

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181258

一种基于虚拟同步发电机的多逆变器微电网 频率无差调节策略

谢卫才^{1,2,3}, 王世豪¹, 何力^{1,3}, 李世军¹, 赵振兴¹

(1. 湖南工程学院电气信息学院, 湖南 湘潭 411101; 2. 湖南工程学院, 风力发电机组及控制湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411101; 3. 湖南省风电装备与电能变换协同创新中心, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)在增强微网稳定性的同时, 能克服微网中电力电子装置并网给电网带来的冲击, 受到了广泛关注。现有的 VSG 中的有功频率控制, 在微网离网运行时, 将存在频率偏移, 这将会影响到微网中频率敏感负荷的稳定运行。因此提出了一种 VSG 的频率无差调节方法, 将 VSG 所产生的频率偏差量叠加到 VSG 的有功频率控制环中, 消除了微网的频率偏移。针对含多个 VSG 并联运行的微网, 各 VSG 不需要通信, 独立参与微网频率无差调节。同时, 还能根据 VSG 额定容量自主分配负荷功率, 提高了微电网经济运行的能力。最后搭建三台 VSG 并联仿真模型, 验证了所提控制策略的可行性和有效性。

关键词: 微网; 虚拟同步发电机; 功率分配; 无差调节

A frequent deviation-free regulation strategy of microgrid based on the VSG of multi-inverter

XIE Weicai^{1,2,3}, WANG Shihao¹, HE Li^{1,3}, LI Shijun¹, ZHAO Zhenxing¹

(1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Wind Generator and Its Control, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China; 3. Hunan Province Cooperative Innovation Center for Wind Power Equipment and Energy Conversion, Xiangtan 411101, China)

Abstract: Virtual Synchronous Generator (VSG) has drawn much attention in enhancing the stability of microgrid and overcoming impact of traditional grid-connected electronic devices. In the existing VSG, the active frequency control will result in permanent frequency deviation when the microgrid runs off-grid, which is harmful to the stable operation of the frequency-sensitive load. Therefore, a method of frequent deviation-free regulation is proposed, the frequency deviation generated by the VSG is superimposed to VSG active frequency control loop, eliminating the micro-grid frequency deviation. For microgrids with multiple VSGs operating in parallel, each VSG does not require communication and is independently involved in the microgrid frequency regulation. At the same time, the load power can be automatically allocated to the VSG according to the rated capacity of VSG, conducive to the economic operation of the microgrid. Finally, taking three VSG parallel operation as an example, simulation demonstrates the validity and practicability of this control method.

This work is supported by Hunan Provincial Education Department Funded Scientific Research Projects (No. 18A348), Hunan Provincial Self-study Fund Projects (2019JJ40059) and Research and Development Program in Key Areas of Hunan Province (No. 2019WK2012).

Key words: microgrid; virtual synchronous generator; power allocation; deviation-free regulation

0 引言

近年来, 微网作为一个能够实现自我管理和自

我控制的小型发配电系统, 越来越受到人们的广泛关注^[1-2]。微网存在并网和离网两种运行模式^[3], 并网运行时, 微网频率由大电网支撑, 无需微网中的分布式电源(Distributed Generation, DG)对微网频率进行调节。

离网运行时, 与大电网相比, 微网容量小, 且电力电子设备渗透率高, 系统惯性不足^[4], 导致微

基金项目: 湖南省教育厅科研项目资助(18A348); 湖南省自然科学基金项目资助(2019JJ40059); 湖南省重点领域研发计划项目资助(2019WK2012)

网频率对负荷的波动十分敏感，而微网频率的波动反过来又会影响微网中负荷和 DG 的安全稳定运行。因为微网内的许多负荷都是频率敏感设备，而过大的频率变化速率或范围会严重影响该类负荷的正常运行，所以如何维持微网的频率稳定是微网研究的关键^[5]。

