

基于一致性的并联虚拟同步发电机分布式协同控制

陈来军^{1,2}, 王余阳², 郑天文^{2†}, 陈天一², 梅生伟^{1,2}

(1. 青海大学 新能源光伏产业研究中心青海省清洁能源高效利用重点实验室, 青海 西宁 810016;

2. 清华大学 电机系电力系统及发电设备控制和国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)可模拟同步发电机运行机制, 并为系统提供惯性和阻尼支撑. 在孤岛模式下, VSG并联运行多采用分散下垂控制, 不具备频率恢复以及有功出力合理分配等功能, 为此, 本文提出了一种基于一致性的并联VSG分布式控制方法, 可改善系统频率与有功功率特性. 本文首先介绍了传统VSG控制的数学模型, 并在此基础上设计了VSG并联系统频率恢复及有功出力合理分配的整体方案. 在分布式控制模式下, 相邻VSG只需少量信息交互即可控制频率恢复到额定值, 并可实现功率的按需分配, 满足了不同用户的定制需求. 仿真结果验证了所提方法的正确性和有效性.

关键词: 虚拟同步发电机; 一致性算法; 频率恢复; 有功出力分配

中图分类号: TM464

文献标识码: A

Consensus-based distributed control for parallel-connected virtual synchronous generator

CHEN Lai-jun^{1,2}, WANG Yu-yang², ZHENG Tian-wen^{2†}, CHEN Tian-yi², MEI Sheng-wei^{1,2}

(1. Qinghai Key Lab of Efficient Utilization of Clean Energy, New Energy (Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining Qinghai 810016, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) can mimic the operating mechanism of the synchronous generator, which can provide inertia and damping support for system. In islanded mode, parallel-connected VSGs mainly use decentralized droop control and the system is not able to restore frequency or reasonably share active power. To solve these problems, a distributed control strategy of parallel-connected VSGs based on consensus algorithm is proposed. The control strategy can improve the frequency and active power characteristics of the system. The mathematic model of traditional VSG control is firstly demonstrated. Based on that, the whole control scheme of frequency restoration and active power sharing for parallel-connected VSGs is established. With distributed control strategy, the scheme utilizes distributed communication network exchanging few information between neighbor VSGs to make the system restore frequency to nominal value and reasonably share active power to satisfy different demand. Simulation results verify the validity and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: virtual synchronous generator; consensus algorithm; frequency restoration; active power sharing

1 引言(Introduction)

随着新能源发电规模不断增大, 以逆变器为主要接口的分布式电源得到了越来越广泛的应用^[1-2]. 逆变器属于静止设备, 几乎没有转动惯量, 难以为供电系统提供必要的惯性和阻尼支撑^[3]. 随着分布式电源并联接入的渗透率不断提高, 供电系统的安全稳定运行也将会受到越来越严重的威胁^[4].

近年来, 有学者提出基于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的逆变器控制策略^[5]. VSG的基本思想是通过模拟传统同步发电机的基本原理与运行机制, 为系统提供虚拟惯性和阻尼, 以提高其运行性能. 正因如此, VSG愈来愈广泛地应用于微电网或主动配电网^[6-7].

在实际运用中, 为满足供电系统大功率化或高可

收稿日期: 2016-01-15; 录用日期: 2016-08-10.

†通信作者. E-mail: tianwenscu@163.com; Tel.: +86 13621269596.

本文责任编辑: 杨苹.

国家自然科学基金地区基金项目(51567021), 清华大学自主科研计划(20151080416), 青海省基础科学研究项目(应用基础资助研究), 中国博士后科学基金资助.

Supported by Area Foundation of National Natural Science Foundation of China (51567021), Tsinghua University Initiative Scientific Research Program (20151080416), Basic research project of Qinghai province (Applied Basic Research) and Project funded by China Postdoctoral Science Foundation (2016M601025).

靠性的要求, VSG并联运行十分必要^[8]. 然而, 与功率源型并网逆变器不同, VSG等效为电压源, 其并联稳态运行时将存在通信互联、频率恢复、功率分配等相关问题^[9-11]. 文献[12-14]建立了VSG数学模型, 并设计了基于分散下垂控制策略的功率控制方法, 其可保证VSG按照下垂系数自主分配功率, 但负荷出现变化后, 由于只有本地测量信息, 系统频率难以恢复: 文献[15-16]在分散一次调频控制器基础上, 设计了基于集中式二次调频的控制结构, 可保证系统频率恢复, 但新增大量通信线路, 成本较高、可靠性较差. 为此, 可同时实现频率恢复、功率分配以及仅需较少通信的并联VSG控制策略亟需研究.

与点对多点的集中式通信网络相比, 点对点的分布式通信网络更加适合大量分布式发电单元并联运行^[17-18].

分布式控制策略通过相邻单元的少量信息交互即可实现系统稳定可靠运行, 从而减少通信基站的建设, 节约成本, 弥补了分散式与集中式的不足^[19-21]. 为此, 将分布式控制应用于并联VSG系统有望解决前述问题.

