

DOI: 10.7667/PSPC180292

# 独立微网中多虚拟同步机功率精确分配控制策略

袁健, 杨伟

(南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 独立微网中, 逆变器采用虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制模拟同步发电机运行机制, 为微网提供惯性和阻尼, 改善系统电压频率稳定性。但传统 VSG 并联系统不具备无功出力合理分配以及直流抑制的能力。首先, 从 VSG 基本原理入手, 分析了 VSG 功率均分机理。其次, 为构造积分器, 从电压补偿角度提出了一种改进的无功控制方法, 实现了无功分配与线路阻抗解耦。在直流抑制方面, 利用准谐振控制器重新设计了底层双环控制。同时研究了参数匹配方法, 保证 VSG 功率均分。最后通过 Matlab 仿真验证了所提策略的正确性和有效性。

**关键词:** 微电网; 虚拟同步发电机; 功率分配; 无功控制; 双谐振环

## Accurate power sharing control strategy of multiple virtual synchronous generators in independent micro-grid

YUAN Jian, YANG Wei

(College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To provide inertia and damping for the system and to improve the stability of voltage and frequency in independent micro-grid, Virtual Synchronous Generator (VSG) control strategy of inverters is recommended, which mimics synchronous generators. However, the traditional VSG parallel system is challenged by rational distribution of reactive power and DC suppression. Firstly, the accurate power sharing mechanism of VSG is analyzed based on the principle of VSG. Besides, an improved reactive power control method is proposed from the angle of voltage compensation to construct the integrator, which can realize the decoupling of reactive power distribution and line impedance. Furthermore, the double loop control is redesigned to suppress the DC by using the quasi resonant controller. At the same time, the method of parameter matching is studied to ensure the accurate power sharing of VSG. Finally, the validity and effectiveness of the proposed VSG control are verified by Matlab simulation.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. JSDL-XLFW-SQ-2016-10-092).

**Key words:** micro-grid; virtual synchronous generator (VSG); power sharing; reactive power control; double resonant loop

## 0 引言

目前为止, 全世界有超过 10 亿人口仍无法获得电力供应。微网作为一个囊括分布式电源、储能装置、负荷、能量转换装置、监控和保护装置的小型发电系统, 能够改善海岛以及偏远无电区的供电问题<sup>[1-3]</sup>。然而这类独立微网没有旋转设备, 无法为系统提供惯性、阻尼以及电压频率的支撑, 加上

分布式电源出力的随机性和波动性, 独立微网的稳定性难以保证<sup>[4-5]</sup>。为此, 有学者提出虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术, 使得微源在机理和外特性上能够模拟同步发电机<sup>[6-8]</sup>。VSG 具有电压源的输出特性, 因此在独立微网中需要多台 VSG 并联运行, 共同为负荷提供稳定的电压和频率支撑。这既可以提高微网容量<sup>[9]</sup>, 又能在某台 VSG 因故障退出运行后保持微网稳定运行, 提高微网供电可靠性<sup>[10]</sup>。然而由于实际条件的限制, 使得各微源的容量不等, 系统输出阻抗以及线路阻抗也各有差异。这会导致各微源输出功率分配不均,

严重时破坏微网稳定运行<sup>[11]</sup>。因此开展微网中多微源功率合理精确分配的研究具有重要的理论和工程应用价值。

至今,国内外学者已经在独立微网中多微源并联运行理论和实际应用方面进行了大量研究。文献[12]提出一种基于 Washout 滤波器的新型 VSG 控制方案,改善了系统的频率和电压,但是滤波器的自然响应频率对滤波效果的影响比较大。文献[13]引入虚拟阻抗,并给出了一种改进的下垂控制,提高了并联逆变器有功均分效果,但无法实现无功均分。文献[14]提出了一种分频下垂控制方法,能够合理分配基波域和谐波域的功率,但没有解决多逆变器功率分配精度与直流母线电压调整率之间的矛盾。文献[15]提出了一种基于可控等效输出阻抗的并联控制策略,能够在不需要功率环的情况下实现功率均分,但是该方法控制复杂,对处理器的实时处理性能要求较高。文献[16]提出了一种基于 PCC 电压补偿的改进下垂控制均分无功功率,该方法对通信系统要求较高。文献[17]设计了一种接口变换器 VSG 控制策略,在保证有功功率均分的同时,还能使负荷阶跃响应更平滑,但是缺少对无功功率均分的控制。

针对以上问题,从分析 VSG 并联功率入手, VSG 并联系统有功功率基本能实现合理分配,无功功率的分配主要受线路阻抗影响,并得到了 VSG 功率精确分配的条件。为此,对传统下垂控制进行改进,提出了一种基于电压补偿的改进无功控制方法,同时,为平抑负荷响应波动,重新设计了基于准谐振控制器的底层双环控制结构。在此基础上,研究了参数匹配方法,保证 VSG 功率均分。仿真结果验证了所提策略的有效性和可行性。