现有研究针对离网运行的微网频率稳定性问题，提出了恒压/恒频控制^[6]，虽能稳定微网频率，但对微网中作为主控制单元的 DG 可靠性要求较高。以模拟同步发电机有功频率和无功电压外特性的下垂控制^[7]被提出，虽能对微电网的频率和电压进行调节，但并未很好地体现出同步发电机所具有的转子机械特性，因而当微电网系统中的 DG 采用下垂控制时，微电网频率稳定性仍然较差。

同步发电机具有惯性大和输出阻抗大等优点，具有对电网天然友好的优势，因此，国内外一些学者提出了一种虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术^[8-11]，使 DG 能够模拟出同步发电机的频率和电压输出等外特性，从而使得微网的频率稳定性得到改善。但是，这些研究对于频率都为简单的调节，都未考虑微网频率的无差控制，没有充分挖掘出 VSG 在实现微网频率无静差方面的能力，因而当微网中的分布式电源出力波动或者大负荷投切时，微网系统频率将会偏离额定运行值甚至偏移微网频率所能运行的范围^[12]。针对这一问题，文献[13-14]提出通过频率信息在邻近的 DG 间交换来实现微网频率的无差调节，但这使得 DG 间需要复杂的通信线互联，可靠性较低。文献[15]提出在 DG 调频单元中引入 PI 控制器，来实现频率的无差调节，但不适用于多台 DG 并联共同参与频率调节。文献[16]提出了一种有功功率下垂系数自适应调节的下垂控制器，能使得微网稳态时输出频率无静差，但该策略控制器参数选取较繁琐。文献[17]提出了一种对微电网系统频率的集中控制，但对于多个 DG 共同参与系统频率调节时，脱离了通信系统，各 DG 不能根据自身额定容量自主来分担负荷功率，影响了微电网的经济性。

针对上述文献所存在的问题，本文将 VSG 技术运用到分布式电源控制上，提出一种微网频率无差调节策略。在增强微网频率稳定性的同时，将 VSG 所产生的频率偏差量补偿到 VSG 的有功频率控制环中，从而实现微网频率稳定在额定值。对于多个 VSG 组成的微网系统，不需要微网中央控制器或 VSG 之间的通信，多个 VSG 能共同支撑微网频率，并按各自容量分配调节功率，实现微网频率的稳态无静差调节。最后通过仿真验证了所提控制策

略的正确性和实用性。

1 虚拟同步发电机技术

将同步发电机励磁控制和功频控制算法运用到 DG 上，使其能够模拟出同步发电机的频率和电压输出等外特性，并将其称为 VSG，其控制的主电路结构如图 1 所示。

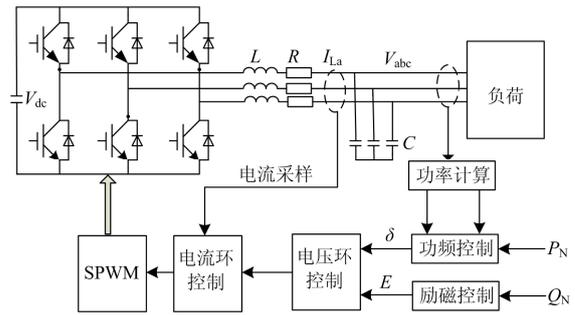


图 1 虚拟同步发电机主电路结构

Fig. 1 Main circuit structure of VSG

从图 1 可看出，VSG 的核心控制器主要由功频控制器和励磁控制器组成，以下将逐一介绍各个控制部分。

1.1 功频控制

VSG 的转子运动方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} J \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_N - P_e - D\Delta\omega \\ \Delta\omega = \omega - \omega_N \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中： J 为同步发电机的转动惯量； ω_N 为电网同步角速度； ω 为实际角速度； P_N 和 P_e 分别为额定功率和电磁功率； D 为阻尼系数； δ 为发电机功角。有功频率控制框图如图 2 所示。