本文在现有研究基础上, 提出一种基于一致性的并联VSG分布式控制策略, 旨在实现系统频率恢复与功率灵活分配. 在传统VSG的基本控制模型及并联VSG分布式架构基础之上, 提出了并联VSG系统的控制目标: 基于此阐述了并联VSG的一致性控制方法, 包括其整体思路及关键单元设计. 之后分析了该控制策略的有效性, 并通过仿真验证了所提方案的正确性.

2 基本原理描述(Fundamental theory discussion)

2.1 VSG 拓扑及控制 (The topology and control of VSG)

VSG一般由三相全桥逆变电路及LCL滤波器构成, 其典型拓扑连接如图1所示.

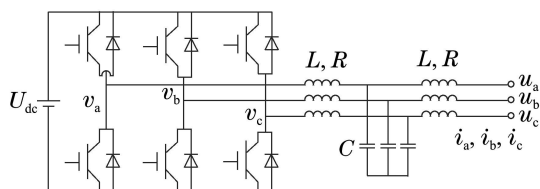


图1 VSG拓扑图

Fig. 1 Topology of VSG

图1中: L, C, R 分别为LCL滤波器的电感、电容、电阻; U_{dc} 为直流侧电压; $v = (v_a, v_b, v_c)^T$ 为逆变器的输出电压, $i_0 = (i_a, i_b, i_c)^T$ 为逆变器输出的三相电流, $u_0 = (u_a, u_b, u_c)^T$ 是输出三相电压.

VSG采用的有功-频率控制策略如式(1)所示:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega - \omega_b, \\ J\omega_b\dot{\omega} + D\dot{\theta} = P^* - P, \end{cases} \quad (1)$$

式中: P^* 为额定容量, P 为有功输出的实际值; J 为虚拟转动惯量, 可使VSG在频率和功率的动态过程中具有惯性; D 表示阻尼系数, 可使VSG具有阻尼震荡的能力, 同时也可表征有功-频率的一次下垂特性; θ 是角频率与额定角频率之差; ω_b 为设定的额定角频率; ω 为量测的角频率; θ 表示相角.

由上式可知, 当系统达到稳态时 $\dot{\omega} = 0$, 系统频率由额定容量与有功输出的差值决定. 若实际有功出力大于VSG的额定容量, 系统实际频率将低于额定值, 反之亦然.

VSG模拟同步发电机的有功-频率控制框图如图2所示.

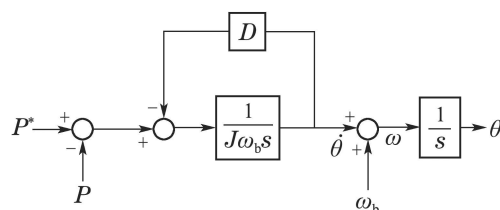


图2 VSG有功-频率控制框图

Fig. 2 Configuration of VSG active power-frequency control

因此, 通过有功-频率控制, 可使逆变器模拟同步发电机的运行特性, 从而为供电系统提供惯性和阻尼支撑. 然而, 基于上述VSG控制策略, 在负荷变化后系统频率存在有差特性, 将影响系统正常运行, 为此需引入频率恢复机制.

2.2 并联VSG分布式架构(The distributed framework of parallel-connected VSGs)

多台VSG并联可灵活地扩大供电系统容量且可提高运行的稳定性, 其网络连接如图3所示.

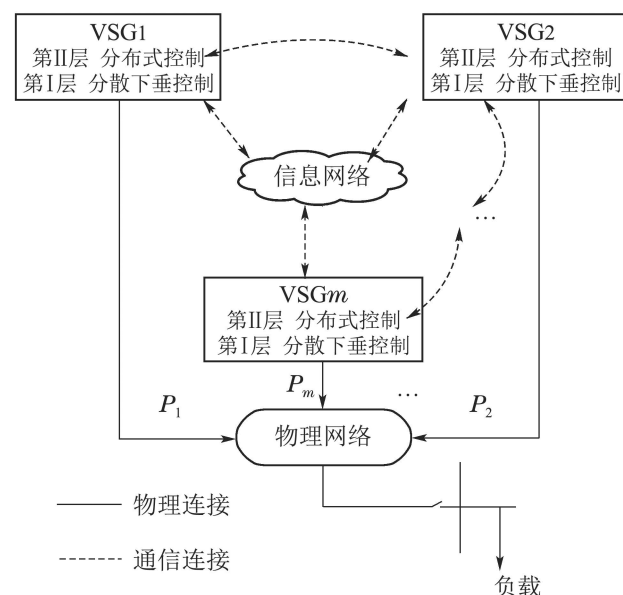


图3 并联VSG信息物理连接图

Fig. 3 Parallel-connected VSG cyber physical system

由图3可见, 并联VSG控制主要包括两层: 第I层采用分散控制, 依靠本地信息实现有功-频率的下垂调节; 第II层采用分布式控制, 通过相邻VSG的信息交互, 以恢复系统频率并合理分配有功。