## 1 VSG 并联功率分析

### 1.1 VSG 基本原理

传统的 VSG 控制结构如图 1 所示,借鉴同步发电机的二阶模型,模拟同步发电机惯性和阻尼,即

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

式中:  $T_m$ 、 $T_e$  和  $T_d$  分别为同步发电机的机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩;  $P_m$  和  $P_e$  分别为机械功率和电磁功率;  $\omega$  和  $\omega_0$  分别为 VSG 的同步角速度和额定角速度;  $J$  为转动惯量;  $D$  为阻尼系数。

其中 VSG 的电磁功率通过输出电压和输出电流计算得到,虚拟机械功率  $P_m$  由额定有功功率  $P_{ref}$  和功频下垂控制器的输出  $\Delta P$  组成,即

$$P_m = P_{ref} + \Delta P = P_{ref} + \frac{1}{m}(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

式中,  $m$  为有功下垂系数。

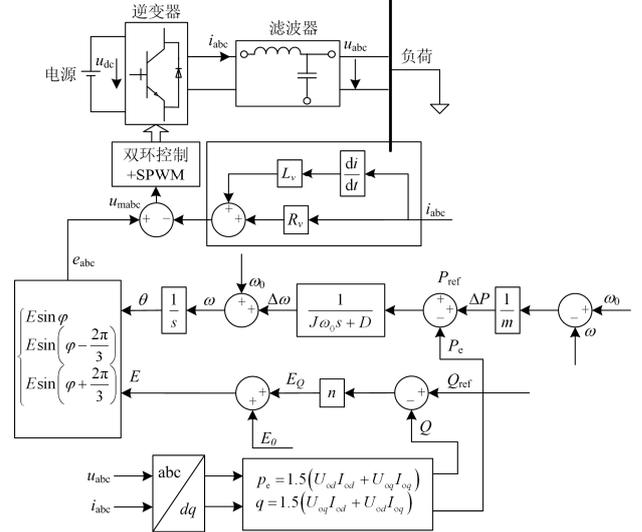


图 1 传统 VSG 控制结构

Fig. 1 Control structure of traditional VSG

VSG 有功部分提供电压相角  $\theta$  参考,无功部分提供电压幅值  $E$  参考。VSG 内电势幅值  $E$  由空载电势  $E_0$  和无功电压下垂控制器的输出  $E_Q$  组成,即

$$E = E_0 + E_Q = E_0 + n(Q_{ref} - Q) \quad (3)$$

式中:  $n$  为无功下垂系数;  $Q_{ref}$  为 VSG 额定无功功率;  $Q$  为 VSG 输出的无功功率。

将电压相角  $\theta$  参考和电压幅值  $E$  合成,即得到电势电压  $e_{abc}$ 。为改善 VSG 输出特性,引入虚拟阻抗环节  $L_v$  和  $R_v$  进行调节,得到 VSG 调制信号  $u_{mabc}$ ,如式(4)所示。

$$u_{mabc} = e_{abc} + L_v \frac{di_{abc}}{dt} + R_v i_{abc} \quad (4)$$

### 1.2 并联功率分析

两台 VSG 并联的等效示意图如图 2 所示。其中,两台 VSG 等效为两个电压源,  $\varphi_i$  ( $i=1,2$ ) 为 VSG 输出电压相位,  $Z_i = R_i + jX_i$  ( $i=1,2$ ) 表示 VSG 等效输出阻抗与馈线阻抗之和。当等效线路阻抗呈感性时, VSG 输出功率可由式(15)得出。

$$\begin{cases} P_n = U_n U_0 \sin \varphi_n / X_n \approx U_n U_0 \varphi_n / X_n \\ Q_n = (U_n U_0 \cos \varphi_n - U_n^2) / X_n \approx U_n (U_0 - U_n) / X_n \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_n$  和  $Q_n$  分别为 VSG 输出的有功功率和无功功率;  $U_n$  和  $U_0$  分别为 VSG 的输出电压和公共母线电压;  $\varphi_n$  为 VSG 输出电压相位;  $X_n$  为 VSG 出口到公共母线的线路电抗值。

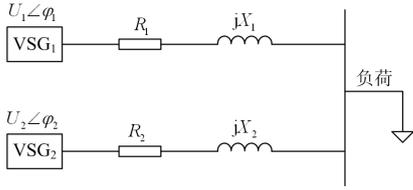


图2 并联运行系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of parallel operation system