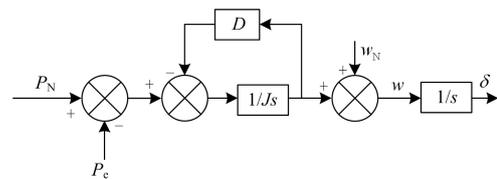


图 2 有功-频率控制框图

Fig. 2 Active power-frequency control block

将式(2)代入式(1)后得出

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} + D(\omega - \omega_N) = P_N - P_e \quad (2)$$

若令 $J=0$ ，则式(2)变为传统下垂控制方程，可见，VSG 功频控制本质上是一种有功功率下垂控制，与传统下垂控制不同的是，功频控制的机械方

程中通过引入转动惯量模拟了同步发电机的转子惯性, 在面对有功负荷投切时, VSG 输出频率缓慢变化, 可提高微网频率稳定性。

1.2 励磁控制

VSG 的励磁调节系统可以借鉴传统同步发电机励磁控制系统的原理来实现, 其控制框图如图 3 所示^[18]。

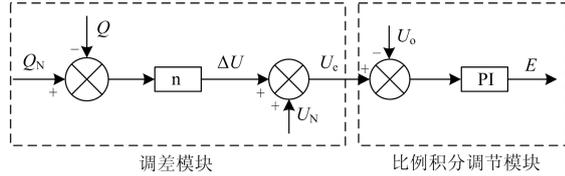


图 3 励磁控制器框图

Fig. 3 Excitation control block

控制框图中调差模块, 用于各个 VSG 并联运行时实现无功负荷的合理分配。 U_N 为虚拟同步发电机的额定电压, U_e 为电压调差模块输出, Q_N 为 VSG 的额定无功功率, Q 为 VSG 输出的实际无功功率。

比例积分调节模块用于调节系统的输出电压, U_0 为 VSG 输出电压, 当无功负载突变时, 通过励磁控制器的调节, 系统运行在一个新的电压水平。

2 VSG 的频率调节和功率分配策略技术

2.1 VSG 频率调节

当微网工作在并网模式时, 频率由大电网支撑, 故不需要 VSG 对微网频率进行调节。而当微网运行在离网模式下时, 由于微网是一弱网系统, 为了维持微网的频率稳定, 此时 VSG 需具备一定的频率调节能力。故在 VSG 的有功指令 P_N 上叠加频率偏差反馈环节, 并定义

$$P_m = P_N + K_p(w_N - w) \quad (3)$$

式中: P_m 为 VSG 机械功率; K_p 为频率偏差比例系数, 则 VSG 的有功控制框图变为如图 4 所示。

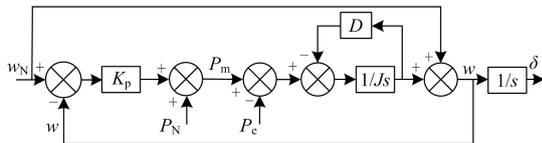


图 4 有功-频率控制框图

Fig. 4 Active power-frequency control block

从图 4 可以看出, 无论系统频率低于或高于额定频率时, 所设计的调频控制器都能使得 VSG 相应增加或减少功率输出, 从而能减小微网频率偏差, 但不能使微网频率恢复额定值。

由 VSG 转子运动方程式(1)可得出频率与功率的暂态关系:

$$w - w_N = \frac{P_N - P_e}{D + K_p} \left(1 - e^{-\frac{D+K_p}{J}t}\right) \quad (4)$$

