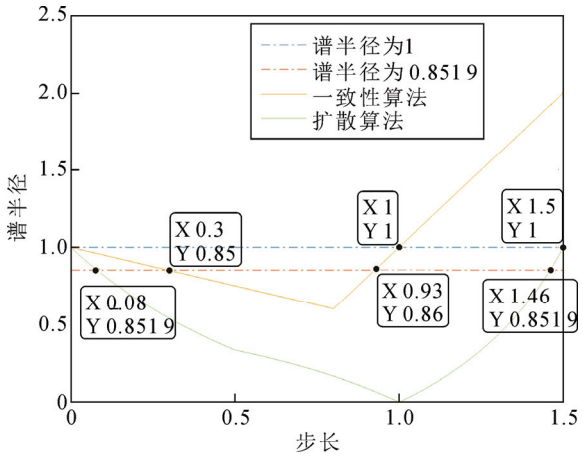


图 5 扩散算法和一致性算法的谱半径与步长关系

Fig.5 Relationship between spectral radius and step-size in diffusion algorithm and consensus algorithm

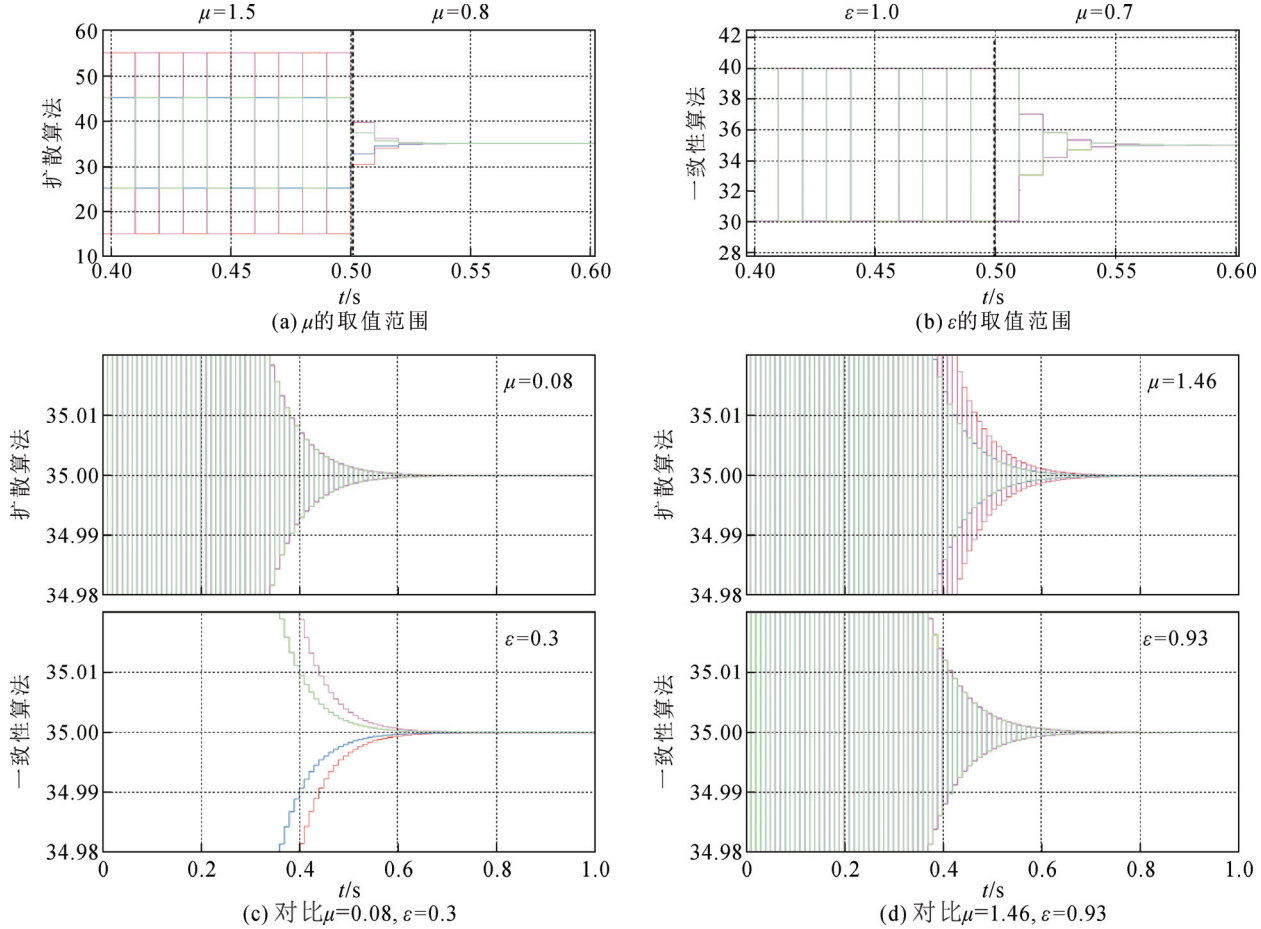


图 6 数值仿真

Fig.6 Numerical simulation

表 1　主电路及控制回路主要参数

Table 1　Main parameters of MG topology and control system

参数	符号	数值
额定电压	u^{rated}	110 V
额定频率	ω^{ratd}	314 rad/s
LC 滤波	L_{f}	0.78 mH
	C_{f}	107 μF
线路阻抗	Z_{line1}：R_{line1}, L_{line1}	0.05 Ω，0.35 mH
	Z_{line2}：R_{line2}, L_{line2}	0.05 Ω，0.35 mH
	Z_{line3}：R_{line3}, L_{line3}	0.15 Ω，1.05 mH
	Z_{line4}：R_{line4}, L_{line4}	0.15 Ω，1.05 mH
	Z_{line5}：R_{line5}, L_{line5}	0.1 Ω，0.7 mH
	Z_{line6}：R_{line6}, L_{line6}	0.1 Ω，0.7 mH
电压环	k_{pv}	5
	k_{iv}	0.08
电流环	k_{pc}	5
	k_{ic}	1000
无功功率 PI	G_{p}	2
	G_{i}	10

48.8 VA (DG_1，DG_2)，118.5 W+24.4 VA (DG_3，DG_4)，79 W+16.3 VA (DG_5，DG_6)。

由图 6 可知，当扩散算法的步长小于 1.5，一致性算法的步长小于 1.0 时，系统收敛，且一致性算法的收敛速度较快。在微电网的算例仿真中，μ 和 ε 为 0.33。

4.1　负荷响应分析

本文所提控制策略不依赖下垂机制，结合一次和二次控制的目标，实现电压/频率的高质量控制和功率精确分配。为凸显本文所提控制策略的优越性，在相同拓扑中，对比基于下垂机制的分层控制，和基于一致性算法的分布式协调控制。为突出对比，本节主要展示无功功率、电压和频率的仿真结果。

