

基于一致性算法的孤立微电网二次控制方法

马喜平, 沈渭程, 李金菊, 刘丽娟

国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070

Second control method of isolated micro grid based on consistency algorithm

Ma xiping, shen weicheng, li jinju, liujuan

Power Science Research Institute of Gansu electric power company, Gansu lanzhou 730070

ABSTRACT: Virtual Synchronous Generator (VSG) technology is widely concerned in the application of distributed generation and Microgrid because it can simulate the internal and external characteristics of synchronous generator. Under the influence of new energy generation, line impedance, local load and other factors, vertical control and VSG control inverter can not ensure the stable operation of the micro grid. Therefore, the microgrid under the island mode needs two times of frequency and voltage control. In view of the limitations of decentralized and centralized two times adjustment, a distributed hierarchical control method based on dynamic consistency algorithm is proposed. Each distributed micro source is equivalent to an agent (agent). Each agent uses only local information and the information of adjacent agents to pass the consistency protocol, and then uses the PI controller. By adjusting the P-f curve adaptively, it can achieve constant frequency and reasonable power distribution. The physical model of microgrid is built on the MATLAB/Simulink simulation platform, and the adjustment performance under different working conditions is simulated and analyzed, and the correctness and effectiveness of the two adjustment methods are verified.

KEY WORD: microgrid, virtual synchronous machine, dynamic consistency, two time control, power allocation

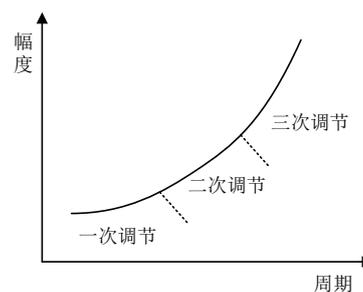
摘要: 虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术因能模拟同步发电机的内部机理和外部特性, 在分布式发电和微电网的应用中得到广泛关注。受新能源发电、线路阻抗、本地负荷等因素影响, 下垂控制和 VSG 控制逆变器的一次调节(有差调节)保证不了微电网的稳定运行, 故孤岛模式下的微电网亟需进行频率和电压的二次控制。针对采用分散式和集中式二次调节的局限性, 提出了一种基于动态一致性算法的分布式分层控制方法, 将各分布式微源等效成智

能体(agent), 各智能体仅利用本地信息和相邻智能体的信息交互通过一致性协议, 再利用 PI 控制器的作用自适应调节 P-f 曲线, 便可实现频率恒定和功率合理分配。在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建微电网物理模型, 仿真分析其在不同工况下的调节性能, 验证所提二次调节方法的正确性和有效性。

关键词: 微电网, 虚拟同步机, 动态一致性, 二次控制, 功率分配

1 引言

随着全球范围内环境污染、能源危机以及能源需求的持续增长, 以风光等可再生能源为代表的分布式发电与微电网技术得到广泛关注[1-4]。由于光伏、风电的随机性、间歇性和不确定性, 大量接入电网对电网的影响越来越大, 不容忽视[5-7]。鉴于此, 虚拟同步发电机技术(VSG)应运而生, VSG 是通过模拟同步机的机电暂态特性, 使静止电力电子装置的变流器具有同步机的转动惯量和阻尼特性, 并且可模拟原动机的调速器和励磁调节器, 实现一次调频和调压。VSG 在并网时很大程度上降低了对电力系统稳定运行的影响, 可实现友好型并网; 在独立微电网模式下可实现多 VSG 并列稳定运行, 对新能源消纳开辟了一条新的途径[8-11]。