则根据式(4), 功率变化量为 ΔP , 频率变化量为 Δw 时, 其频率偏差的动态过程如图 5 所示。

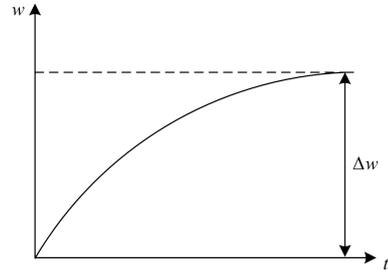


图 5 负荷突减时频率偏差的动态过程率调节

Fig. 5 Dynamic process of frequency deviation when a step reduction in load

由式(4)和图 5 可得出, 当 VSG 所带负荷减小时, VSG 频率的动态过渡时间由转动惯量 J 和阻尼系数 D 及比例系数 K_p 共同决定, 而阻尼系数 D 和调差系数 K_p 决定了稳态时系统频率的偏移程度。 D 和 K_p 越大, 稳态时频率的偏移程度越小, 同时考虑到系统的稳定性, D 和 K_p 不可能趋于无穷大, 因此 VSG 频率调节始终是有差的。

2.2 VSG 频率的无静差调节

为了消除 VSG 输出频率的偏差, 目前常用的控制策略是在 VSG 有功控制的频率偏差反馈环节或阻尼环中引入 PI 调节器, 借鉴 PI 调节器对于直流量能实现无静差跟踪特点, 实现频率的无差控制^[19-22]。此法虽然可行, 但对于多个 VSG 参与频率调节时, 脱离了系统中央控制器的通信, 各 VSG 的 PI 控制器初始状态以及 PI 参数的差异会导致各 VSG 输出功率不按各自容量成比例分配, 甚至会造成系统出现震荡。

因此本文提出了一种新的 VSG 频率偏差的补偿控制策略, 不需要借助于微网中央控制器的通信, 各 VSG 独立参与系统频率调节。由于 VSG 有功控制本质上是下垂控制, 根据下垂控制方程

$$f = f_N - m(P_o - P_N) \quad (5)$$

式中: P_N 和 P_o 分别对应 DG 的额定功率和输出功率; m 为下垂系数, 其表达式为

$$m = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{P_{o\max} - P_{o\min}} \quad (6)$$

则频率的补偿量可以由式(7)得来。

$$\Delta f_c = \left(\frac{P_o \cdot \frac{w_c}{s + w_c} - P_N}{P_{\text{omax}} - P_{\text{omin}}} \right) \cdot \Delta f = \left(P_o \cdot \frac{w_c}{s + w_c} - P_N \right) \cdot m \quad (7)$$

式中, w_c 对应一阶滤波器的截止频率, 由式(7)知下垂控制所产生的频率偏差主要由下垂系数和功率变化量的乘积所决定, 根据式(4)得, 稳态时, VSG 频率偏差与功率的关系式为

$$\Delta w = \frac{P_N - P_e}{D + K_p} \quad (8)$$

对比式(7)、式(8)知, 下垂控制的下垂系数 m 可以等效为

$$m = \frac{1}{D + K_d} \quad (9)$$

因此对于 VSG, 频率偏差量可以取为

$$\Delta w_c = \left(P_e \cdot \frac{w_c}{s + w_c} - P_N \right) \cdot \frac{1}{K_p + D} \quad (10)$$

式(10)可以进一步转化为

$$\Delta w_c = \left(w_N - w \cdot \frac{w_c}{s + w_c} \right) \quad (11)$$

式(11)可以进一步转化为

$$\Delta P_c = \Delta w_c \cdot (D + K_p) \quad (12)$$

式中, ΔP_c 为 VSG 补偿频率偏差所需的有功功率, 将式(12)有功功率补偿量叠加到 VSG 功频控制的输出有功功率上, 即可使 VSG 频率恢复到额定值, 则 VSG 的功频控制框图变为如图 6 所示。