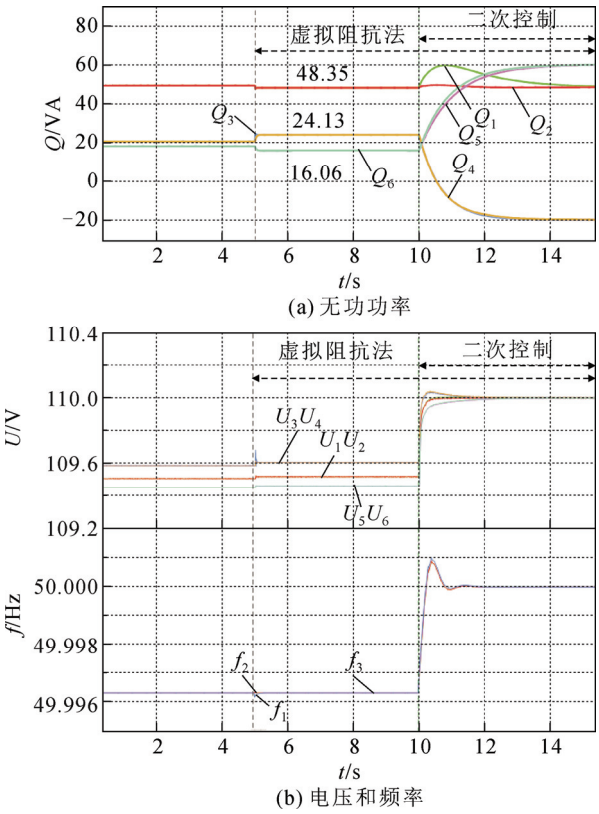
在基于下垂机制的分层控制策略中，根据[22]设置下垂系数，使得有功功率和无功功率的分配比例均为 6:6:3:3:2:2，仿真结果如图 7 所示。在 t<5 s 时，由于线路阻抗不匹配，无功功率无法按预设比例分配。此外，电压和频率存在偏移。在 t=5 s 时应用了虚拟阻抗法[22]，能够实现无功功率按比例分配。在 t=10 s 投入基于一致性算法的二次控制[25]后，电压和频率恢复至参考值，但无功的分配受到破坏，无法按比例分配。

基于表 2 所示的负荷事件，本文所提基于扩散算法的分布式协调控制的仿真结果如图 8 所示。图 8(a)中，无功功率的动态响应时间为 1.5 s，最大超调量为 20 %，稳态时系统能按照预设比例精确分配负荷功率。图 8(b)中，逆变器输出电压的动态响应

表 2　负荷事件

Table 2　Loading scenarios

名称	时间	执行
初始负荷	t < 5 s	869 W，178 VA
负荷事件 I	t =5 s	+869 W，+178 VA
负荷事件 II	t = 10 s	+869 W，+178 VA



(a) 无功功率

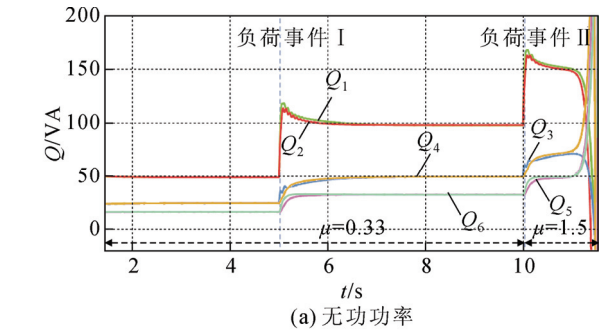
(b) 电压和频率

图 7　基于下垂机制的分层控制仿真结果

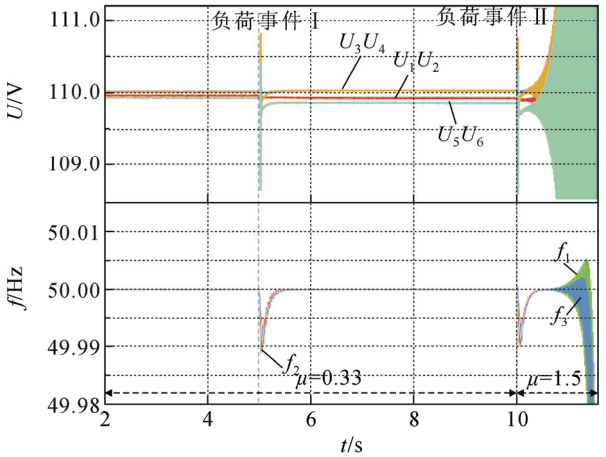
Fig.7　Simulation result of droop mechanism-based hierarchical control

较快，其稳态误差随着负荷的增加而增大，但始终小于 0.45%(109.5~110.5 V)，且各逆变器电压的平均值也恢复至额定值。此外，系统频率在负荷增加的瞬间产生较小的波动(0.001 Hz)后，迅速恢复并稳定在额定值。在 t=10 s，扩散算法的步长 μ 从 0.33 增大至 1.5，此时系统不收敛。故在系统仿真中，μ 的最大取值也为 1.5，与数值仿真结果一致。

