

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231112

孤岛微电网多虚拟同步发电机频率无差协调控制策略

王自力^{1,2}, 陈燕东^{1,3}, 李雪萍¹, 罗聪¹, 符有泽¹, 王海宁¹, 傅家骏¹

(1. 电能高效高质转化全国重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082; 2. 湖南第一师范学院, 湖南长沙 410082;
3. 湖南大学深圳研究院, 广东深圳 518000)

摘要: 传统虚拟同步发电机的频率控制为有差控制, 且虚拟惯量的引入使得虚拟同步发电机呈现二阶振荡特性, 导致孤岛微电网多虚拟同步发电机并联系统在受到负荷扰动时面临频率偏移和有功超调的问题。针对此, 提出了一种多虚拟同步发电机频率无差协调控制方法。该方法包含了兼具有功精确分配的频率无差调节控制和阻尼改进控制两部分, 通过利用母线频率全局一致的“通信”效果, 以分散式的形式协调系统内各台虚拟同步发电机, 可主动消除微电网频率稳态偏差且实现各台虚拟同步发电机按照容量承担负荷有功功率, 并抑制系统的有功超调。最后, 通过仿真和实验验证了所提控制方法的有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 频率偏移; 无差调节; 有功精确分配; 有功超调

Coordinated control strategy for frequency deviation-free regulation of multiple VSGs in an island microgrid

WANG Zili^{1,2}, CHEN Yandong^{1,3}, LI Xueping¹, LUO Cong¹, FU Youze¹, WANG Haining¹, FU Jiajun¹

(1. State Key Laboratory of High-Efficiency and High-Quality Conversion for Electric Power (Hunan University), Changsha 410082, China; 2. Hunan First Normal University, Changsha 410082, China;
3. Shenzhen Research Institute, Hunan University, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The frequency control of the traditional virtual synchronous generator (VSG) is differential control, and the introduction of virtual inertia causes the VSG to exhibit a second-order oscillatory characteristic, leading to the issues of frequency deviation and active power overshoot when subjected to load disturbances in an island microgrid. To address these issues, a frequency deviation-free coordination control method for multiple VSGs is proposed, one which includes two parts: frequency deviation-free regulation control with precise active power allocation and damping improvement control. By using the “communication” effect generated from a globally consistent bus frequency, the proposed control method coordinates the various VSGs within the system in a decentralized manner, actively eliminating microgrid frequency steady-state deviation, ensuring that each VSG shares the active power load according to its capacity, and suppressing the active power overshoot. Finally, the effectiveness of the proposed control method is verified through simulation and experiment.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077070).

Key words: virtual synchronous generator; frequency offset; deviation-free regulation; active power sharing; active power overshoot

0 引言

当微电网孤岛运行时, 由于缺乏大电网支撑,

其高度电力电子化、低惯量、弱阻尼特性愈发凸显^[1-3], 孤岛微电网的电压和频率面临着失稳的风险, 其中频率稳定性问题更为突出。为增加孤岛微电网的惯量以及阻尼水平, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generation, VSG)技术应运而生^[4-6]。VSG通过模拟同步电机的动态特性使新能源逆变器具备同步机的惯性和阻尼等优良特性, 为了提高

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077070); 中央引导地方科技发展资金—深圳虚拟大学园自由探索类基础研究项目资助(2021Szvup038)

新能源消纳能力和提升孤岛微电网运行稳定性提供了全新的思路。然而,目前传统 VSG 频率控制只是模拟了同步发电机的一次调频过程,本质上属于有差调频,不具备使频率恢复的二次调频功能。当发生较大的负荷扰动时,孤岛微电网频率可能会出现大幅偏移甚至越界的问题,严重影响系统中频率敏感负荷的正常运行,甚至可能导致系统不稳定^[7]。

针对基于VSG的微电网一次调频存在频率偏移的问题,国内外不少学者在微电网一次调频的研究基础上,开展了微电网二次调频的研究。文献[8]提出一种VSG的二次频率控制策略,但是未考虑多VSG之间有功均匀分配问题。文献[9]通过引入延时开关的方法来切换控制器,实现微电网频率恢复和有功均分。但是延时开关的设计较为复杂,且严重依赖于事件触发的精确性,具有较大的局限性。文献[10]提出一种基于二阶线性自抗扰的VSG频率二次调节策略,然而二阶线性自抗扰控制器设计复杂,也未考虑多机之间有功均匀分配的问题。