逆变器并联系统对应的下垂控制方程为

$$\omega_i = \omega^* - m_i P_i \quad (6)$$

$$E_i = E^* - n_i Q_i \quad (7)$$

式中:  $\omega_i$  和  $E_i$  为第  $i$  台 VSG 输出电压的角频率和幅值;  $\omega^*$  和  $E^*$  为 VSG 额定输出电压的角频率和幅值;  $m_i$  和  $n_i$  为第  $i$  台 VSG 的有功和无功下垂系数;  $P_i$  和  $Q_i$  为第  $i$  台 VSG 输出的有功和无功功率。

根据传统下垂控制, 多逆变器并联系统实现有功功率精确分配的前提是输出电压频率相等, 无功功率精确分配的前提是输出电压幅值相等, 结合式(6)、式(7)可得

$$m_1 P_1 = m_2 P_2 \quad (8)$$

$$n_1 Q_1 = n_2 Q_2 \quad (9)$$

为满足 VSG 输出电压的频率和幅值相等, 将式(5)有功部分代入式(6)、式(7), 可得

$$\omega_n(s) = \frac{\omega^*}{1 + \frac{m_n U_0 U_n}{s X_n}} \quad (10)$$

对式(10)作差应用终值定理得到稳态时频率误差为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \omega(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s (\omega_1(s) - \omega_2(s)) = 0 \quad (11)$$

同理, 将式(5)无功部分代入式(6)、式(7), 可得

$$U_n = \frac{\left( U_0 + \frac{X_n}{n_n} \right) + \sqrt{\left( U_0 + \frac{X_n}{n_n} \right)^2 - 4 \frac{X_n}{n_n} U^*}}{2} \quad (12)$$

由式(11)可以看到, 由于存在积分环节, 即使线路阻抗不同, 在稳态时频率误差也能消除; 从式(12)可知, 只有在线路阻抗相匹配时, 即  $\frac{X_1}{n_1} = \frac{X_2}{n_2}$ ,

电压幅值误差才能被消除。

也就是说, 逆变器多机并联系统实现功率精确分配的条件是  $P$ - $f$ 、 $Q$ - $U$  下垂控制器中具有积分环节  $1/s$ , 从而使得有功功率和无功功率的输出不受等效线路阻抗的影响。其中有功部分通过相角  $\varphi_i = \int \omega_i dt$  构造积分器, 实现有功功率的精确分配。而传统的无功下垂控制不含积分器, 不具备无功功

率精确分配的能力, 因此需要设计一种新的 VSG 无功功率控制方法。

## 2 VSG 功率精确分配控制

### 2.1 改进的无功功率控制

由于功率计算环节的低通滤波器会引起一定程度的滞后, 为了加快系统动态响应, 在下垂控制方程中加入微分环节, 得到如下控制方程:

$$\omega_i = \omega^* - m_i P_i - m_{di} \frac{dP_i}{dt} \quad (13)$$

$$E_i = E^* - n_i Q_i - n_{di} \frac{dQ_i}{dt} \quad (14)$$

式中,  $m_{di}$  和  $n_{di}$  为第  $i$  台 VSG 的微分下垂系数。

为了实现无功控制与感性线路阻抗解耦, 改善 VSG 因线路阻抗不匹配造成输出无功不合理的问题, 提出一种基于电压补偿的无功控制策略。

当 VSG 端电压偏离额定值, 通过补偿信号  $\delta E$ , 修正电压幅值参考, 即改变式(14)中的  $E^*$  为  $E^* + \delta E$ , 则偏差  $\Delta E_i = E_i - E^* = \delta E - n_i Q_i - n_{di} \frac{dQ_i}{dt}$ 。

另一方面, 为引入积分环节, 电压幅值参考  $E_i$  可通过对偏差  $\Delta E_i$  积分得到, 则改进的无功控制依据为

$$\begin{cases} E_i = k_1 \int \Delta E_i = k_1 \int \left( \delta E_i - n_i Q_i - n_{di} \frac{dQ_i}{dt} \right) dt \\ \delta E_i = k_2 (U_{ni} - U_{mi}) + k_3 \int (U_{ni} - U_{mi}) dt \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $k_1$  为积分增益系数, 用以调节系统动态响应;  $k_2$ 、 $k_3$  为偏差的比例、积分系数;  $U_{ni}$  为第  $i$  台 VSG 电压的额定值;  $U_{mi}$  为第  $i$  台 VSG 电压的实际幅值。

稳态时, 积分器输入为零, 由式(15)可得

$$\delta E_i - n_i Q_i - n_{di} \frac{dQ_i}{dt} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dQ_i}{dt} = 0 \quad (17)$$