图中, 信息物理融合系统包含了相邻VSG之间的通信连接及信息交互以及各VSG物理上的并联, 并且共同为负载供电, 此处功率 $P_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 即依据图1中输出电压 $u_0 = (u_a, u_b, u_c)^T$ 、电流 $i_0 = (i_a, i_b, i_c)^T$ 计算所得, 随负载的改变而做出相应调节, 且第 i 台VSG的输出功率 P_i 亦会传递给通信拓扑上与之相连的VSG, 影响相连分支。

因此, 前述分层分布式运行架构只需较少通信即可实现调节需求, 能大大降低系统的通信配置。

3 并联VSG分布式协同控制设计(Distributed cooperation control design of parallel-connected VSGs)

3.1 控制目标(Control objection)

在实际运行中, 并联VSG应能够维持系统频率在额定值附近, 同时应具备按不同需求分配有功出力的

功能。为此, 需实现如下两大目标:

- 1) 系统达到稳态时, 其频率恢复到额定值, 即

$$f = f_0, \quad (2)$$

式中: f 为实测频率, f_0 为额定频率。

- 2) 保证各VSG合理的有功出力分配, 即

$$f(P_1) = f(P_2) = \dots = f(P_m), \quad (3)$$

式中: P_i 为第 i 台VSG的输出有功功率, 此处下标 i 为VSG编号, 其取值为 $i = 1, 2, \dots, m$, 下同; $f(P_i)$ 为设定的目标函数, 可在不同工况下用以满足系统出力分配的公平性、经济性等需求^[10-11]。

3.2 设计思路(Design thought)

并联VSG分布式控制主要包括下垂控制单元, 频率恢复单元, 有功分配单元以及一致性控制单元, 如图4所示。

下垂控制单元及频率恢复单元用以实现频率调节。频率恢复单元在下垂控制基础上加入积分反馈环节, 为下垂控制单元提供下垂曲线偏差平移量信号, 以消除有功-频率下垂特性引起的频率偏差。

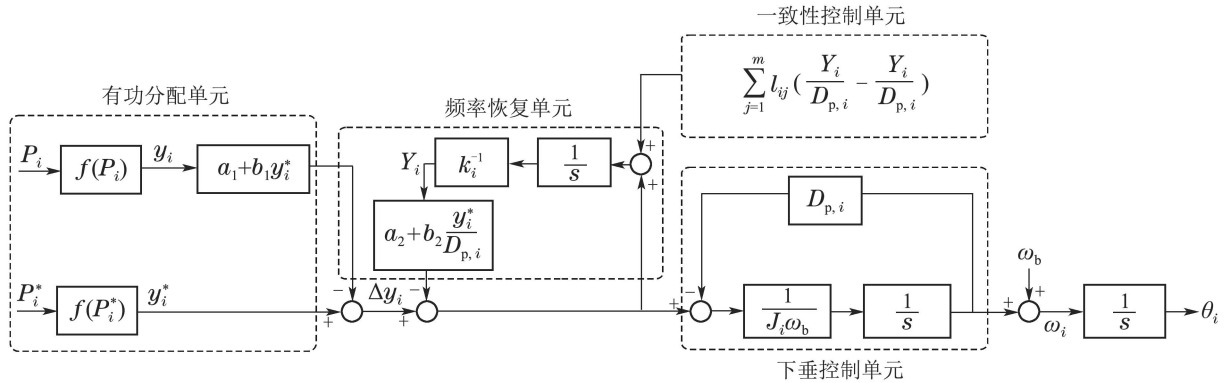


图4 并联VSG一致性控制框图

Fig. 4 Configuration of parallel-connected VSG consensus control

有功分配单元根据系统实际运行的不同需求确定目标函数, 据此进行有功出力的灵活分配。此外, 为使各VSG出力达成一致, 即目标函数相等, 需采用一致性控制单元。

一致性控制单元将一致性算法应用到并联VSG系统的控制中, 能够解决由于引入频率恢复机制带来的系统收敛性问题, 使系统准确、可靠分配出力, 且通信相连的设备间的相互影响亦是通过对一致性控制单元实现的。

3.3 关键单元设计(Key unit design)

3.3.1 有功分配单元(Active power sharing unit)

在有功分配单元中, P_i 可由第 i 台VSG的输出电压电流计算得到, 且会随负载改变而进行相应调节;

P_i^* 为第 i 台VSG的额定功率; $y_i = f(P_i)$, $y_i^* = f(P_i^*)$; a_1, b_1, a_2, b_2 分别为选择系数, 其取值由出力分配目标函数决定; 输出 $\Delta y_i = y_i^* - (a_1 + b_1 y_i^*) y_i$ 为参考输入与实际输入的差值。 $f(P_i), f(P_i^*)$ 为定义的目标函数, 一般为一次函数, 其选取方法较多, 可根据具体的需求确定。以出力公平性和经济性这两种典型的功率分配需求为例, 阐述如下。

- a) 若系统按额定容量分配有功出力, 则各VSG出力需满足

$$\frac{P_1}{P_1^*} = \frac{P_2}{P_2^*} = \dots = \frac{P_m}{P_m^*}, \quad (4)$$

则目标函数选取为 $f(P_i) = P_i^{*-1} P_i$ 。选择系数取值为 $a_1 = a_2 = 1, b_1 = b_2 = 0$ 。且需满足

$$\frac{D_{p,1}}{P_1^*} = \frac{D_{p,2}}{P_2^*} = \dots = \frac{D_{p,m}}{P_m^*}, \quad (5)$$