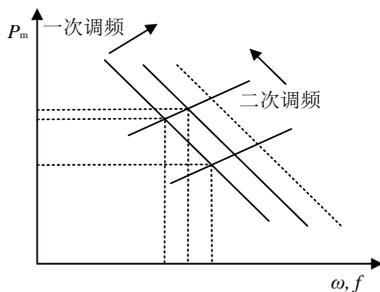


图 1 电力系统的调节原理

Fig2 The principle of power system regulation

借鉴传统电力系统的调节原理，将微电网的调节分为一次、二次和三次调节，这里只讨论一次和二次调节。目前，微电网的二次控制主要有分散控制、集中控制和分布式控制。1) 分散式二次控制。VSG (下垂控制)作为一种分散控制，基于本地信息，无需网络通信，各 VSG 独立计算频率偏差来获取各自的功率调节量。为使并联 VSG 按容量共享负载，必须保证各 VSG 有相同的输出阻抗标幺值，且必须设定相同的电压有效值。文献[12]通过引入惯性环节，平移下垂曲线实现频率无差控制，但没考虑多微源组网运行时的复杂工况。文献[13]将 VSG 分为调频单元和非调频单元，提出了集中式和分散式两种二次调节方法。文献[14]提出分散式的二次控制方法，通过反馈发电侧的频率，实现频率无差控制，但为考虑逆变器容量的问题。文献[15]设计了单机 VSG 频率和电压的无差控制的与同步单元，然而并未考虑多 VSG 组网运行时的工况。文献[16]提出了平移法、改变下垂系数法、调整功率系数法三种二次调频方法，但仅停留着理论方面。2)集中式二次控制。通过微电网中心控制器(Micro Grid Center Controller, MGCC)实现，MGCC 采集微电网的运行信息，将优化计算指令反馈给 VSG 一次控制层。该方法由于中心节点的存在，调节精度高，但可靠性和扩展性变差。文献[17]提出了一种采用集中控制方式的微电网频率和电压二次调节方法，将二次控制器产生的频率

和电压的调节量按容量比分配给各 VSG 的调频和电压控制器，但是由于现实中有功量测表存在一定的误差，或者调频机组跳闸等原因，使得调节结束后频率偏差 $\Delta f \neq 0$ ，电压偏差 $\Delta u \neq 0$ 。3)基于一致性的分布式控制^[18-19]，通过相邻分布式微源的通信实现频率和电压的二次控制，无需 MGCC 即可完成缺额功率的均分，但是引入通信势必影响响应速度，尤其是大量分布式微源的情况下。

针对上述文献中所提分散式、集中式和分布式二次控制的缺点与不足，提出了一种基于动态一致性的多 VSG 并联分布式控制策略，将各分布式微源等效成 agent，各 agent 通过本地信息和相邻 agent 信息，利用动态一致性协议对微电网的频率和功率估计，通过比例积分控制器实现微电网系统频率和电压的一直，并完成功率的合理分配。最后，利用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建仿真模型仿真验证所提控制策略的二次调节效果。

2 虚拟同步机原理

VSG 的本质是通过在逆变器侧加入储能单元，在下垂控制的基础上，引入 VSG 控制算法，模拟同步发电机转子转动惯量和阻尼特性。从逆变器控制的角度来讲，VSG 其实为加强版的下垂控制。其主电路拓扑及控制如图 1 所示， U_{dc} 为直流侧电压， $e_{abc}=[e_a, e_b, e_c]^T$ 、 $u_{abc}=[u_a, u_b, u_c]^T$ 、 $i_{abc}=[i_a, i_b, i_c]^T$ 分别为 VSG 三相感应电动势、输出端电压与并网电流， L_s 和 C 分别为滤波电感和电容， $u_{gabc}=[u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}]^T$ 为电网三相电压，PCC 为多 VSG 组网运行或 VSG 并网的公共耦合点(Common coupling point, PCC)。