基于通信的二次调频控制方案主要可以分为集中式和分布式两类。文献[11]提出了一种基于集中式的微电网频率二次调节方法,实现微电网频率的无差调节。然而集中式控制需要微电网中央控制器,且存在通信负担大、可扩展性弱等问题,通信故障可能会导致系统失稳甚至崩溃。相比于集中控制,分布式控制仅需相邻节点之间通信,能减小通信负担。文献[12]提出一种基于虚拟同步发电机的特高压直流输电系统双端换流站控制策略。文献[13]提出一种基于一致性算法的多VSG微电网频率二次调节控制方法,然而并未考虑VSG之间有功均分问题。文献[14-15]提出一种基于一致性协议的分布式二次频率调节控制方法,在消除微电网频率偏差的同时保证有功功率按比例分配。为了进一步减轻通信负担,文献[16]基于频率一致性方法设计了事件触发机制,实现了微电网频率的恢复。文献[17]提出了一种用于频率补偿的改进一致性算法,基于频率误差越限规则设计了事件触发机制,实现了微电网系统二次调频。然而上述方法也都需依赖通信来实现控制目的。

为摆脱对通信的依赖,有学者提出了以分散式的方式实现频率的二次调节。文献[18]提出一种多同步逆变器共同参与的无通信二次调频策略,但是该方法的运算量大、比较复杂。文献[19]提出了一种基于二次型最优控制和一致性算法的方法,然而需要求解复杂的二次调节优化方程,计算负担较重。文献[20]提出了一种用于孤岛微电网的无通信频率恢复控制方法,然而所提方法严重依赖于事件检测

的精度,鲁棒性不佳。文献[21]提出了含VSG的微电网二次调频策略,实现微电网频率恢复和有功均分,但无法抑制VSG输出有功超调,无法优化系统暂态过程中VSG的有功功率特性。文献[22]提出一种多虚拟同步发电机的自适应二次调频策略,实现系统频率无差调节和有功均分,但是也无法实现对系统功率超调的有效抑制。

综上所述,本文提出一种VSG并联频率无差协调控制策略,通过在VSG有功控制环中引入二次调频项和阻尼改进项,在无通信的前提下,多个VSG自主协调配合,可主动消除微电网频率稳态偏差,实现各台VSG按照自身容量比例均匀承担负荷有功功率,并且能够有效抑制负荷扰动过程中VSG输出有功功率的超调,从而改善负荷扰动过程中VSG并联系统输出有功功率的动态特性。通过仿真和实验验证了所提方法的有效性。

1 VSG 电路拓扑及控制方法

图1为典型VSG拓扑及控制结构。

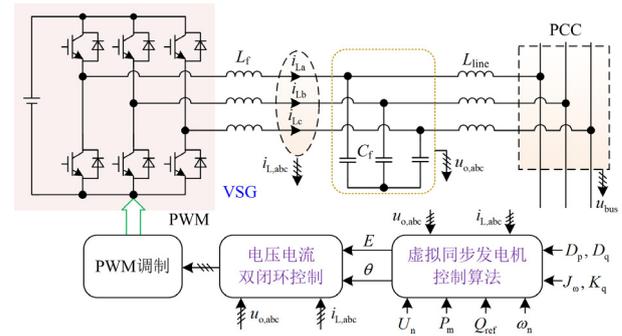


图1 典型VSG拓扑及控制结构

Fig. 1 Typical VSG topology and control structure

图1中: L_f 和 C_f 分别为滤波电感和滤波电容; L_{line} 为线路阻抗; $u_{o,abc}$ 为输出电容端的三相电压; $i_{L,abc}$ 为逆变器侧输出的三相电流; u_{bus} 为交流母线三线电压; J_o 为惯性系数; D_p 、 D_q 分别为VSG的阻尼系数和无功下垂系数; P_m 、 Q_{ref} 分别为VSG的机械功率和无功功率指令值; K_q 为无功惯性系数; U_n 为额定电压; E 为VSG电动势的幅值; θ 为VSG的相位。