再由式(16)、式(17), 可得

$$\delta E_i - n_i Q_i = 0 \quad (18)$$

VSG 作为电压源, 稳态时各 VSG 的  $\delta E_i$  比例积分调节信号相同, 则有

$$n_1 Q_1 = n_2 Q_2 = \dots = n_x Q_x \quad (19)$$

即实现了 VSG 无功功率的精确分配。因此, 这种改进的 VSG 无功控制方法在保证输出电压稳定的同时, 可以规避线路阻抗不匹配导致无功分配不均的问题。

根据式(15), 得到改进的 VSG 无功功率控制方

程为

$$E_i = \frac{K_i}{s} \left( \left( k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (U_i^* - U_i) + (1 + k_{di}s) (Q_i^* - Q_i) \right) \quad (20)$$

式中： $K_i = k_1 n_i$ ； $k_{pi} = k_2 / n_i$ ； $k_{ii} = k_3 / n_i$ ； $k_{di} = n_{di} / n_i$ ； $Q_i^*$ 为第*i*台VSG额定无功功率。

有功功率控制采用传统下垂控制方法，则改进VSG控制器结构如图3所示。在无功控制中，电压环节通过PI控制保证了输出电压的稳定；无功功率环节通过比例微分环节调节输出实现功率均分，并提供电压幅值参考。

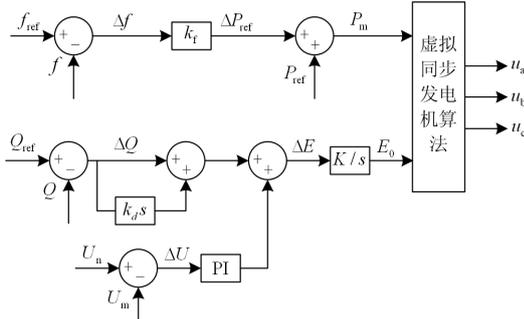


图3 改进的VSG控制器

Fig. 3 Improved VSG controller

## 2.2 底层控制策略

由于现有的控制策略是基于感性线路，而低压系统的线路呈阻性，这会使得功率耦合，导致有功无功交替。可采用添加虚拟阻抗的方法解决阻性线路功率耦合的问题，即在底层双环控制外加入输出阻抗调节环，其结构如图1实线框所示。其中输出阻抗调节环的参数设计原则是能够使虚拟阻抗、等效输出阻抗、线路阻抗三者之和呈感性。等效输出阻抗很小，可忽略，因此只需将虚拟电抗LV的模值设计为线路阻抗模值的3倍及以上即可达到高压线路的阻感比<sup>[18]</sup>。

虚拟阻抗通过基于级联广义积分器(Cascaded General-Integrator, CGI)的构造方法实现，在参数k取1时，系统能够兼具谐波、直流分量抑制以及快速响应的优点。具体结构原理可以参考文献[19-20]。

VSG控制策略的输出信号通过电压电流双环的底层控制来稳定电压电流，并以此改善其输出波形。传统的双环控制中，电压外环用于稳定电压并为电流环提供参考，电流内环用于快速调节电流。但是系统在动态阶跃响应时，会导致施加在VSG上的正负电压基波周期不完整，无法维持伏秒平衡原则，造成电压正负不对称，动态过程中正负电压不对称造成的直流分量会使得VSG有功功率和无

功功率发生振荡。此谐波在d-q坐标系中表现为一次谐波，因此，为平抑VSG功率波动，改善VSG有功功率和无功功率对参考值的跟踪特性，提出一种基于一次谐波的双谐振环底层控制策略，其传递函数如式(21)所示。

$$G_{PIR} = k_{p1} + \frac{k_i}{s} + \frac{2k_{r1}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (21)$$

$$G_{PR} = k_{p2} + \frac{2k_{r2}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}$$

式中： $k_{p1}$ 、 $k_{p2}$ 为比例因子； $k_i$ 为积分因子； $k_{r1}$ 、 $k_{r2}$ 为谐振因子，影响谐振处增益； $\omega_c$ 为截止频率，影响控制器增益和带宽； $\omega_0$ 为谐振频率。

控制框图如图4所示，其中 $U_{odq}^*$ 为电压d-q轴分量的参考值， $U_{odq}$ 为VSG输出电压的d-q轴分量， $I_{ldq}$ 为电感电流的d-q轴分量， $U_{dq}^*$ 为双环输出的电压参考。