图 1 为三相逆变器经 VSG 控制算法等效为同步发电机的过程，其中 VSG 控制主要由 P-f 下垂控制、Q-u 下垂控制及电压电流双闭环控制等组成。

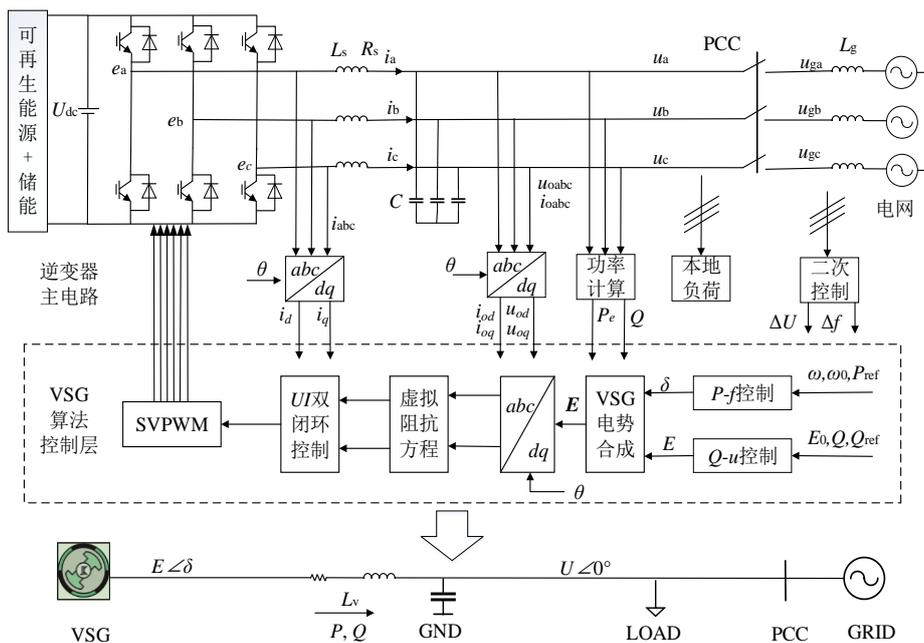


图 2 虚拟同步发电机控制框图

Fig2 Control block diagram of virtual synchronous generator

模拟原动机调速器原理和同步发电机转子运动方程, 可知 VSG 虚拟惯量控制器如图 2 所示。在极对数为 1 的情况下, 机械角等于电角度, 则此时转子运动方程与有功功率-频率 (P-fDroop) 下垂控制方程分别为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_m 、 T_e 和 T_d 分别为同步发电机的机械转矩、电磁转矩与阻尼转矩; ω 、 ω_0 分别为 VSG 电角速度与额定电角速度; θ 为电角度; J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)、 D 分别为模拟同步发电机的转子转动惯量和阻尼系数; K_p 为调差系数。

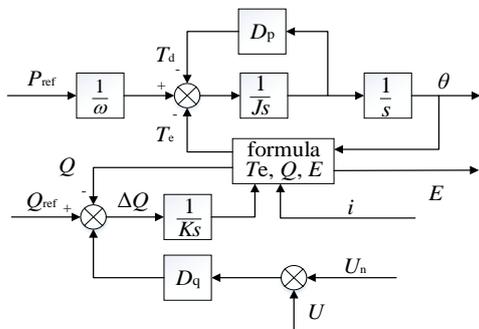


图 3 虚拟同步发电机主控制框图

Fig.3 Control configuration of the virtual synchronous generator

图 3 所示的虚拟同步主控制图里包含了励磁控制器部分, 其中 D_q 为无功功率-电压下垂系数, 反映了同步发电机的 Q-u 特性。 M_f 、 i_f 分别为定转子的互感与励磁电流。式(3)~(5)依次为逆变器输出电压、电磁转矩、无功功率表达式。

$$e = \omega M_f i_f \sin \theta \quad (2)$$

$$T_e = M_f i_f \langle i, \sin \theta \rangle \quad (3)$$

$$Q = -\omega M_f i_f \langle i, \cos \theta \rangle \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sin \theta = \left[\sin \theta, \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right), \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \\ \cos \theta = \left[\cos \theta, \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right), \cos \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

同步发电机的数学模型完全可以引入逆变器的控制, 使逆变器具有下垂控制的有功频率和无功电压下垂特性。下垂控制加上后面的机械方程就完全模拟了同步发电机的转子转动惯量和阻尼特性, 使得逆变器的等效为同步发电机, 从而增加逆变器控制的稳定性。

3 多智能体动态一致性算法

3.1 多智能体算法图论基础

诸如多分布式电源组成的微电网，在多节点组成的分布式网络中，多智能体(Muti-agent)一致性算法是指本地智能体通过本地信息和相邻智能体之间的信息交互，从而达到全局信息的一致性。

含 n 个节点的多智能体可用有向图 $G=(V, E, A)$ 表示，其中 $V=\{1, 2, \dots, n\}$ 表示 n 个相互独立的智能体， $E \subseteq \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ 表示各智能体之间的信息交互， $A=[a_{ij}]$ 表示各智能体之间关系的连接矩阵：若智能体 i 与 j 之间有通信关系时， $a_{ij}>0, \forall i \neq j$ ；否则 $a_{ij}=0$ ，即 $a_{ii}=0$ 。可用拉普拉斯矩阵 L 对智能体的拓扑结构进行描述，其元素定义为

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1, 2, \dots, n} a_{ij}, & i = j \\ -a_{ij}, & i \neq j \end{cases}$$