传统VSG控制算法如图2所示。其中: P_e 、 Q_e 分别为VSG输出的瞬时有功功率和无功功率,可以根据瞬时功率理论计算得到^[23]; ω_n 、 ω 分别为VSG角频率额定值和输出值; U_o 为输出电压的有效值。

由图2可得VSG有功环和无功环的控制方程如式(1)所示。

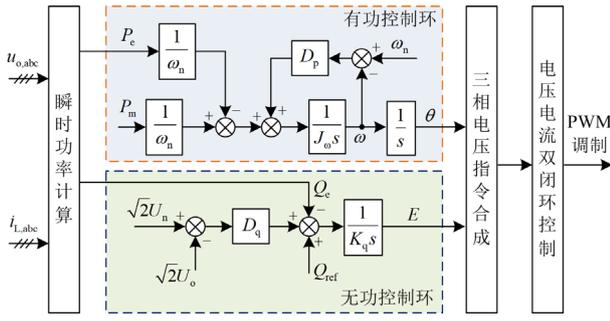


图2 传统VSG控制算法

Fig. 2 Traditional control algorithm of VSG

$$\begin{cases} \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_c}{\omega_n} + D_p(\omega_n - \omega) = J_\omega \frac{d\omega}{dt} \\ Q_{ref} - Q_e + \sqrt{2}D_q(U_n - U_o) = K_q \frac{dE}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

2 传统VSG有功控制环存在的问题

2.1 稳态频率偏差问题

由式(1)可得VSG所带负荷功率变化时VSG输出角频率 $\omega(t)$ 的表达式，如式(2)所示。

$$\omega(t) = \omega_n - \frac{\Delta P_{load}}{D_p \omega_n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{D_p t}{J_\omega}}\right) \quad (2)$$

式中： ΔP_{load} 表示负荷变化量； t 表示时间。

根据式(2)，VSG角频率的稳态偏差 $\Delta\omega(t)$ 可表示为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta\omega(t)| = \lim_{t \rightarrow \infty} |\omega(t) - \omega_n| = \frac{\Delta P_{load}}{D_p \omega_n} \neq 0 \quad (3)$$

因此传统VSG的频率调节为有差调节，即遭受负荷扰动后频率无法恢复到额定值。

2.2 有功功率超调的机理

虚拟惯量的引入使得VSG有功控制环呈现二阶振荡特性，在孤岛微电网中，VSG并联系统更容易出现有功超调的问题，这甚至可能会导致VSG过流。两台VSG并联组网的等效电路如图3所示。

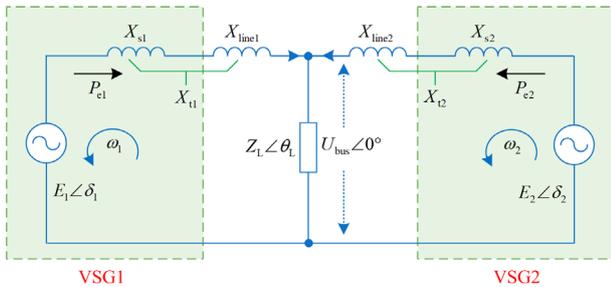


图3 VSG并联系统等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of VSG parallel system

图3中： E_1 和 E_2 分别表示VSG1和VSG2输出电压的幅值； δ_1 和 δ_2 分别表示VSG1和VSG2的功角； ω_1 和 ω_2 分别表示VSG1和VSG2输出角频率； X_{s1} 和 X_{s2} 分别表示VSG1和VSG2的自身输出阻抗； X_{line1} 和 X_{line2} 分别表示VSG1和VSG2的线路阻抗，且 $X_{line1} = sL_{line1}$ ， $X_{line2} = sL_{line2}$ ，其中 s 表示拉普拉斯算子； $Z_L \angle \theta_L$ 表示负载阻抗； X_{i1} 和 X_{i2} 分别表示VSG1和VSG2支路的总等效阻抗，其表达式分别为： $X_{i1} = X_{s1} + X_{line1}$ ， $X_{i2} = X_{s2} + X_{line2}$ 。