式中: $D_{p,i}$ 表示第 i 台 VSG 的阻尼系数. 该出力分配方法可实现系统出力的合理统一配置, 以满足各发电商出力公平的需求.

b) 若系统按等微增率的原则分配有功出力, 即各 VSG 出力需满足

$$\lambda_1(P_1) = \lambda_2(P_2) = \dots = \lambda_m(P_m), \quad (6)$$

则目标函数选取为 $f(P_i) = \lambda_i(P_i)$, 式中: $\lambda_i(P_i)$ 为第 i 台 VSG 的微增率函数, 选择系数为 $a_1 = a_2 = 0$, $b_1 = b_2 = 1$. 由于 VSG 多用于可再生能源并网, 且可再生能源利用率越高, 综合成本越低^[22], 故其发电成本函数做归一化处理后可为

$$C = k_c \frac{(P - P_{\max})^2}{P_{\max}^2}, \quad (7)$$

式中: C 为综合成本, k_c 为成本系数, P 为有功出力, $P_{\max}$ 表示最大出力, 所以该成本函数为二次形式. 微增率是发电成本对出力的导数, 故其可表示为

$$\lambda_i(P_i) = \alpha_i P_i - \beta_i, \quad (8)$$

式中 α_i , β_i 为与第 i 台 VSG 成本函数相关的系数. 按等微增率原则分配出力可充分考虑分布式电源的建设维护运行成本, 进行系统优化配置, 实现经济高效运行.

若系统需按其他机制分配出力, 仅需在该单元中改变目标函数并选择对应参数, 使系统有功分配更具灵活性、简便性.

3.3.2 频率恢复单元(Frequency restoration unit)

频率恢复单元是在下垂控制单元的基础上设计的, 其控制方程为

$$J_i \omega_b \dot{\omega}_i + D_{p,i}(\omega_i - \omega_b) = \Delta y_i - k_{y,i} Y_i, \quad (9)$$

式中: J_i 为第 i 台 VSG 的虚拟转动惯量; ω_i 表示第 i 台 VSG 量测的角频率; ω_b 为设定的额定角频率; $k_{y,i} = a_2 + b_2 y_i^* D_{p,i}^{-1}$; Y_i 为第 i 台 VSG 的下垂特性曲线平移量.

当负载发生波动, 频率恢复单元可调节系统频率, 使之恢复至额定值. 以单台 VSG 频率恢复为例, 其调节过程如图5所示.

图5中: f_a 为设定频率, P_a 为设定有功. VSG 初始运行点为 A . 当负载增加, 且 VSG 仅有分散下垂控制时, 运行点由 A 移至 B , 此时实际输出有功 P_b 与 P_a 存在偏差, 其频率降为 f_b . 若保证输出有功不变, 为实现频率恢复, 则需将下垂曲线向上平移; 分布式控制的重要优势是仅需相邻 VSG 交换其有功偏差信息, 即可确定下垂曲线平移量, 通过修改有功设

定值使下垂曲线由 l_1 向上平移至 l_2 , 运行点变为 C , 频率恢复到 f_a .

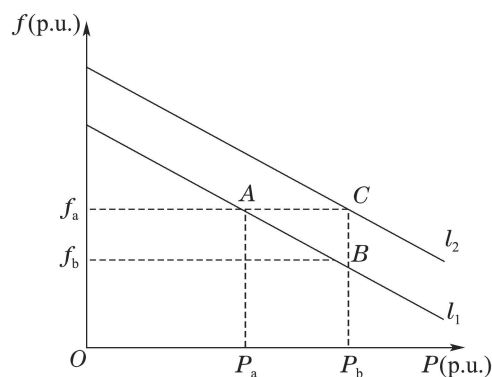


图5 频率恢复控制图

Fig. 5 Frequency restoration control

3.3.3 一致性控制单元(Consensus control unit)

平均一致性算法的一般表达式为

$$\dot{x}_i = c \sum_{j=1}^n l_{ij}(x_i - x_j), \quad (10)$$

式中: x_i 为系统中的状态变量, c 为扩散系数, l_{ij} 为拉普拉斯矩阵 L 中的元素, 表征各 VSG 之间的连接关系.

对于无向图, 当系统通信拓扑满足生成树要求时, 其中生成树的含义是从任意节点出发可以到达其他所有节点, 若时间趋于无穷, 则各状态变量 x_i 一致收敛到它们的平均值^[23], 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} x_2(t) = \dots = \text{avg}(x), \quad (11)$$

式中 $\text{avg}(x)$ 为状态变量 x_i 的平均值.

为实现式(2)与式(3)的控制目标, 可将一致性控制单元设计为

$$k_i \dot{Y}_i = \Delta y_i - k_{y,i} Y_i + \sum_{j=1}^m l_{ij} \left(\frac{Y_i}{D_{p,i}} - \frac{Y_j}{D_{p,j}} \right), \quad (12)$$

式中: k_i 为第 i 台 VSG 的频率恢复系数; Y_i , Y_j 为第 i 台, 第 j 台 VSG 的下垂特性曲线平移量; $D_{p,i}$, $D_{p,j}$ 为第 i 台, 第 j 台 VSG 的下垂系数.