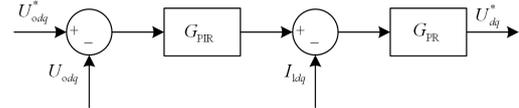


图4 基于双谐振环底层控制的直流分量抑制策略

Fig. 4 DC component suppression based on double resonant loop underlying control

## 3 VSG多机并联系统参数匹配方法

各VSG控制参数相匹配是VSG按照各自容量比均分有功无功功率的前提<sup>[21]</sup>。为简化分析，以两台VSG并联运行为例，设两台VSG额定有功和无功容量比值为n，那么它们发出的有功功率和无功功率比值应与容量匹配，即 $P_1:P_2=Q_1:Q_2=S_1:S_2=n$ 。其中 $S_1$ 、 $S_2$ 为各自容量。

从VSG数学模型考虑，有

$$\begin{cases} Js(\omega - \omega_n) = \frac{P_m - P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n) \\ s\theta = \omega \end{cases} \quad (22)$$

整理式(22)得角表达式为

$$\theta(s) = \frac{1}{s} \left( \frac{P_m - P_e}{\omega_n} \frac{1}{Js + D} + \omega_n \right) \quad (23)$$

为保证有功功率均分，相角差应为零，对式(23)应用终值定理 $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\theta(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta\theta(s) = 0$ ，得到

$$\frac{P_{m1} - P_{e1}}{J_1 s + D_1} = \frac{n(P_{m2} - P_{e2})}{J_1 s + D_1} = \frac{P_{m2} - P_{e2}}{J_2 s + D_2} \quad (24)$$

即

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{D_1}{D_2} = n \quad (25)$$

稳态运行时, 系统各处角频率相等, 则  $f_1 = f_2$ , 在功频控制器中, 可得

$$\begin{cases} P_{mi} = k_{fi}(f^* - f_i) + P_i^* \\ P_{m1} : P_{m2} = P_1^* : P_2^* = n \end{cases} \quad (26)$$

$$\frac{k_{f1}}{k_{f2}} = n \quad (27)$$

整理式(25)、式(27)可知, 若 VSG 的这几个重要参数满足式(28), 则可保证 VSG 多机并联系统有功功率分配。

$$\frac{k_{f1}}{k_{f2}} = \frac{J_1}{J_2} = \frac{D_1}{D_2} = n \quad (28)$$

以同样的方法分析无功控制, 对式(20)应用终值定理  $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta E(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta E(s) = 0$ , 得到 VSG 无功功率均分条件如式(29)所示。

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{k_{p1}}{k_{p2}} = \frac{k_{i1}}{k_{i2}} = n, k_{d1} = k_{d2} \quad (29)$$

结合式(28)和式(29), VSG 功率均分的参数匹配原则为

$$\frac{k_{f1}}{k_{f2}} = \frac{J_1}{J_2} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{K_2}{K_1} = \frac{k_{p1}}{k_{p2}} = \frac{k_{i1}}{k_{i2}} = n, k_{d1} = k_{d2} \quad (30)$$

不失一般性, 在 VSG 多机并联系统中, 为实现功率均分, 需要满足功频下垂系数  $k_f$ 、惯量  $J$ 、阻尼  $D$ 、电压偏差比例积分参数  $k_p$ 、 $k_i$  与 VSG 容量比成正比, 积分增益系数  $K$  与容量比成反比, 无功微分参数  $k_d$  相等。

## 4 仿真分析

以两台 VSG 并联运行为例, 系统结构如图 5 所示, 两台 VSG 经过 LC 滤波、线路并联后, 向公共负载供电。在 Matlab/Simulink 软件中搭建该仿真模型, 对系统进行功率均分仿真。交流侧线电压为 380 V、50 Hz, 两台 VSG 直流侧电压为 800 V, 容量比为 2:1。参数设置为: LC 滤波器  $L_2 = 2L_1 = 2.72 \text{ mH}$ ,  $C_1 = 2C_2 = 15 \text{ } \mu\text{F}$ ; 特别地, 考虑实际线路阻抗一般不与容量比匹配, 设置线路 2 长度为线路 1 的 1.5 倍,  $Z_{line1} = 0.642 + j0.083 \Omega$ ; 底层双环控制参数相同, PIR 控制器中  $k_p = 0.15$ 、 $k_i = 350$ 、 $k_r = 8$ 、 $\omega_c = 8$ , PR 控制器中  $k_p = 7$ 、 $k_r = 16$ 、 $\omega_c = 16$ ; 惯量阻尼参数分别为  $J_1 = 2J_2 = 0.5$ ,  $D_1 = 2D_2 = 20$ ; 虚拟阻抗  $L_{v2} = 2L_{v1} = 3 \text{ mH}$ 。