为了简化分析，可认为两台VSG的惯性系数和阻尼系数相等，即 $J_{\omega 1} = J_{\omega 2}$ ， $D_{p1} = D_{p2}$ ，线路阻抗呈感性，且两台VSG的相位差很小，可近似认为 $\sin(\delta_1 - \delta_2) = \delta_1 - \delta_2$ ， $\cos(\delta_1 - \delta_2) = 1$ 。

因此，每台VSG输出功率的小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta P_{e1} = \frac{3E_1E_2}{X_{i1}X_{i2}M} \sin(\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1) \sin\theta_M \\ \Delta P_{e2} = \frac{3E_1E_2}{X_{i1}X_{i2}M} \sin(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \sin\theta_M \end{cases} \quad (4)$$

式中： $M \angle \theta_M = \frac{1}{X_{i1} \angle 90^\circ} + \frac{1}{X_{i2} \angle 90^\circ} + \frac{1}{Z_L \angle \theta_L}$ ；符号

“ Δ ”表示物理量的小信号表达式。

结合式(1)和式(4)，并以 $\Delta\omega = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_2$ 和 $\Delta\delta = \Delta\delta_1 - \Delta\delta_2$ 作为状态变量，可得VSG并联组网系统的状态方程，如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_p}{J_\omega} & \frac{6E_1E_2 \sin\theta_M}{J_\omega \omega_n X_{i1}X_{i2}M} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， $\Delta\dot{\omega}$ 、 $\Delta\dot{\delta}$ 分别表示 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\delta$ 的导数。

由式(5)可得在不同 J_ω 的情况下 D_p 变化时VSG并联组网系统的闭环极点分布，如图4所示。

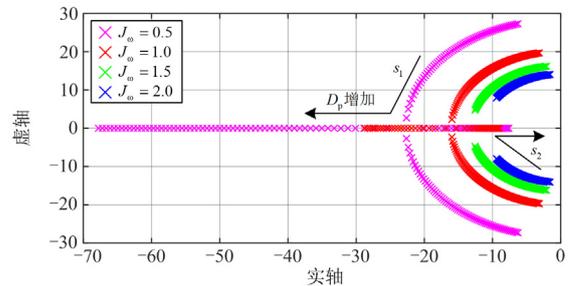


图4 VSG并联系统的闭环极点分布图

Fig. 4 Closed-loop pole distribution diagram of VSG parallel system

从图4可知，当 J_ω 不变时，随着 D_p 的增加， s_1 和 s_2 均往靠近负实轴方向移动，并最终变成两个不

同的负实数极点, 表明随着 D_p 的增加, 系统阻尼越大, 越能有效抑制动态过程中系统输出有功超调。当 D_p 保持不变时, J_ω 越大, 闭环极点越靠近虚轴, 表明系统的阻尼越小, 动态过程中系统输出有功功率超调越大, 而较小的 J_ω 却不利于系统频率的稳定。然而, 为了兼顾系统频率的稳定性且不影响系统的稳态特性, 不宜通过直接调整 VSG 的 J_ω 和 D_p 来抑制系统动态过程中的有功超调。