3.2 多智能体一致性算法

汲取分层控制和分布式控制的优点，本文采用的基于多多智能体的分布式分层控制方法。避免了中心节点的存在，分布式的点对点信息交换与融合最终都成全局一致。

对于含 n 个智能体的分布式多智能系统，其状态变化取决于自身当前状态和相邻智能体当前状态量，表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = u_i(t) \\ u_i(t) = -\sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)), i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

式中， $x_i(t)$ 表示第 i 个 agent 的状态表量， $u_i(t)$ 为控制输入， $N_i(t)$ 表示 agent i 在 t 时刻的邻居节点集合， $a_{ij}(t)$ 表示智能体 j 传给智能体 i 的信息权重(稀疏网络的邻接矩阵中 (i, j) 项)。

表示成矩阵形式为

$$\begin{cases} \dot{X} = U \\ U = -LX \end{cases} \quad (7)$$

式中， X 表示 agent 的系统状态向量， L 为加入权重后的拉普拉斯矩阵，由系统的拓扑结构决定。实际系统为离散控制系统，故引入离散一致性算法[20]

$$x_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j[k], i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

即构造系统的状态转移矩阵 D ，使得 $X[k+1]=DX[k]$ ，当 D 特征值不大于 1 时，系统状态变量一致收敛于的平均值，即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} X[k] = \lim_{k \rightarrow \infty} D^k X[0] = \frac{ee^T}{n} X[0] \quad (9)$$

式中， e 为单位列向量， $X[0]$ 为系统的初始状态变量。

在实际控制系统的应用中，当且仅当 D 对角线元素没有 0 时离散一致性收敛，且收敛速度由 D 的第二大特征值决定，本质谱半径越小，收敛越快，迭代次数也越小。

4 含 VSG 微电网的二次调节

本文所提的基动态一致性算法的分布式分层控制策略是在 VSG 控制的基础上进行二次和三次调整，涉及经济调度的三次调整这里不做主要研究。图 4 为含多 VSG 微电网的动态一致性分布式分层控制的整体框图。其主要控制目标是负荷变化时，通过分布式分层的一次、二次控制达到有功、无功功率的合理分配，保证微电网系统整体的电能质量达到相关标准。

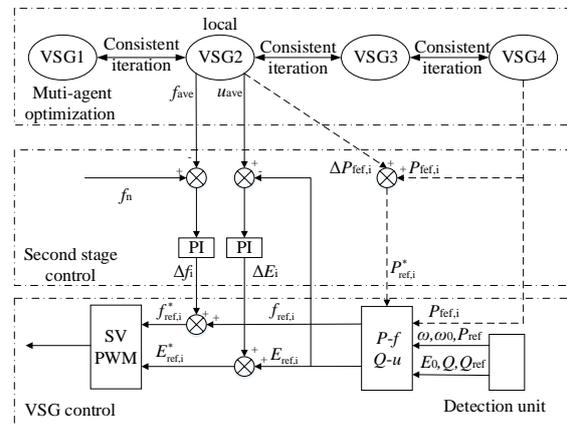


图 4 含 VSG 微电网分布式分层控制框图
Fig.4 Distributed hierarchical Control configuration of VSG micro-grid

4.1 频率一致性控制

由文献[21]可知，下垂控制(VSG)参数和线路阻抗参数很大程度影响着电压幅值和相位。VSG 一次调节不满足要求时，基于一致性算法的二次频率调节可使全网平均频率迅速恢复同

步。全网平均角频率 ω_{ave} 迭代公式如下:

$$\omega_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} \omega_j[k] \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

二次调节一般是通过比例积分器实现, 本文将各台逆变器补偿量的平均值作为各台逆变器的频率补偿量

$$\Delta\omega = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i (P_i - P_i^*) \quad (11)$$

式中: $\Delta\omega$ 、 $\Delta\omega_i$ 分别为角频率补偿量平均值和各逆变器补偿量平均值。式(8)简化为

$$\Delta\omega = m_1 P_1^* \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{i(p,u)} - 1 \right) \quad (12)$$

$P_{i(p,u)}$ 为各台逆变器实际有功功率的标么值。

4.2 有功功率分配控制

在一条馈线连接多个 VSG 的情况下, 有功、无功出力还会受到相邻 VSG 端电压的影响, 造成功率控制不精确, 进而无法实现对联络线功率的精确分配控制。因此, 本文提的基于一致性算法的分布式分层控制, 根据各分布式电源功率可调量实时进行功率分配, 使其健康平稳运行。具体分两步走:

(1) 总有功功率可调量估计。采用分布式一致性算法(式(6)), 以各 VSG 的功率可调量 $P_{i,adj}$ 为状态变量, 收敛得到的结果作为各有功可调量平均值 $P_{ave,adj}$, 所以总有功可调量为 $P_{total,adj} = nP_{ave,adj}$ 。

(2) 有功功率分配。定义 VSG 的响应比 $\alpha_{p,i} = \Delta P_i / P_{i,adj}$, 也就是第 i 台 VSG 对负荷变化的响应量与其有功可调量的比值。在负荷增加 P_d 后, 各分布式电源增加出力为 ΔP_i , 有 $P_d = \sum_{i=1}^n \Delta P_i$ 。因此, 控制的目标是响应比一致。

相应的控制率为

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_{p,i}(t) = u_i(t) \\ u_i(t) = \sum_{j=N_i} a_{ij} (\alpha_{p,j}(t) - \alpha_{p,i}(t)) \end{cases} \quad (13)$$

在最终各 VSG 响应比 $\alpha_{p,i}$ 达到一致后, $\alpha_{p,1} = \alpha_{p,2} = \dots = \alpha_{p,n}$, 各智能体就能计算出相应的有功响应量 $\Delta P_i = \alpha_{p,i} P_{i,adj}$ 。

5 仿真分析

为验证本文所提出的含多 VSG 并联微电

网的基于一致性算法的分布式分层控制算法的正确性与可靠性, 按照图 1 中的改进的 VSG 模型, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建 4 台 VSG 并联组网运行。

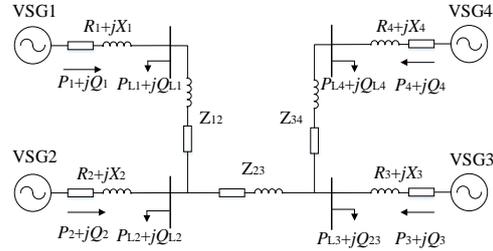


图 5 微电网仿真结构图

Fig.5 Simulation structure diagram of microgrid

VSG₁-VSG₄ 的额定有功功率为 $P_{N1} = P_{N2} = 20\text{kW}$ 、 $P_{N3} = P_{N4} = 10\text{kW}$, 额定无功功率为 $Q_{N1} = Q_{N2} = 10\text{kvar}$ 、 $Q_{N3} = Q_{N4} = 5\text{kvar}$, 线路阻抗参数为 $Z_{12} = 0.5 + j0.5\Omega$ 、 $Z_{23} = 0.5 + j0.8\Omega$ 、 $Z_{34} = 0.5 + j0.5\Omega$ 。为使逆变器功率输出成比例, P-f 下垂系数为 $1/D_{P1} = 1/D_{P2} = 5 \times 10^{-5}$ 、 $1/D_{P3} = 1/D_{P4} = 1 \times 10^{-4}$, Q-u 下垂系数为 $D_{P1} = D_{P2} = 5 \times 10^{-5}$ 、 $D_{P3} = D_{P4} = 1 \times 10^{-4}$ 。

为保证通信线路的可靠性与有效性, 本文采用环形双向通信网络, 邻接权重均为 1, 则由图论可知其邻接矩阵和拉普拉斯矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

假设智能体系统的初始状态为 $x(0) = [0.2 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8]^T$, 则计算可知网络的代数连通度为 2。系统的状态轨迹如图 6 所示, 容易看出, 由于拉普拉斯矩阵 L 是平衡的, 所以各状态量均能收敛到一致的值, 即平均值。

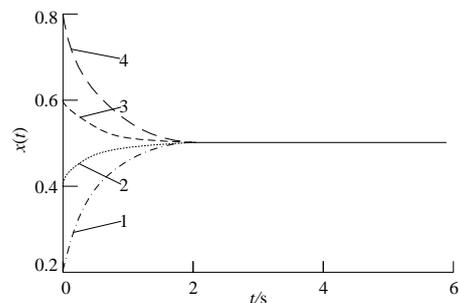


图 6 多智能体的状态轨迹

Fig.6 The state locus of a multi-agents system

在 VSG 逆变器容量和不等容量两种情形下, 分别仿真分析并联组网 PCC 处的电压、电流、频率及各逆变器有功功率的均分情况。

情形 1: 各 VSG 逆变器容量相等时。按照图 5 微电网结构, 搭建 4 台 VSG 并联微电网结构图。在此情形下, 假设各 VSG 额定有功容量为 10kW, 0s 时带 18 kW、0 kvar 的负载, 0.5s 时增加负载至 21 kW、0 kvar。其电压电流、频率及各逆变器有功功率的均分情况如图 7 所示。