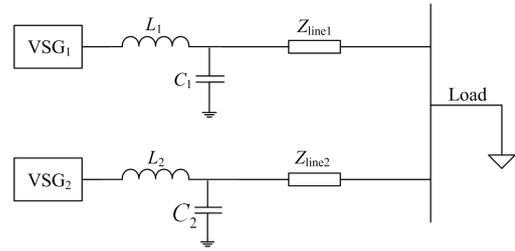


图 5 并联运行结构图

Fig. 5 Structure diagram of parallel operation

### 4.1 改进无功功率控制仿真分析

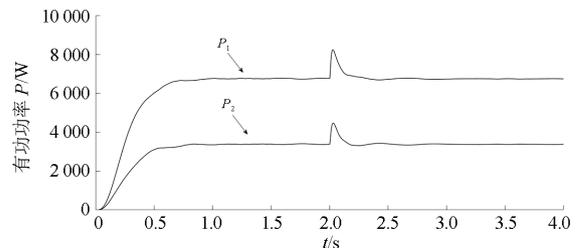
两 VSG 有功功率控制始终采用传统  $P-f$  下垂控制, 无功功率控制采用传统下垂控制与本文提出的改进无功功率控制进行对比分析, 各下垂控制参数如表 1 所示。仿真开始时两台 VSG 采用改进的无功控制运行, 在  $t = 2 \text{ s}$  时无功控制切换为传统下垂控制。用  $\Delta P = P_1 - nP_2$  和  $\Delta Q = Q_1 - nQ_2$  考察功率均分度, 其中  $n$  为容量比,  $\Delta P$  或  $\Delta Q$  的绝对值越小则功率均分度越高。

表 1 下垂控制参数设置

Table 1 Parameter setting of droop control

控制方法	控制参数	VSG1	VSG2
$P-f$ 控制	$m_i$	4.55e-5	9.09e-5
	$P_n/\text{kW}$	10	5
$Q-U$ 控制	$n_i$	2.5e-3	5e-3
	$Q_n/\text{var}$	0	0
改进无功控制	$K_i$	0.062 8	0.125 6
	$k_{pi}$	90	45
	$k_{ii}$	44	22
	$k_{di}$	1e-4	1e-4
	$Q_{ni}$	0	0

仿真结果如图 6 所示, 有功功率方面, 两台 VSG 只有在 2 s 切换控制策略时产生了功率波动, 其余时刻能够保持有功功率稳定输出, 从有功功率差  $\Delta P$  来看,  $\Delta P$  在整个仿真过程中接近于 0, 也就是说不管哪种控制策略, 都能不受线路阻抗影响实现有功功率精确分配。无功功率方面, 两台 VSG 同样能够保持无功功率稳定输出, 但是在 2 s 后传统无功下垂控制受线路阻抗影响无功功率分配很不合理, 从图 6(d) 可以看到, 稳态时无功功率分配存在



(a) 有功功率  $P$

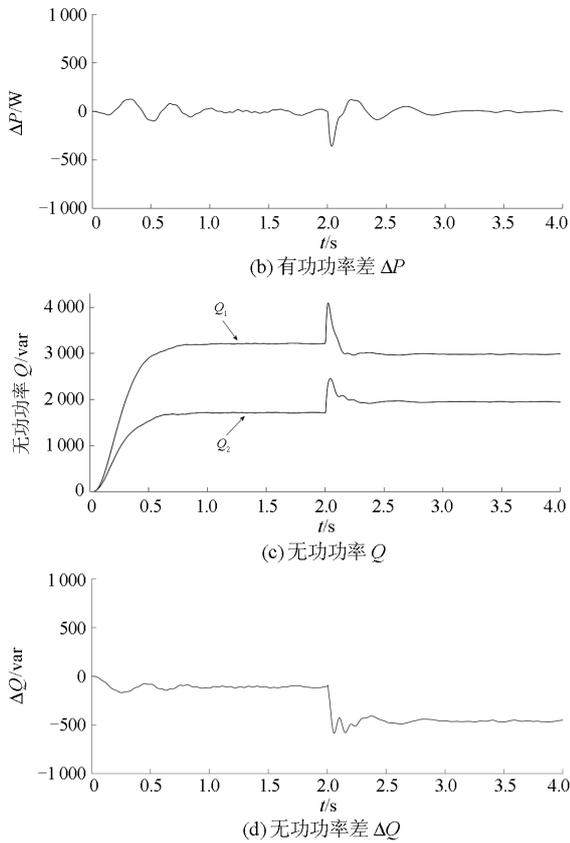


图 6 不同无功控制策略下 VSG 功率分配情况  
Fig. 6 VSG power allocation under different reactive power control strategies

约 10% 的功率差；而本文提出的改进无功控制能够实现无功功率分配与线路阻抗解耦，无功功率能够 2:1 精确分配，无功功率差  $\Delta Q$  能够维持在 0 附近。