3 VSG 并联频率无差协调控制策略

本文所提控制策略的整体控制框图如图 5 所示。

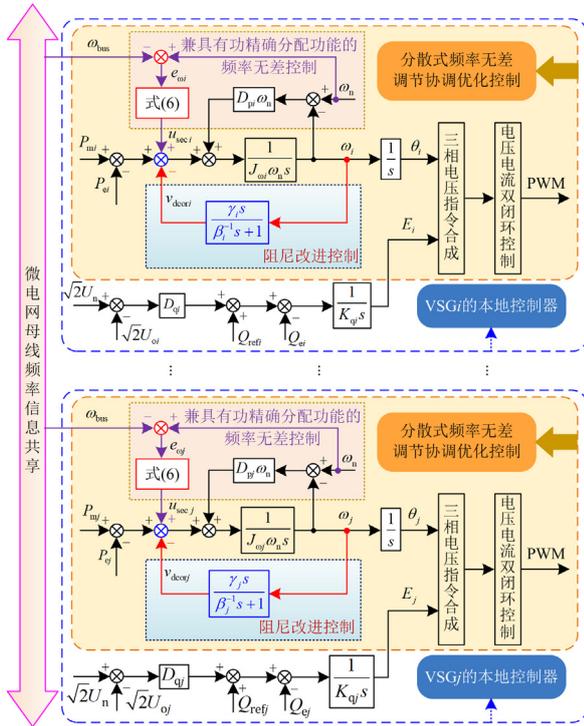


图 5 所提控制策略的整体控制框图

Fig. 5 Overall control diagram of the proposed control strategy

图 5 中: ω_{bus} 表示微电网母线角频率; u_{seci} 、 u_{secj} 分别表示第 VSGi 和 VSGj 的二次调频项; e_{oi} 、 e_{oj} 分别表示 VSGi、VSGj 的额定角频率和母线角频率之差; v_{dcori} 、 v_{dcorj} 分别表示第 VSGi 和 VSGj 的阻尼改进项。

由图 5 可知, 本文所提控制策略由兼具有功功率精确分配功能的频率无差控制和阻尼改进控制两部分组成。控制策略为典型的分散式控制, 仅需在微电网中共享母线频率信息, 不需要任何通信, 系统各台 VSG 能够自主协调有功出力, 实现系统频率恢复控制与 VSG 输出有功功率的精确分配。

3.1 兼具有功精确分配功能的 VSG 频率无差控制机理分析

在图 5 中, $u_{sec} = u_{fsec} \omega_n$, 二次调频附加项 u_{fsec} 可以表示为

$$u_{fsec} = a \int (e_\omega - bu_{fsec}) dt \quad (6)$$

其中

$$e_\omega = \omega_n - \omega_{bus}$$

式中, a 和 b 均为常数。

根据图 5, 当采用本文所提控制策略时, VSG 的有功-频率特性可以表示为

$$\frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} + D_p(\omega_n - \omega) + \frac{u_{sec}}{\omega_n} + \frac{v_{dcor}}{\omega_n} = J_\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

因为在稳态时阻尼改进控制项 v_{dcor} 不起作用(下文中会解释), 且稳态时各台 VSG 的频率均和母线频率相等, 因此根据式(6)和式(7), 在稳态时可得

$$e_\omega = \frac{P_m - P_e}{J_\omega \omega_n s + \frac{a\omega_n}{s+ab} + D_p \omega_n} = \frac{P_m - P_e}{\omega_n (D_p + 1/b)} \quad (8)$$

若 $0 < b \ll 1$, 且令 $b = b/D_p$, 则根据式(8)可以进一步得到

$$e_\omega = \omega_n - \omega_{bus} = \frac{P_m - P_e}{\omega_n (D_p + 1/b)} \approx \frac{P_m - P_e}{\omega_n D_p / b} \approx 0 \quad (9)$$

因此稳态时 $e_\omega = 0$, 即 $\omega_{bus} = \omega_n$, 表明所提方法能使微电网母线频率恢复到额定值。

3.2 VSG 阻尼改进机理分析

增加 VSG 的阻尼系数虽然能抑制有功超调, 但是改变阻尼系数会影响 VSG 的稳态性能。而传统的二次调频控制本质是对每台 VSG 有功功率指令进行校正, 无法有效改善负荷扰动期间系统的阻尼^[19], 因此传统的二次调频控制也面临着 VSG 输出有功超调的问题。

针对此, 为有效解决负荷扰动过程中 VSG 输出有功功率超调大的问题, 本文引入阻尼改进控制, 可以表示为

$$v_{dcor} = \frac{\gamma s}{\beta^{-1} s + 1} \omega = \frac{\gamma}{\beta^{-1}} \frac{\beta^{-1} s}{\beta^{-1} s + 1} \omega = k_{dco} \frac{\beta^{-1} s}{\beta^{-1} s + 1} \omega \quad (10)$$