应用一致性算法替代本文所提控制策略中的扩散算法，基于表 2 所示的负荷事件，其仿真结果如图 9 所示。由于电压和频率的稳态效果与所提策略差距较小，仅对比分析无功功率的仿真结果。在图 9 中，无功功率的动态响应时间为 2 s，最大超调量为 40%，其动态效果较所提基于扩散算法的协调控制策略差。在 t=10 s，一致性算法的步长 ε 增大



(a) 无功功率



(b) 电压和频率

图 8 本文所提基于扩散算法的分布式协调控制仿真结果

Fig.8 Simulation result of diffusion algorithm-based distributed coordinated control

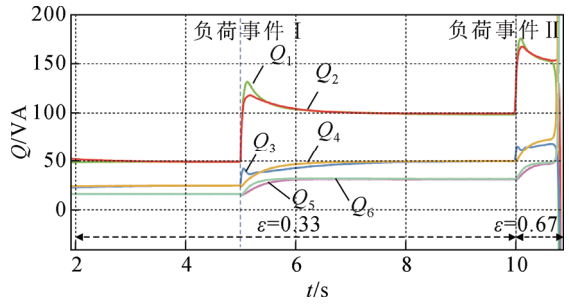


图 9 基于一致性算法的分布式协调控制仿真结果

Fig.9 Simulation result of consensus algorithm-based distributed coordinated control

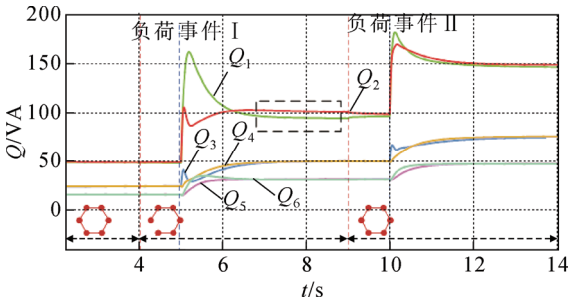


图 10 通信故障时基于一致性算法的分布式协调控制仿真

Fig.10 Simulation result of consensus algorithm-based distributed coordinated control under communication failure

至 0.67 时，系统不收敛。因此在系统仿真中，ε 的最大取值仅为 0.67，小于数值仿真结果(图 5)。

因此，对比基于下垂机制的分层控制策略和基于一致性算法的分布式协调控制策略，本文所提基于扩散算法的分布式协调控制在实现高质量电压和频率控制的同时，能够实现功率按比例精准分配，且动态响应速度较快。

4.2 通信故障

在系统的运行过程中，通信系统也会存在故障，影响信息交换。假设 t=4 s 时，节点 1 和节点 2 之间的通信断开，通信从环形的拓扑结构变为线性结构。t=9 s 时，节点 1，2 之间的通信恢复正常。为了研究通信故障对系统稳定性的影响，分别对基于一致性算法的分布式协调控制和本文所提基于扩散算法的分布式协调控制进行对比。

图 10 为基于一致性算法的控制策略仿真结果。在 t=4 s 发生故障后，系统能够保持稳定运行。但在 t=5 s 负荷增加时，无功功率的分配存在偏差，且超调量为 55%。在 t = 9 s 通信系统恢复正常后，系统快速响应，且实现功率按比例分配。

对于本文所提基于扩散算法的分布式协调控制(图 11)，在 t=4 s 发生故障后，系统依然能够稳定运行，如图 11 所示。在 t=5 s 负荷增加时，无功功率的最大超调量为 28%，且能在 2 s 后收敛，并按照预设比例精确分配功率。