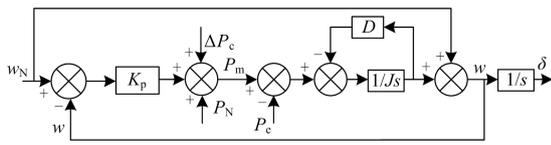


图 6 改进后的有功频率控制框图

Fig. 6 Improved active power-frequency control block

经过频率无差调节后, 式(8)可改写为

$$w - w_N = \frac{(P_N + \Delta P_c) - P_e}{D + K_p} \quad (13)$$

由于分布式电源调频容量的限制, 若使得微网频率能恢复到额定值, 负荷的功率不能超过分布式电源所能输出的最大功率, 即

$$\Delta P_c + P_N \leq P_{\text{max}} \quad (14)$$

式中, P_{max} 为分布式电源所能输出的最大功率。

2.3 VSG 功率分配策略

当微网中存在多台 VSG 并联时, 在各 VSG 都

参与微网频率调节时, 若各 VSG 输出功率能按各自额定容量成比例分配, 将会有利于微网整体经济运行。而对于本文所提出的控制策略, 在补偿微网频率偏差的同时, 不影响各 VSG 的功率分配。

以两台 VSG 并联为例, 根据式(8)可以看出, 若 $D_1=2D_2$, $K_{p1}=2K_{p2}$, $P_{N1}=2P_{N2}$, 由于稳态时两个 VSG 并联在一起, 稳态时有 $w_1-w_N=w_2-w_N$, 故可以得出

$$\begin{cases} (P_{N1} - P_{e1}) = 2(P_{N2} - P_{e2}) \\ P_{e1} = 2P_{e2} \end{cases} \quad (15)$$

即 VSG1 输出功率为 VSG2 输出功率的 2 倍, 这就是 VSG 并联实现负荷功率按额定容量分配的理论依据。当采用频率偏差补偿后, 根据式(4)频率与功率的暂态关系知, 当频率变化指数不相同, 暂态过程中, w_1 和 w_2 并不时刻相等, 因此稳定时无法保证式 $w_1-w_N=w_2-w_N$ 成立, 而上式(15)不成立, 即输出功率不按额定容量成比例分配。若两台 VSG 转动惯量满足 $J_1=2J_2$, 即满足下式:

$$\frac{D_1 + K_{p1}}{J_1} = \frac{D_2 + K_{p2}}{J_2} \quad (16)$$

则在面对负荷变化时, 两台 VSG 的频率变化暂态过程相同, 式 $w_1-w_N=w_2-w_N$ 成立, 即 VSG 能按各自额定容量分担负荷功率, 图 7 所示为多 VSG 共同参与微电网系统频率调节的整体控制策略框图, 整个过程不需要借助于通信系统即可实现负荷在多 VSG 之间的合理分配。

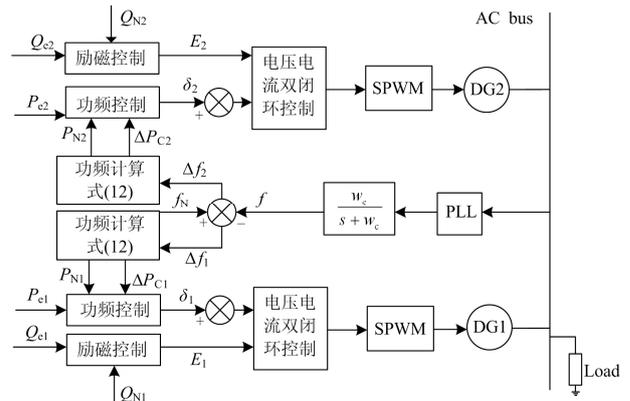


图 7 整体控制策略框图

Fig. 7 Overall control strategy diagram

由两台 VSG 并联的例子可知, 当多台 VSG 并联时, 为保证各 VSG 实现符合功率按额定容量分配, 需要各参数满足一定的关系。

当 n 台 VSG 并联时, 记 D_i 、 K_{pi} 、 P_{Ni} 、 ΔP_{Ci} 分别表示 VSG 各自对应的量, 则式(13)稳定时有

$$w - w_N = \frac{(P_{Ni} + \Delta P_{Ci}) - P_{ei}}{D_i + K_{pi}} \quad (17)$$

w 为 VSG 的系统输出角频率, 由此式(17)进一步可以转化为下式:

$$\frac{(P_{N1} + \Delta P_{C1}) - P_{e1}}{D_1 + K_{p1}} = \frac{(P_{N2} + \Delta P_{C2}) - P_{e2}}{D_2 + K_{p2}} = \dots = \frac{(P_{Nn} + \Delta P_{Cn}) - P_{en}}{D_n + K_{pn}} \quad (18)$$

假设各 VSG 的额定容量关系为

$$P_{N1} : P_{N2} : \dots : P_{Nn} = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_n \quad (19)$$

为了使各 VSG 能够按照额定容量分担负荷, $D + K_p$ 的取值应与 VSG 自身额定容量成比例, 即

$$(D_1 + K_{p1}) : (D_2 + K_{p2}) : \dots : (D_n + K_{pn}) = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_n \quad (20)$$

由式(18)、式(19)和式(20)得

$$(\Delta P_{C1} - P_{e1}) : (\Delta P_{C2} - P_{e2}) : \dots : (\Delta P_{Cn} - P_{en}) = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_n \quad (21)$$

由式(19)、式(20)和式(21)可知, 令各 ΔP_{Ci} 与 P_{Ni} 成比例, 即

$$\Delta P_{C1} : \Delta P_{C2} : \dots : \Delta P_{Cn} = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_n \quad (22)$$

此时由式(21)和式(22)可得

$$P_{e1} : P_{e2} : \dots : P_{en} = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_n \quad (23)$$

当各参数满足上述关系时, 各 VSG 即可按照自身额定容量成比例输出功率。

3 仿真结果分析

为验证本文所提出的 VSG 在实现微电网频率无静差调节方面的可行性, 以三台 VSG 并联运行为例, 在 PSCAD 仿真环境下搭建模型, 仿真模型主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	VSG1	VSG2	VSG3
额定容量/kVA	30	20	10
滤波电感 L/mH	3	3	3
滤波电容 C/ μ F	80	80	80
滤波电感等效电阻 R/ Ω	0.2	0.2	0.2
转动惯量 J/(kg/m ²)	1	2/3	1/3
阻尼系数 D/(N·m·s/rad)	30	20	10
调差系数 K_p	75	50	25
额定角速度 w_N /(rad/s)	314	314	314

3.1 有功负荷突增时 VSG 输出功率和频率波形

初始时刻负载功率为 56 kW, 2 s 时突增有功负荷 36 kW, 微网频率和输出功率波形, 如图 8 所示。

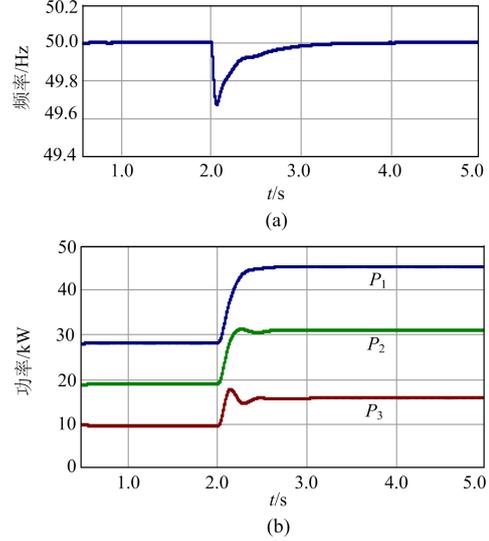


图 8 有功负荷增加时 VSG 输出频率和电压波形
Fig. 8 Output frequency and voltage waveform of VSG when active loads are increased