式中: γ 、 k_{dco} 均表示常数; β^{-1} 表示时间常数。

根据式(10)可知, 阻尼改进控制项 v_{dcor} 由 ω 经过时间常数为 β^{-1} 的高通滤波器后再乘以 k_{dco} 得到。其实质为在 VSG 有功控制环中补偿一个负荷扰动过程中才存在的阻尼功率, 改善 VSG 的暂态阻尼特性, 提升系统对有功超调的抑制能力, 且不会影响 VSG 的稳态特性。

改变 k_{dco} 时所提控制和传统 VSG 控制的特征根

轨迹,如图6所示。相比传统VSG控制方法,所提控制方法能提高系统阻尼,并且 k_{do} 越大,提供的阻尼也越大。

改变 β 时所提控制和传统VSG控制的特征根轨迹,如图7所示。可看出 β 对系统阻尼的影响较小。事实上,因为 β^{-1} 为滤波器的时间常数,因此 β 的调节范围不大。

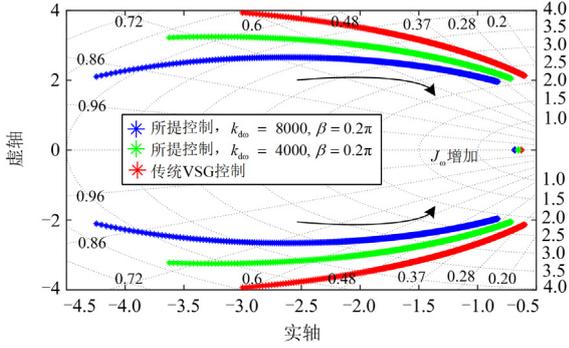


图6 改变 k_{do} 时所提控制和传统VSG控制的特征根轨迹
Fig. 6 Characteristic root trajectories of the proposed control and traditional VSG control when changing k_{do}

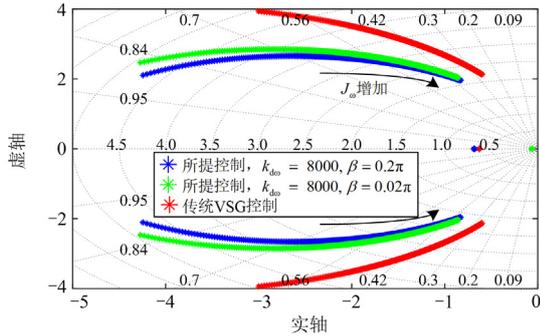


图7 改变 β 时所提控制和传统VSG控制的特征根轨迹
Fig. 7 Characteristic root trajectories of the proposed control and traditional VSG control when changing β

3.3 VSG 并联频率无差协调控制策略

引入参数 μ ,若令 $b=c\mu^{-1}$,其中 c 为常数,则式(9)可改写为

$$e_{\omega} = \omega_n - \omega_{\text{bus}} = \frac{P_m - P_e}{\omega_n(D_p + 1/b)} = \frac{P_m - P_e}{\omega_n(D_p + \mu/c)} \quad (11)$$

稳态时微电网频率全局一致,因此可得

$$e_{\omega_i} = \frac{P_{mi} - P_{ei}}{\omega_n(D_{pi} + \mu_i/c_i)} = \frac{P_{mj} - P_{ej}}{\omega_n(D_{pj} + \mu_j/c_j)} = e_{\omega_j} \quad (12)$$

式中, μ_i 、 c_i 和 μ_j 、 c_j 分别表示VSG i 、VSG j 调频控制中所用的常数。

若 $\mu_i = D_{pi}$,则

$$e_{\omega_i} = \frac{P_{mi} - P_{ei}}{\omega_n D_{pi}(1+1/c_i)} = \frac{P_{mj} - P_{ej}}{\omega_n D_{pj}(1+1/c_j)} = e_{\omega_j} \quad (13)$$