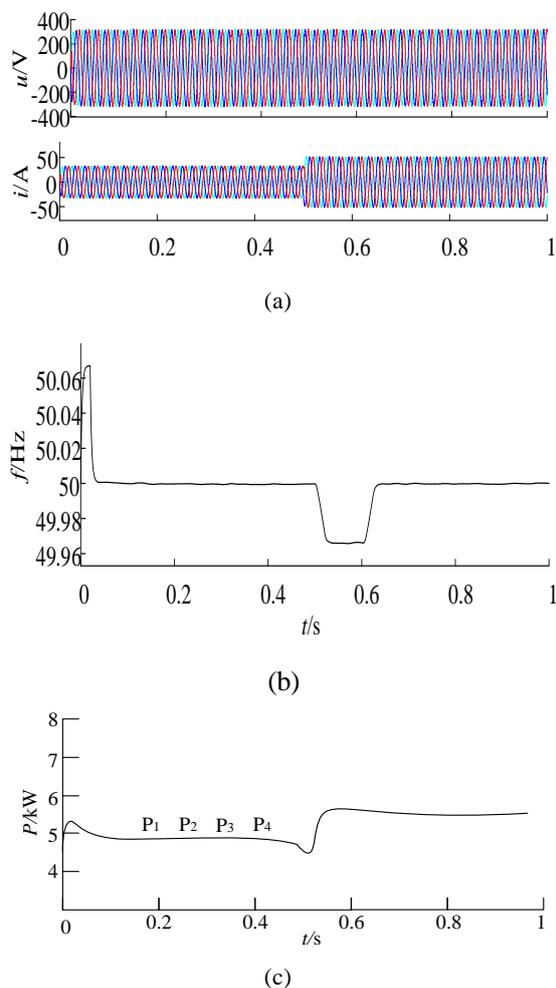


图 7 等容量仿真曲线

Fig.7 Simulation waveforms of equal capacity

由图 7 可知, 在此情形下, PCC 点处的电压频率开始时稳定, 0.5s 加载时有一个短暂的响应过程, 但仍保持稳定, 有功功率按照逆变器容量(1:1:1:1)出力分配, 这与预想的结果相符。

情形 2: 各 VSG 逆变器容量不等时。假设

4 台 VSG 容量不等(1:1:2:2), 其他条件同情形 1。在此情形下, 其电压电流、频率及各逆变器有功功率的均分情况如图 8 所示。

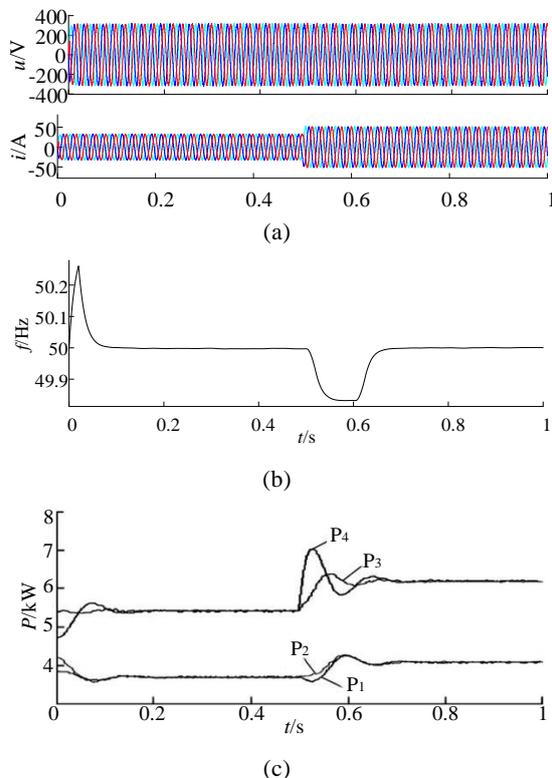


图 8 不等容量仿真曲线

Fig.8 Simulation waveforms of unequal capacity

由图 8 可知, 在此情形下, PCC 点处的电压频率开始时稳定, 0.5s 加载时有一个短暂的响应过程, 但仍保持稳定, 有功功率按照逆变器容量(1:1:2:2)出力分配, 这与预想的结果相符。