因此，本文所提基于扩散算法的协调控制策略在通信故障时具有较好的鲁棒性，依然能够实现功率的精确分配。

4.3 逆变器故障

本小节则研究了所提分布式协调控制对逆变器故障的恢复能力，实现 DG“即插即用”。

微电网的负荷始终为 2.6 kW，0.5 kVA。1 号 VS-GSI 在 t=5 s 时发生故障，退出运行，且通信拓扑从环形结构变为线性结构。如图 12 所示，在 1 号 VS-GSI 发生故障后，标准有功功率和标准无功功率经扩散算法后收敛且一致，则其余撑网变换器依然能够按比例承担负荷。当 1 号 VS-GSI 在 8 s 恢复运行后，6 个撑网逆变器再次按比例承担负荷，故所提控制策略具有 DG“即插即用”的能力，对变换器故障有较强的鲁棒性。

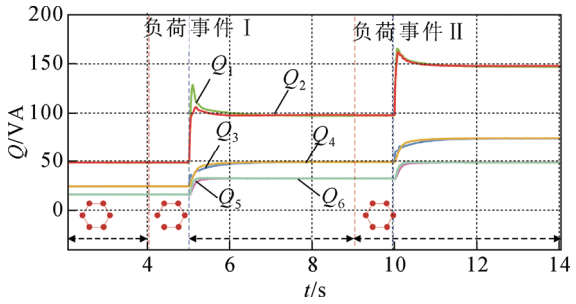
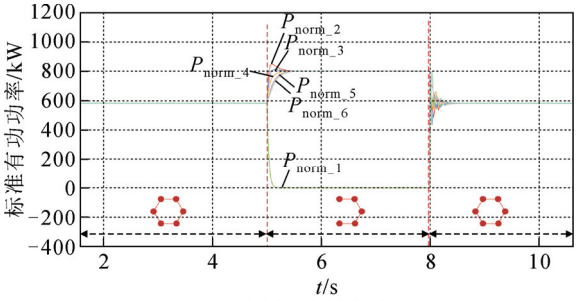
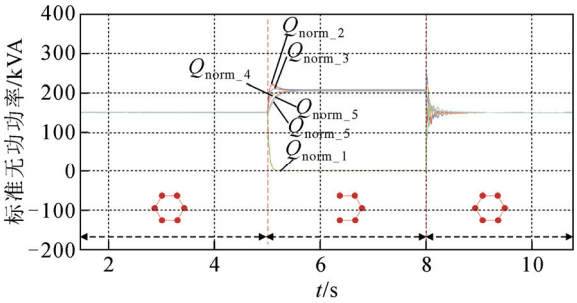


图 11　通信故障时基于扩散算法的分布式协调控制仿真结果

Fig.11　Simulation result of diffusion algorithm-based distributed coordinated control under communication failure



(a) 标准有功功率



(b) 标准无功功率

图 12　不同通信时延下本文所提分布式协调控制仿真结果

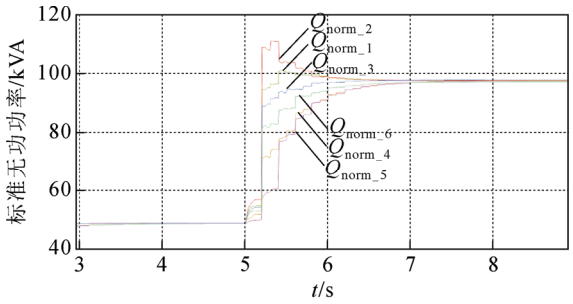
Fig.12　Simulation result of proposed distributed coordinated control with different communication delay

4.4　通信延时

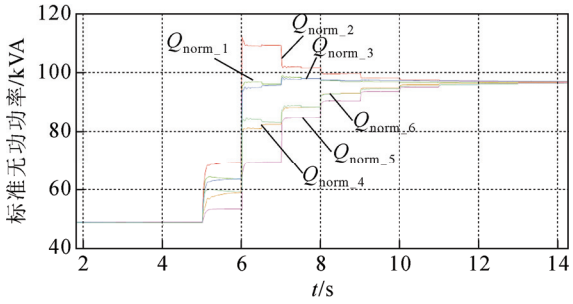
通信过程中的延时会影响控制参数更新，严重时可能会影响系统整体的稳定性。为了分析通信延时对本文所提控制策略的影响程度，分别研究通信时间 T_d 为 100 ms 和 500 ms 对系统的影响程度。为了方便观察，本节只研究标准无功功率，其仿真结果如图 13 所示。t=5 s 负荷增加时，标准无功功率的响应时间分别为 2 s 和 7 s。可见，通信延时会影响系统的收敛速度，但不会影响稳态值。因此，本文所提控制策略对通信延时具有较高的鲁棒性。