若 $0 < c_i \ll 1$ 且 $c_i = c_j$,则 $e_{\omega_i} = e_{\omega_j} \approx 0$ 。

且通常阻尼系数的取值与VSG容量成正比,即

$$P_{mi} : P_{mj} = D_{pi} : D_{pj} \quad (14)$$

因此根据式(13)可以得到

$$\frac{P_{ei}}{D_{pi}(1+1/c_i)} = \frac{P_{ej}}{D_{pj}(1+1/c_j)} \quad (15)$$

将式(15)拓展到多个VSG并联系统,可得

$$P_{e1} : \dots : P_{en} = D_{p1}(1+1/c_1) : \dots : D_{pn}(1+1/c_n) \quad (16)$$

因为 $c_1 = c_2 = \dots = c_n$,则式(16)可以改写为

$$P_{e1} : \dots : P_{en} = D_{p1} : \dots : D_{pn} \quad (17)$$

假设VSG的额定容量之比为

$$P_{m1} : \dots : P_{mi} : \dots : P_{mn} = \chi_1 : \dots : \chi_i : \dots : \chi_n \quad (18)$$

通常阻尼系数 D_p 与VSG容量的比例关系为

$$P_{m1} : \dots : P_{mi} : \dots : P_{mn} = D_{p1} : \dots : D_{pi} : \dots : D_{pn} \quad (19)$$

因此结合式(17)~式(19),可得

$$P_{e1} : \dots : P_{ei} : \dots : P_{en} = \chi_1 : \dots : \chi_i : \dots : \chi_n \quad (20)$$

综上所述,所提控制方法同时实现了微电网频率恢复和有功功率精确分配。

3.4 稳定性分析

为研究所提方法对系统稳定性的影响,建立了3台VSG并联系统的小信号模型,如图8所示。

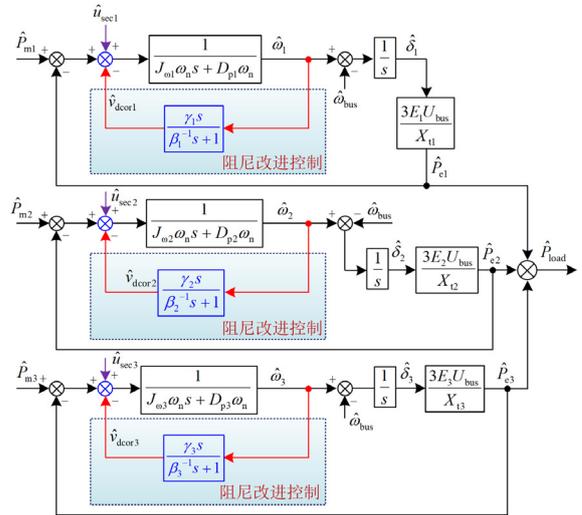


图8 采用所提控制时VSG并联系统小信号模型
Fig. 8 Small signal model of VSG parallel system when using the proposed control

令 $J_i = J_{oi}\omega_n$, $D_i = D_{pi}\omega_n$,则式(7)可改写为

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} + D_i(\omega_n - \omega_i) - \frac{\gamma_i s \omega_i}{\beta_i^{-1} s + 1} + u_{\text{sec}i} \quad (21)$$

式中: γ_i 表示 VSG i 阻尼改进控制中的参数; β_i^{-1} 表示 VSG i 阻尼改进控制中的时间常数; ω_i 表示 VSG i 输出角频率。

根据能量守恒式(22)成立

$$K_1\hat{\delta}_1 + K_2\hat{\delta}_2 + K_3\hat{\delta}_3 = \hat{P}_{\text{load}} \quad (22)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_3 分别表示 VSG1、VSG2 和 VSG3 的同步系数; $\hat{\delta}_1$ 、 $\hat{\delta}_2$ 、 $\hat{\delta}_3$ 分别表示 VSG1、VSG2 和 VSG3 的功角变化量; \hat{P}_{load} 表示负荷功率变化量。

因此系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (23)$$

式中: \mathbf{x} 为系统状态变量; \mathbf{y} 为系统输出变量; \mathbf{u} 为系统的输入变量; $\dot{\mathbf{x}}$ 为系统状态变量的导数; $\dot{\mathbf{y}}$ 为系统输出变量的导数; \mathbf{A} 为系统矩阵; \mathbf{B} 为控制矩阵; \mathbf{C} 为输出矩阵; \mathbf{D} 为直接传递矩阵。矩阵 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{D} 的表达式见附录 A。