4 控制策略分析(Control strategy analysis)

下面分析按图4的控制策略可实现式(2)–(3)的控制目标.

4.1 频率恢复分析(Frequency restoration analysis)

式(12)中, 由于 Y_i 为平移量, 是一个数值, 因此, 当系统达到稳态时, 其导数为0, 可得

$$\Delta y_i - k_{y,i} Y_i + \sum_{j=1}^m l_{ij} \left(\frac{Y_i}{D_{p,i}} - \frac{Y_j}{D_{p,j}} \right) = 0, \quad (13)$$

式中 $l_{ij} (i \neq j) \leq 0$ 为拉普拉斯矩阵 L 中的元素, 拉普拉斯矩阵 L 可表示为

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} l_{11} & \cdots & l_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{m1} & \cdots & l_{mm} \end{pmatrix}_{m \times m}. \quad (14)$$

当系统的通信拓扑采用无向图模型,且满足生成树条件时,矩阵 $\mathbf{L}$ 为对称矩阵,且每一行的元素相加为0^[23],即满足

$$l_{i1} + l_{i2} + \cdots + l_{im} = 0. \quad (15)$$

式(13)提取 $D_{p,i}k_{y,i}$,可变换为

$$-D_{p,i}k_{y,i}\left(\frac{Y_i}{D_{p,i}} - \frac{\Delta y_i}{D_{p,i}k_{y,i}}\right) + \sum_{j=1}^m l_{ij}\left(\frac{Y_i}{D_{p,i}} - \frac{Y_j}{D_{p,j}}\right) = 0. \quad (16)$$

令 $g_i = D_{p,i}k_{y,i}(g_i > 0)$,可得

$$-g_i\left(\frac{Y_i}{D_{p,i}} - \frac{\Delta y_i}{D_{p,i}k_{y,i}}\right) + \sum_{j=1}^m l_{ij}\left(\frac{Y_i}{D_{p,i}} - \frac{Y_j}{D_{p,j}}\right) = 0. \quad (17)$$

由于 $i = 1, 2, \dots, m$,式(17)可写成矩阵形式:

$$-\begin{pmatrix} g_1 & & \\ & \ddots & \\ & & g_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{Y_1}{D_{p,1}} - \frac{\Delta y_1}{D_{p,1}k_{y,1}} \\ \vdots \\ \frac{Y_m}{D_{p,m}} - \frac{\Delta y_m}{D_{p,m}k_{y,m}} \end{pmatrix} - \mathbf{L} \begin{pmatrix} \frac{Y_1}{D_{p,1}} - \frac{\Delta y_1}{D_{p,1}k_{y,1}} \\ \vdots \\ \frac{Y_m}{D_{p,m}} - \frac{\Delta y_m}{D_{p,m}k_{y,m}} \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (18)$$

令 $\mathbf{G} = \text{diag}\{g_i\}$,则式(18)可表示为

$$-(\mathbf{G} + \mathbf{L}) \begin{pmatrix} \frac{Y_1}{D_{p,1}} - \frac{\Delta y_1}{D_{p,1}k_{y,1}} \\ \vdots \\ \frac{Y_m}{D_{p,m}} - \frac{\Delta y_m}{D_{p,m}k_{y,m}} \end{pmatrix} - \mathbf{L} \begin{pmatrix} \frac{\Delta y_1}{D_{p,1}k_{y,1}} \\ \vdots \\ \frac{\Delta y_m}{D_{p,m}k_{y,m}} \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (19)$$

由于各VSG连在同一母线上,它们的频率都相等, $\Delta y_i(D_{p,i}k_{y,i})^{-1}$ 与VSG频率的变化量成正比,且各VSG的比例系数相等,则 $\Delta y_i(D_{p,i}k_{y,i})^{-1}$ 也是相等的.由式(15)可得

$$\mathbf{L} \begin{pmatrix} \frac{\Delta y_1}{D_{p,1}k_{y,1}} \\ \vdots \\ \frac{\Delta y_m}{D_{p,m}k_{y,m}} \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得

$$-(\mathbf{G} + \mathbf{L}) \begin{pmatrix} \frac{Y_1}{D_{p,1}} - \frac{\Delta y_1}{D_{p,1}k_{y,1}} \\ \vdots \\ \frac{Y_m}{D_{p,m}} - \frac{\Delta y_m}{D_{p,m}k_{y,m}} \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (21)$$

由文献[24]可知:使得在通信拓扑中包含生成树且至少有一个节点有参考值,即 $g_i \neq 0$,则有矩阵 $\mathbf{L} + \mathbf{G}$ 为非奇异的矩阵.由于本文采用无向图模型,且 $g_i(i = 1, 2, \dots, m)$ 均大于0,当没有孤立节点时即有 $\mathbf{L} + \mathbf{G}$ 是非奇异矩阵.此时式(21)左右两边同乘 $(\mathbf{L} + \mathbf{G})^{-1}$ 可得

$$\frac{Y_i}{D_{p,i}} = \frac{\Delta y_i}{D_{p,i}k_{y,i}}. \quad (22)$$

式(22)左右两边同乘 $D_{p,i}$ 可得

$$\Delta y_i = k_{y,i}Y_i. \quad (23)$$

将式(23)代入式(9),可得

$$J_i\omega_b\dot{\omega}_i + D_{p,i}(\omega_i - \omega_b) = 0. \quad (24)$$

稳态时, $\dot{\omega}_i$ 为0,则 $\omega_i = \omega_b$,即系统频率能够恢复到额定值.