从图 8(a)和图 8(b)可以看出, 初始时刻, VSG1 输出功率为 27 kW, VSG2 输出功率为 19 kW, VSG3 输出功率为 10 kW, 与负荷功率平衡, 因此系统频率维持在额定值 50 Hz。2 s 时刻, 负荷功率突然增加, 由于 VSG 的频率偏差补偿环节来不及响应, 导致 VSG 输出功率与负荷功率不平衡, 系统频率开始下降到 47.6 Hz。

此后 VSG 的频率偏差补偿环节开始起作用, 各 VSG 独立采样系统频率, 将计算出的频率偏差送入到各自补偿环节。通过式(12)计算中所需要补偿的有功功率, 并将补偿的有功功率叠加到各 VSG 的输出功率中, 各 VSG 输出功率增加, 系统频率开始缓慢恢复到额定值。稳态时, VSG1 输出功率为 45 kW, VSG2 输出功率为 31 kW, VSG3 输出功率为 16 kW, 接近 3:2:1, 可以看出各 VSG 输出的功率始终根据自身额定容量成比例输出, 补偿的有功功率也按自身额定容量成比例增加。

3.2 有功负荷突减时输出功率频率波形

初始时刻负载功率为 56 kW, 2 s 时突减有功负荷 28 kW, 微网频率和输出功率波形, 如图 9 所示。

从图 9(a)和图 9(b)可以看出, 初始时刻, VSG1 输出功率为 27 kW, VSG2 输出功率为 19 kW, VSG3 输出功率为 10 kW, 与负荷功率平衡, 因此系统频率维持在额定值 50 Hz。2 s 时刻, 负荷功率突然减

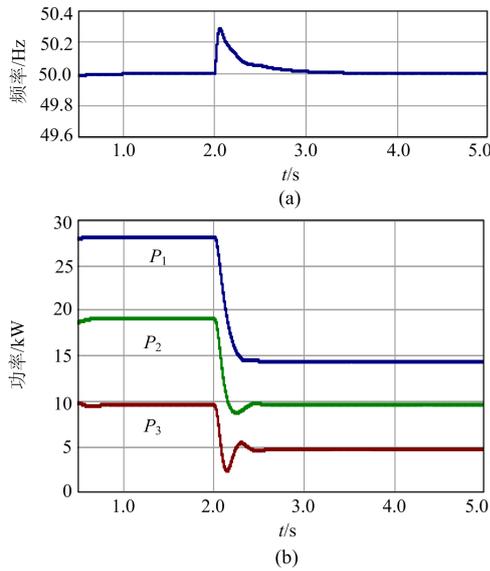


图9 有功负荷减小时VSG输出频率和电压波形
Fig. 9 Output frequency and voltage waveform of VSG when active loads are reduced

小, 由于VSG的频率偏差补偿环节来不及响应, 导致VSG输出功率大于负荷功率, 系统频率开始上升到50.3 Hz。

此后VSG的频率偏差补偿环节开始起作用, 各VSG独立采样系统频率, 将计算出的频率偏差送入到各自补偿环节, 通过式(12)计算中所需要补偿的有功功率, 此时补偿的有功功率为负值, 并将补偿的有功功率叠加到各VSG的输出功率中, 各VSG输出功率减小, 系统频率开始缓慢恢复到额定值。稳态时, VSG1输出功率为14 kW, VSG2输出功率为9 kW, VSG3输出功率为5 kW, 接近3:2:1, 可以看出各VSG输出的功率始终根据自身额定容量成比例输出, 补偿的有功功率也按自身额定容量成比例输出。

4 结论

针对传统VSG有功频率控制存在稳态频率偏差的问题, 本文提出了一种基于VSG的微网频率无差调节策略。通过频率偏差补偿环节, 微网离网运行时, 频率始终稳定在额定值。该策略还可应用于多台VSG组成的微网系统, 可使多个VSG共同参与频率调节, 始终将频率稳定在额定值, 同时还能根据自身额定容量分担负荷功率, 整个过程不需要借助于通信系统即可实现。最后搭建了VSG并联仿真模型, 仿真结果与所提控制策略相吻合。

参考文献

[1] 孙建龙, 窦晓波, 张子仲, 等. 直流对等式微电网混合

储能系统协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 194-202.