5　结论

本文基于混合 VS-GSI 和 CS-GSI 交流微电网提出一种分布式协调控制策略。所提策略基于扩散算法，包括 3 个部分：电压调节器，有功功率调节器和无功功率调节器。优点如下：



(a) T_d=100 ms



(b) T_d=500 ms

图 13　不同通信时延下本文所提分布式协调控制仿真结果

Fig.13　Simulation result of proposed distributed coordinated control with different communication delay

1）所提分布式协调控制针对混合 VS-GSI 和 CS-GSI 交流微电网，更具一般性，同样适用于基于多 VS-GSI 或多 CS-GSI 的交流微电网。

2）所提分布式协调控制中，系统电压的偏移量小，且频率运行在额定值，具有高质量电压和频率控制能力，解决了下垂控制中电压调节性能与功率分配的固有矛盾。

3）所提分布式协调控制基于扩散算法并引入了权重系数，能够协调分布式电源所承担的负荷比例，在面对线路阻抗不匹配、负荷变动时依然能够精准分配功率，解决了下垂控制中功率分配受线路阻抗影响的缺点。

4）对比基于一致性算法的分布式协调控制，所提基于扩散算法的分布式协调控制收敛速度更快，且对通信故障、变换器故障和通信延时具有较强的鲁棒性。

参考文献　References

[1]　杨清志，蒋　伟，许春雷. 基于多智能体的交直流混合微电网监控设计与分层控制研究[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2327-2339.
YANG Qingzhi, JIANG Wei, XU Chunlei. Monitoring design and research on hierarchical control of AC/DC hybrid microgrid based on multi-agent[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2327-2339.

[2] 张庆海，彭楚武，陈燕东，等. 一种微电网多逆变器并联运行控制策略[J]. 中国电机工程学报，2012，32(25)：126-132.
ZHANG Qinghai, PENG Chuwu, CHEN Yandong, et al. A control strategy for parallel operation of multi-inverters in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 126-132.

[3] MENG X, LIU J J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.

[4] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.

[5] 魏 星，朱信舜，葛 健，等. 级联型电力电子变压器并联运行的改进下垂控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1274-1282.
WEI Xing, ZHU Xinshun, GE Jian, et al. Improved droop control STRATEGY for parallel operation of cascaded power electronic transformers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1274-1282.

[6] WU X Y, SHEN C, IRAVANI R. Feasible range and optimal value of the virtual impedance for droop-based control of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1242-1251.

[7] 冯夏云，汪 飞，李玉菲，等. 下垂控制逆变器输出阻抗外特性建模及参数敏感性分析[J]. 中国电机工程学报，2020，40(21)：7012-7021.
FENG Xiayun, WANG Fei, LI Yufei, et al. Modelling and sensitivity analysis for the output impedance profile of droop controlled inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 7012-7021.

[8] 孙孝峰，杨雅麟，赵 巍，等. 微电网逆变器自适应下垂控制策略[J]. 电网技术，2014，38(9)：2386-2391.
SUN Xiaofeng, YANG Yalin, ZHAO Wei, et al. An adaptive droop control method for inverters in microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2386-2391.

[9] 白小丹，苗 虹，曾成碧，等. 适用于低压微网中逆变器无功均分的改进下垂控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(4)：1310-1318.
BAI Xiaodan, MIAO Hong, ZENG Chengbi, et al. Improved droop control strategy for reactive power sharing of inverters in low-voltage microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1310-1318.