4.2 出力分配分析(Power sharing analysis)

在频率能够恢复额定值的同时,根据式(12)及式(23)可得

$$\frac{Y_i}{D_{p,i}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{Y_j}{D_{p,j}}. \quad (25)$$

将式(25)代入式(23),可得

$$\frac{(a_1 + b_1 y_i^*)y_i}{y_i^*} = 1 - \frac{D_{p,i}(a_2 + b_2 \frac{y_i^*}{D_{p,i}}) \sum_{j=1}^m \frac{Y_j}{D_{p,j}}}{m y_i^*}. \quad (26)$$

当目标函数为 $f(P_i) = P_i^{*-1}P_i$,系数设定为 $a_1 = a_2 = 1; b_1 = b_2 = 0$,将目标函数及系数代入式(26)可得

$$\frac{P_i}{P_i^*} = 1 - \frac{D_{p,i} \sum_{j=1}^m \frac{Y_j}{D_{p,j}}}{m P_i^*}. \quad (27)$$

设计系统参数使 $P_i^{*-1}D_{p,i}(i = 1, 2, \dots, m)$ 相等时,各VSG按额定容量比例进行功率分配.当目标函数为 $f(P_i) = \lambda_i(P_i)$,系数设定为 $a_1 = a_2 = 0; b_1 =$

$b_2 = 1$ 时, 将目标函数及系数代入式(26)可得

$$\lambda_i(P_i) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \frac{Y_j}{D_{p,j}}}{m}. \quad (28)$$

此时各VSG微增率均相等, 即各VSG按等微增率的原则进行功率分配。

综上所述, 采用图4提出的控制策略能够实现并联VSG系统频率恢复及有功出力的灵活分配。

5 仿真分析(Simulation analysis)

5.1 仿真工况(Simulation conditions)

在MATLAB/Simulink软件环境下对上述控制策略进行测试。仿真采用3台VSG并联, 其拓扑连接如图3所示, 其中: VSG1与VSG2通信相连, VSG2与VSG3通信相连, VSG1与VSG3无直接通信。3台VSG频率恢复系数 k 均为1 s, 转动惯量 J 均为 $1.061 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。仿真主要参数如表1所示。

表1 仿真主要参数

Table 1 Main parameters of simulation

VSG编号 <i>i</i>	容量 P^*/kW	阻尼系数 $D_p/$ $(\text{kW}\cdot(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}))^{-1}$
1	10	5
2	5	2.5
3	20	10

仿真时长设定为2.5 s, 在3台VSG并联运行模式下, 0 s时负载为35 kW, 在0.6 s增加负载35 kW。下文将分别给出并联VSG按容量分配有功出力及按等微增率原则分配有功出力的仿真结果。

5.2 仿真结果(Simulation results)

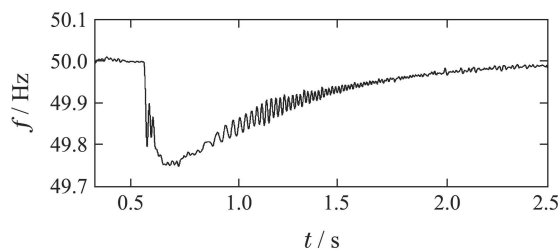
5.2.1 按容量分配有功出力(Active power sharing by rated capacity)

图6给出了采用传统控制算法及采用一致性控制算法时, 按容量分配有功出力的系统频率恢复波形。图7给出了采用传统控制算法及采用一致性控制算法时, 各VSG有功出力分配波形。

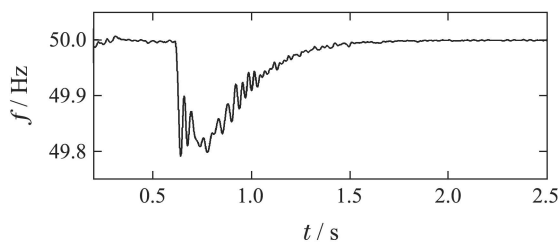
由图6可见, 两种控制策略下, 系统频率恢复的过程类似。由于负载增加, 频率在0.6 s时开始产生偏差, 恢复过程中由于频率不能突变, 且相对于有功变化有一定滞后, 因此频率恢复过程中略有振荡。采用传统控制策略, 系统频率经过约2 s达到稳定; 采用一致性控制策略, 系统频率经过大约1.5 s达到稳定, 稳定后系统的实际量测频率与额定频率的最大偏差小于0.05 Hz, 频率得以恢复, 且比较两种控制策略可见, 采用一致性控制策略时, 系统频率恢复速度较快。