#### 4.2 双谐振环底层控制仿真分析

通过负荷突变对比考察 VSG 在不同底层控制策略下功率均分的动态性能。下垂控制方面，两 VSG 始终采用传统 P-f 下垂控制和本文提出的改进无功功率控制。底层控制方面，采用双谐振环底层控制和传统电压外环电流内环的双环控制进行对比分析，其中电压外环采用 PI 控制，电流内环采用比例控制。其他仿真条件不变。设置仿真开始时投入第一台 VSG 和 7 kW/3 500 var 负荷，1 s 后投入第二台 VSG，2 s 后继续投入 7 kW/3 500 var 负荷，3 s 后切除 7 kW/3 500 var 负荷，采用不同的底层控制策略对比分析 VSG 输出功率的动态特性。

图 7 为两台 VSG 采用传统双环控制时功率输出情况，可以看到，在 1 s 前 VSG1 单独出力，VSG2 出力为 0，1 s 时 VSG2 并入系统，VSG1 出力得到分担，很快下降至原功率 2/3 处，同时 VSG2 能够迅速稳定输出功率，说明系统动态性能良好。并且由于采用有功下垂控制和本文提出的无功控制方

法，两台 VSG 能够均分功率。但是在 2 s 发生负荷突变后，两台 VSG 输出的有功功率和无功功率产生持续振荡而无法稳定。同样地，在 3 s 切除负荷后，有功无功仍然振荡无法保持稳定。

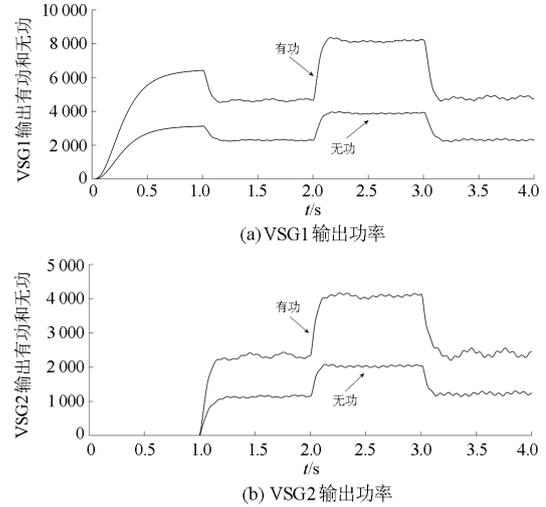


图 7 采用传统双环控制时 VSG1、VSG2 输出功率  
Fig. 7 VSG1 and VSG2 output power using traditional double loop control

从图 8 可以看出，VSG2 并入系统时，同样能够迅速稳定输出功率，体现系统良好的动态性能。当两台 VSG 采用双谐振环底层控制策略时，两台 VSG 在均分功率的同时具有较强的鲁棒性。在 2 s 发生负荷突变后，VSG 有功功率和无功功率经过了短时的波动后能够立即恢复到平稳运行状态。在 3 s 切除负荷后同样能够保持稳定运行，不过暂态调节时间稍长于前者。

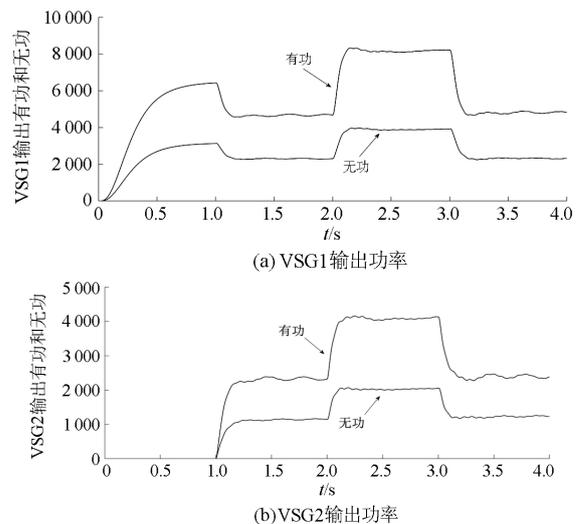


图 8 采用双谐振环底层控制时 VSG1、VSG2 输出功率  
Fig. 8 VSG1 and VSG2 output power using the double resonant loop underlying control

## 5 结论

本文针对独立微网中多逆变器并联系统功率合理分配问题,研究了基于VSG的功率精确分配控制策略,阐述了传统VSG的控制结构,分析了多逆变器并联系统功率均分条件。针对传统VSG无功功率分配与线路阻抗耦合问题,提出了一种基于电压补偿的改进无功控制方法,实现了无功功率精确分配;针对VSG在动态阶跃响应时,功率振荡、系统鲁棒性较差的问题,提出了一种双谐振环底层控制策略以平抑功率波动;针对VSG参数的设计,提出了VSG多机并联系统参数匹配方法,保证VSG在暂态和稳态过程中能够均分功率。Matlab仿真结果表明了所提策略的正确性和可行性,能够实现VSG功率精确分配,且提高了系统稳定性。