通过上述分析可知, 并联 VSG 组成的微电网不仅显示出了 VSG 优良的调节能力, 而且能够按比例合理的分配有功功率。由此可见, 所提控制策略满足控制要求, 有很重要的实际意义。

5 结语

针对孤岛模式下多 VSG 并联组网运行时微电网一次频率调整的偏差问题及有功功率分配问题, 本文提出了一种基于一致性算法的分布式分层的二次控制方案。该方案将利用分布式一致算法, 依靠少量的通信, 便可实现全局频率一致; 对有功功率进行估计, 通过比例积分器实现有功功率的合理分配。仿真结果表明,

所提二次调整方案能很好地实现多 VSG 并联孤岛运行时全网的频率一致, 并实现各 VSG 合理的功率分配。这样, 分布式电源便可不必上网而直接就地孤岛运行, 对风光等清洁能源的消纳有重要意义。本文仅对频率一致性和有功功率分配展开研究, 类似地, 后续将对二次调压和无功功率分配问题进一步展开研究。

参 考 文 献

- [1] Lasseter R H. Micro-grids and distributed generation [J]. Journal of Energy Engineering, 2007, 133(3):144-149.
- [2] Yang Xinfu, Su Jian, Lü Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE 2014, 34(1): 57-70.
- [3] Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.
- [4] Li R, Ma Z, Xu D. A ZVS grid-connected three-phase inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3595-3604.
- [5] Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Tang Shengqing, et al. (An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 1-12.
- [6] Enslin J H R, Heskes P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1586-1593.
- [7] He J, Li Y W, Bosnjak D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [8] Yong Chen, Hesse R, Turschner D, Beck, H-P. Improving the Grid Power Quality Using Virtual Synchronous Machines. Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on, 11-13 May 2011, Page(s): 1-6.
- [9] Tom Loix. Participation of inverter-connected distributed energy resources in grid voltage control. [D]. Leuven: Katholieke Universiteit, 2011.
- [10] Fang Gao, Iravani M R. A Control Strategy for a Distributed Generation Unit in Grid Connected and Autonomous Modes of Operation. Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. : 23, April 2008; Page(s): 850-859.
- [11] Zhong Qingchang, Weiss G. Static Synchronous Generators for Distributed Generation and Renewable Energy. Power Systems Conference and Exposition, 2009 PSCE'09 IEEE/PES, 15-18 March, 2009; Page(s): 1-6.
- [12] SUN Xiaofeng, HAO Yancong, ZHAO Wei, et al. Research of powersharing and voltage restoration without communication for island microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1):55-61.
- [13] Yang Xiangzhen, Su Jianhui, Ding Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168(in Chinese).
- [14] Zhao Rui, Zhang Lei, Xin Huanhai, et al. A decentralized self-optimizing control strategy for islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21):30-36(in Chinese).
- [15] WEI Yalong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Pre-synchronization method of virtual synchronous generator using virtual power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 124-129, 178.
- [16] Liang Ying, Sheng Wanxing. Secondary Frequency Regulation Strategies and Characteristic Analysis of Synchronverter-based Microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017 Vol. 37 (2): 391-402.
- [17] Zhang hui, Song Qiong, Wei Yalon. Frequency and Voltage Regulation Control Strategy of Micro-grid with Multiple Micro Sources Under Island Mode[J]. High Voltage Engineering, 2017 Vol. 43 (1): 157-163
- [18] Simpson-Porco J W, Shafiq Q, Dorfler F. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11):7025-7038.
- [19] Guo F, Wen C, Mao J. Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4355-4364.
- [20] Zhang Z, Ying Z, Chow M Y. Decentralizing the economic dispatch problem using a two-level incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment[C]//North American Power Symposium. Boston:North American Power Symposium, 2011:1-7.
- [21] Lü Zhenyu, Su Chen, et al. Distributed Secondary Control Strategy and Its Communication Topology Optimization for Islanded Microgrid[J]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2017, 32(06):209-219.

作者简介:

马喜平(1987年6月),男,甘肃平凉人,硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力系统。