若采用传统控制策略, 即在控制中未采用一致性控制单元, 各VSG存在抢功率的可能, 所以各VSG

输出有功无法按照设定的比例去分配。图7(a)中, 当达到稳态时, 3台VSG输出有功分别为22 kW, 13 kW, 35 kW, 没有能够按照设定的比例进行分配。



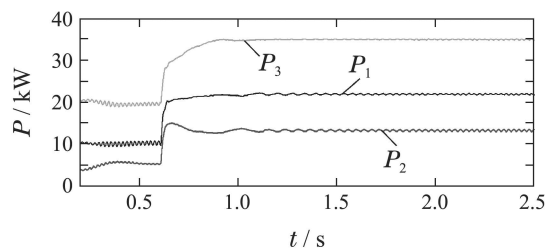
(a) 传统控制策略



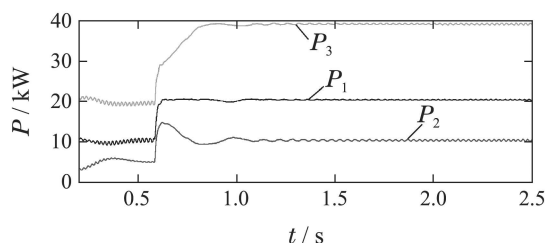
(b) 一致性控制策略

图6 系统频率恢复波形

Fig. 6 Waveform of frequency restoration



(a) 传统控制策略



(b) 一致性控制策略

图7 VSG有功出力分配波形

Fig. 7 Waveform of VSG active power sharing

与图7(a)相比, 图7(b)中, 负载增加前, 3台VSG有功出力分别为10 kW, 5 kW, 20 kW, 比值为2:1:4。0.6 s时由于负载增加一倍, 各VSG有功出力增加, 系统在2 s附近达到稳定。稳定时, 3台VSG的有功出力分别为20 kW, 10 kW, 40 kW, 其比值仍为2:1:4。由此可见, 无论在负载增加之前还是负载增加之后, 3台VSG都能够按照其容量的比2:1:4进行分配。验证了所提基于一致性的有功出力按容量分配方案的有效性、优越性。

5.2.2 按等微增率原则分配有功出力(Active power sharing by equal incremental cost)

为验证各VSG按等微增率原则分配有功出力,3台VSG设定不同的微增率函数,式(8)中参数 α , β 取值如表2所示。

表2 微增率函数主要参数

Table 2 Main parameters of incremental cost

VSG编号 <i>i</i>	一次项系数 α	常数项 β
1	0.000012	0.03
2	0.000014	0.03
3	0.000008	0.02

图8和图9以及图10分别给出了按等微增率原则分配有功出力的系统频率恢复波形,有功输出波形及VSG微增率波形。

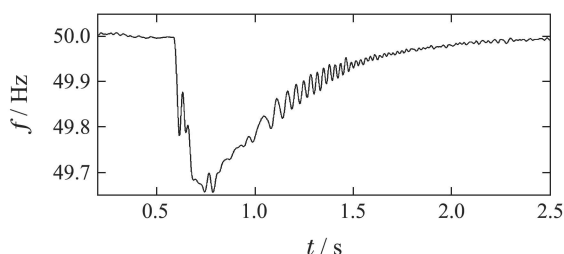


图6 系统频率恢复波形

Fig. 6 Waveform of frequency restoration

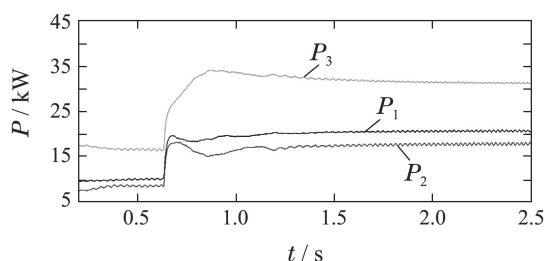


图7 VSG有功出力分配波形

Fig. 7 Waveform of VSG active power sharing

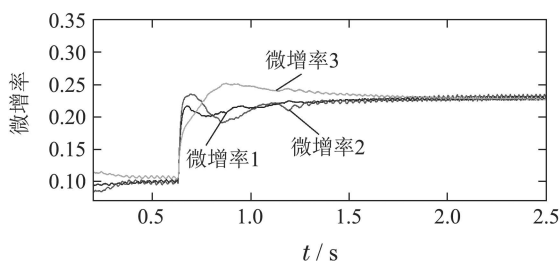


图8 VSG 微增率波形

Fig. 8 Waveform of incremental cost

图8中,系统频率在2s附近恢复至额定值。频率恢复过程与图6类似,在0.6s处由于负载增加一倍,频率下跌,在频率恢复过程中略有波动,最终稳态时频率恢复至50 Hz。

由图9可知,当达到稳态时,各VSG输出功率分别为21 kW, 18 kW, 30 kW。将 P_1 , P_2 , P_3 分别代入微增率计算公式可计算出其微增率分别为0.21, 0.222, 0.22, 均在0.22左右。图10中,在0.6s投入大负载后,系统大约在1.9s达到稳定,稳态时各VSG微增率均在0.218左右,可见仿真结果与理论计算相符,验证了所提各VSG可按等微增率原则进行有功出力分配方案的正确性。