[10] 张 平，石健将，李荣贵，等. 低压微网逆变器的“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.

[11] 张 辉，宋 琼，魏亚龙. 离网运行的多微源微网调频调压控制策略[J]. 高电压技术，2017，43(1)：149-156.
ZHANG Hui, SONG Qiong, WEI Yalong, et al. Frequency and voltage regulation control strategy of micro-grid with multiple micro sources under island mode[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 149-156.

[12] 吕振宇，苏 晨，吴在军，等. 孤岛型微电网分布式二次调节策略及通信拓扑优化[J]. 电工技术学报，2017，32(6)：209-219.
LÜ Zhenyu, SU Chen, WU Zajun, et al. Distributed secondary control strategy and its communication topology optimization for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 209-219.

[13] WU X Y, SHEN C, IRAVANI R. A distributed, cooperative frequency and voltage control for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2764-2776.

[14] 高 扬，艾 芊，王 靖. 多智能体系统的交直流混合微网群一致性协同控制[J]. 高电压技术，2018，44(7)：2372-2377.
GAO Yang, AI Qian, WANG Jing. Consensus cooperative control of AC/DC hybrid microgrids based on multi-agent system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2372-2377.

[15] 李得民，吴在军，赵 波，等. 基于模型预测控制的孤岛微电网二次调节策略[J]. 电力系统自动化，2019，43(10)：60-67.
LI Demin, WU Zaijun, ZHAO Bo et al. Secondary regulation strategy for islanded microgrid based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 60-67.

[16] 肖湘宁，王 鹏，陈 萌. 基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J]. 电工技术学报，2018，33(8)：1894-1902.
XIAO Xiangning, WANG Peng, CHEN Meng. Secondary voltage control in an islanded microgrid based on distributed multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1894-1902.

[17] WANG Z G, WU W C, ZHANG B M. A distributed quasi-newton method for droop-free primary frequency control in autonomous microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2214-2223.

[18] NASIRIAN V, SHAFIEE Q, GUERRERO J M, et al. Droop-free distributed control for AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1600-1617.

[19] MOHIUDDIN S M, QI J J. Droop-free distributed control for AC microgrids with precisely regulated voltage variance and admissible voltage profile guarantees[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 1956-1967.

[20] TU S Y, SAYED A H. Diffusion strategies outperform consensus strategies for distributed estimation over adaptive networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(12): 6217-6234.

[21] WEI S S, GAO F, HASHMI K, et al. Modal analysis of voltage-source-based and current-source-based parallel grid-supporting inverters[C]// Proceedings of the IECON 2020 the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore: IEEE, 2020: 3236-3241.

[22] CATTIVELLI F S, SAYED A H. Diffusion LMS strategies for distributed estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1035-1048

[23] 肖宏飞，钱 浩，林艳艳，等. 考虑无功功率协调的微网二级电压控制[J]. 中国电机工程学报，2018，38(4)：1084-1092.
XIAO Hongfei, QIAN Hao, LIN Yanyan, et al. Secondary control scheme for voltage compensation and reactive power coordination in microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1084-1092.

[24] XIAO L, BOYD S. Fast linear iterations for distributed averaging[C]// Proceedings of the 42nd IEEE International Conference on Decision and Control. Maui, USA: IEEE, 2003: 4997-5002.

[25] YU J H, GAO F, WEI S S, et al. An improved distributed secondary control scheme in islanded AC microgrids[C]// Proceedings of 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, USA: IEEE, 2020: 1335-1342.



魏珊珊
1996—，女，硕士生
研究方向为交流微电网多逆变器控制与稳定性分析
E-mail: wssnuist@163.com

WEI Shanshan



高 飞(通信作者)
1985—，男，博士，副教授
主要研究方向为多电飞机，微电网控制与稳定性
E-mail: fei.gao@sjtu.edu.cn

GAO Fei
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2021-08-06 在线出版日期 2021-10-27 编辑 陈 蔓