SUN Jianlong, DOU Xiaobo, ZHANG Zizhong, et al. DC peer-to-peer coordinated control strategy of hybrid energy storage system for microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 194-202.

[2] 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, HAO 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.

[3] 高怀正, 李华, 常兴, 等. 电压跌落下虚拟同步发电机故障穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 39-46.

GAO Huaizheng, LI Hua, CHANG Xing, et al. Fault ride-through of virtual synchronous generator under voltage drop[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 39-46.

[4] 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.

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.

[5] AKTARUJAMAN M, HAQUE M E, MUTTAQI K M, et al. Control stabilization of multiple distributed generation[C] // 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference, December 9-12, 2007, Perth, WA, Australia: 1-5.

[6] 陈新, 姬秋华, 刘飞. 基于微网主从结构的平滑切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 163-170.

CHEN Xin, JI Qiuhua, LIU Fei. Smooth transferring control method of microgrids based on master-slave configuration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 163-170.

[7] 芦思晨, 潘再平. 无储能风电微电网系统的下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 169-175.

LU Sichen, PAN Zaiping. Droop control strategy of wind power microgrid system without energy storage device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 169-175.

[8] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

[9] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. Control system

- tuning and stability analysis of virtual synchronous machines[C] // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, CO, USA: 2664-2671.
- [10] ASHABANI S M, MOHAMED Y A I. A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using nonlinear microgrid stabilizer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1291-1301.
- [11] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.
MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.
- [12] 梁英, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 基于同步逆变器的微电网二次调频策略及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 391-402.
LIANG Ying, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Secondary frequency regulation strategies and characteristic analysis of synchronverter-based microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 391-402.
- [13] CADY S T, ZHOLBARYSSOV M, DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D, et al. A distributed frequency regulation architecture for islanded inertialess AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(6): 1961-1977.
- [14] YAO J, YU M, GAO W, et al. Frequency regulation control strategy for PMSG wind-power generation system with flywheel energy storage unit[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1082-1093.
- [15] 徐诚, 刘念, 赵泓, 等. 基于电力系统二次调频原理的微电源频率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 14-20.
XU Cheng, LIU Nian, ZHAO Hong, et al. A novel frequency control strategy of micro-grid based on the secondary frequency regulation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 14-20.
- [16] 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.
- [17] ACHARYA S, MOURSI M S E, HINAI A A. Coordinated frequency control strategy for an islanded microgrid with demand side management capability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 639-651.
- [18] 赵晋泉, 邓晖, 吴小辰, 等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-9.
ZHAO Jinquan, DENG Hui, WU Xiaochen, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 1-9.
- [19] CASSOLA F, BURLANDO M. Wind speed and wind energy forecast through Kalman filtering of numerical weather prediction model output[J]. Applied Energy, 2012, 99: 154-166.
- [20] 莫槟滔, 陈峦, 井实, 等. 基于 NCD 优化的光-火微网频率控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 14-20.
MO Bintao, CHEN Luan, JING Shi, et al. Research on frequency control for solar-thermal microgrid based on NCD[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 14-20.
- [21] RODRIGUEZ-DIAZ E, VASQUEZ J, GUERRERO J. Intelligent DC homes in future sustainable energy systems: when efficiency and intelligence work together[J]. Consumer Electronics Magazine IEEE, 2016, 5(1): 74-80.
- [22] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.

收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2019-01-21

作者简介:

谢卫才(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究生导师, 研究方向为电力系统控制与保护, 微网技术, 特种电机及控制; E-mail: xieweicaiweicai@163.com

王世豪(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统保护与控制。

(编辑 葛艳娜)