6 结论(Conclusions)

本文针对VSG并联运行模式下通信复杂的问题,结合频率恢复及有功分配等需求,提出了基于一致性的并联VSG分布式协同控制策略,采用点对点的分布式控制方法,使系统以较低的代价进行通信;设计了频率恢复及出力分配控制方案并对其有效性进行了分析。仿真结果表明,分布式协同控制可很好地实现系统频率恢复及出力合理分配,满足稳定性、经济性等需求。所提方法可为VSG应用于微电网和主动配电网提供有益借鉴。

参考文献(References):

- [1] 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.
(曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1 – 12.)
- [2] MEI S W, CHEN L J. Recent advances on smart grid technology and renewable energy integration [J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2013, 56(12): 3040 – 3048.
- [3] WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of control methods for grid-connected inverters of distributed generation [J]. *Proceedings of the CSU-EPSS*, 2012, 24(2): 12 – 20.
(王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12 – 20.)
- [4] ENSLIN J H R, HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network [J]. *Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(6): 1586 – 1593.
- [5] ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of synchronous generator technologies [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(21): 165 – 175.
(郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165 – 175.)
- [6] YANG X Z, SU J H, DING M, et al. Control strategy for virtual synchronous generator in microgrid [C] // *Proceedings of the 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. Weihai, Shandong, China: IEEE, 2011: 1633 – 1637.
- [7] HU C, LIU F, XU H Z, et al. Virtual impedance design of virtual synchronous generation in microgrid [C] // *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*. Shanghai, China: IEEE, 2014: 200 – 204.
- [8] DUAN Shanxu, LIN Xinchun. *Parallel Operation Control Technology for Distributed Modular Inverters* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
(段善旭, 林新春. 分布式逆变电源的模块化及并联技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.)

- [9] XIN H, LU Z, QU Z. Cooperative control strategy for multiple photovoltaic generators in distribution networks [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2011, 14(5): 1617 – 1629.
- [10] ZHAO Rui, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai. A decentralized self-optimizing control strategy for islanded microgrid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(21): 30 – 36.
(赵睿, 章雷其, 辛焕海. 微网孤岛运行的分散自趋优控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 30 – 36.)
- [11] AUGUSTINE N, SURESH S, MOGHE P. Economic dispatch for a microgrid considering renewable energy cost functions [C] // *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*. Washington, DC, USA: IEEE, 2012: 1 – 7.
- [12] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259 – 1267.
- [13] DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(8): 89 – 93.
(丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变器控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89 – 93.)
- [14] CHENG C, ZENG Z, YANG H, et al. Wireless parallel control of three-phase inverters based on virtual synchronous generator theory [C] // *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Busan: IEEE, 2013: 162 – 166.
- [15] 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.
(杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略 [J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164 – 168.)
- [16] XIN H H, LU Z H, LIU Y, et al. A center-free control strategy for the coordination of multiple photovoltaic generators [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 3(5): 1262 – 1269.
- [17] XIN H H, ZHANG M D, SEUSS J, et al. A real-time power allocation algorithm and its communication optimization for geographically dispersed energy storage systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 4(28): 4732 – 4741.
- [18] LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. An adaptive droop control for the islanded DC microgrid based on discrete consensus algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17): 4397 – 4407.
(吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4397 – 4407.)
- [19] LU L Y, CHU C C. Consensus-based secondary frequency and voltage droop control of virtual synchronous generators for isolated AC micro-grids [J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2015, 5(3): 443 – 455.
- [20] LU L Y, CHU C C. Consensus-based P - f / Q - V droop control in autonomous micro-grids with wind generators and energy storage systems [C] // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. National Harbor, MD: IEEE, 2014: 1 – 5.
- [21] XIN H H, QU Z H, CHEN L, et al. A distributed control for multiple photovoltaic generators in distribution networks [C] // *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA: IEEE, 2011: 1063 – 1068.
- [22] NUTKANI I U, LOH P C, BLAABJERG F. Droop scheme with consideration of operating costs [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(3): 1047 – 1052.
- [23] WEI R, RANDAL W. Beard. *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control* [M]. London: Theory and Applications Springer, 2008.
- [24] QU Z H, WANG J, HULL R A. Cooperative control of dynamical systems with application to autonomous vehicles [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(4): 894 – 911.

作者简介:

陈来军 (1984–), 男, 副教授, 目前研究方向为新能源发电与储能技术, E-mail: chenlaijun@tsinghua.edu.cn;

王余阳 (1993–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为分布式发电运行控制, E-mail: yy-wang12@mails.tsinghua.edu.cn;

郑天文 (1987–), 男, 博士, 目前研究方向为新能源系统控制与优化运行, E-mail: tianwenscu@163.com;

陈天一 (1992–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为新能源发电与并网技术, E-mail: chwangch@sina.com;

梅生伟 (1964–), 男, 教授, 目前研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: meishengwei@tsinghua.edu.cn.