## 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] WANG Z, CHEN B, WANG J, et al. Decentralized energy management system for networked microgrids in grid-connected and islanded modes[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1097-1105.
- [3] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [4] 张东, 陈景文, 张蓉, 等. 计及光伏预测的直流微电网能量调度研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 28-33.  
ZHANG Dong, CHEN Jingwen, ZHANG Rong, et al. Energy dispatching of DC microgrid based on pv generation prediction[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 28-33.
- [5] XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. A coherency-based equivalence method for MMC inverters using virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1369-1378.
- [6] 吕志鹏. 虚拟同步机技术构建“源—网—荷”友好互动新模式[J]. 供用电, 2017, 34(2): 32-34, 27.  
LÜ Zhipeng. New pattern of source-grid-load friendly interaction based on virtual synchronous machine technology[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(2): 32-34, 27.
- [7] 张宸宇, 杨赟, 袁晓冬, 等. 考虑阻尼和惯性的虚拟同步机建模方法研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 45-49.  
ZHANG Chenyu, YANG Yun, YUAN Xiaodong, et al. Modeling method of virtual synchronous machine considering damping and inertia[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 45-49.
- [8] 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.  
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Technology and prospect of virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [9] 徐少华, 李建林, 惠东. 多储能逆变器并联系统在微网孤岛条件下的稳定性分析及其控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3266-3273.  
XU Shaohua, LI Jianlin, HUI Dong. Stability analysis and control strategy of parallel storage inverter system working under the micro-grid's island condition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3266-3273.
- [10] 陈刚, 蒋顺平, 丁勇, 等. 并联T型三电平储能变流器零序环流抑制[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 52-58.  
CHEN Gang, JIANG Shunping, DING Yong, et al. Zero-sequence circulating current reduction for parallel T-type three-level power converter systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 52-58.
- [11] 樊晨曦, 李海峰, AZEDDINE H, 等. 三相逆变器并联系统中环流抑制的研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 15-21.  
FAN Chenxi, LI Haifeng, AZEDDINE H, et al. Study on circulating current suppression in three-phase inverter parallel system[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 15-21.
- [12] 程启明, 张宇, 谭冯忍, 等. 基于Washout滤波器的虚拟同步发电机新型控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 51-57.  
CHENG Qiming, ZHANG Yu, TAN Fengren, et al. Research on new control method of virtual synchronous generator based on Washout filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 51-57.
- [13] 彭湃. 基于虚拟阻抗的微电网下垂控制策略研究[J]. 供用电, 2018, 35(6): 60-65.  
PENG Pai. Research on droop control strategy in micro-grid based on virtual impedance[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 60-65.
- [14] 刘海涛, 吕志鹏, 苏剑, 等. 具有功率精确分配能力的逆变器电压谐波分频下垂控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 9-14.  
LIU Haitao, LÜ Zhipeng, SU Jian, et al. Inverter's frequency dividing droop controller with accurate load

- sharing ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 9-14.
- [15] 赵济乾, 赵晋斌, 孙锋, 等. 基于可控等效输出阻抗的微网逆变器并联特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 94-100.  
ZHAO Jiqian, ZHAO Jinbin, SUN Feng, et al. Research on microgrid inverters parallel characteristic based controllable equivalent output impedance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 94-100.
- [16] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等. 一种改进的分布式电源无功功率精确分配下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 30-34, 74.  
GUO Qian, LIN Liaoyuan, WU Hongyan, et al. An improved droop control strategy for accurate reactive power sharing among distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 30-34, 74.
- [17] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.  
ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [18] 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.
- [19] 黄媛, 罗安, 陈燕东, 等. 一种三阶广义积分交叉对消电流反馈控制的多逆变器并联控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4855-4864.  
HUANG Yuan, LUO An, CHEN Yandong, et al. A current feedback control strategy for parallel operation of multi-inverters using third-order general-integrator crossover cancellation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4855-4864.
- [20] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 不平衡与非线性混合负载下的虚拟同步发电机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6086-6095.  
SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. A control strategy for unbalanced and nonlinear mixed loads of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6086-6095.
- [21] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.  
ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.

---

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-04-26

作者简介:

袁 健(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力分析、运行、控制与规划; E-mail: i2nini@163.com

杨 伟(1965—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析、运行、控制与规划。E-mail: weiyang807@qq.com

(编辑 葛艳娜)