系统矩阵 \mathbf{A} 如式(24)所示。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 & \mathbf{A}_4 \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中, 矩阵 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 、 \mathbf{A}_3 和 \mathbf{A}_4 的表达式见附录 A。

系统的状态变量、输入变量、输出变量分别如式(25)一式(27)所示。

$$\mathbf{x} = [\hat{\omega}_1 \quad \hat{\omega}_2 \quad \hat{\omega}_3 \quad \hat{\delta}_1 \quad \hat{\delta}_2 \quad \hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \hat{x}_3 \quad \hat{x}_{b11} \quad \hat{x}_{b12} \quad \hat{x}_{b13} \quad \hat{x}_{b21} \quad \hat{x}_{b22} \quad \hat{x}_{b23} \quad \hat{x}_{b31} \quad \hat{x}_{b32} \quad \hat{x}_{b33}] \quad (25)$$

$$\mathbf{u} = [\hat{P}_{m1} \quad \hat{P}_{m2} \quad \hat{P}_{m3} \quad \hat{P}_{\text{load}}] \quad (26)$$

$$\mathbf{y} = [\hat{\omega}_1 \quad \hat{\omega}_2 \quad \hat{\omega}_3 \quad \hat{P}_{e1} \quad \hat{P}_{e2} \quad \hat{P}_{e3}] \quad (27)$$

式中: 符号“ \wedge ”表示该物理量的变化量; 其中,

$$\hat{x}_i = \frac{k_{\text{doi}}\beta_i^{-1}\hat{\omega}_i}{\beta_i^{-1}s+1} = \frac{k_{\text{doi}}T_{\text{oi}}\hat{\omega}_i}{T_{\text{oi}}s+1}, \quad \hat{x}_{bij} = \frac{a_i\hat{\omega}_j}{s+a_ib_i}, \quad i, j = 1, 2, 3.$$

图 9 表示 a 从 10 增加到 40 000 时系统的主导极点图。可见如果 a 继续增大, 系统极点可能会跨越虚轴向着右半平面移动, 导致系统不稳定。

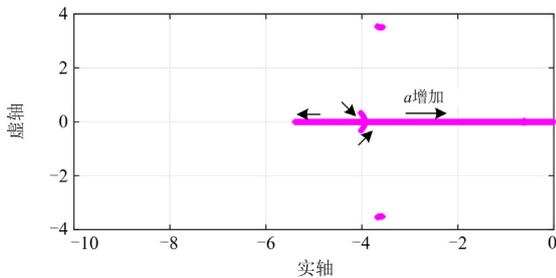


图 9 a 变化时系统主导极点分布图

Fig. 9 Distribution of the dominant poles when a changes

当 b 从 $\times 10^{-5}$ 增加到 $\times 10^{-2}$ 时系统的主导极点图如图 10 所示。可见随着 b 继续增大, 系统主导极点有进入右半平面的风险。事实上, 在保持系统稳定的前提下, a 和 b 的选取裕度是比较大的, 按照 3.3 节的理论分析设计不同 VSG 的参数 a 、 b 即可。

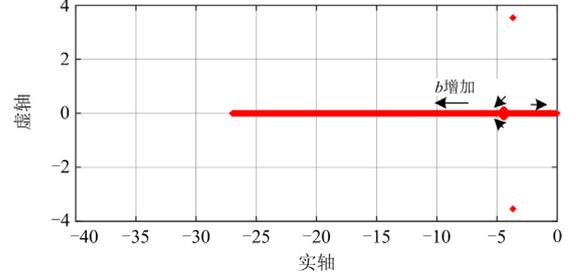


图 10 b 变化时系统的主导极点分布图

Fig. 10 Distribution of the dominant poles when b changes

当 k_{doi} 从 0 增加到 8000 时系统的主导极点分布图如图 11 所示。随着 k_{doi} 的增加, 极点 p_1 、 p_2 不断靠近负实轴, 最终在负实轴上汇集, 并最终变成两个互不相等的负实极点, 表明随着 k_{doi} 增加, 系统阻尼增大。

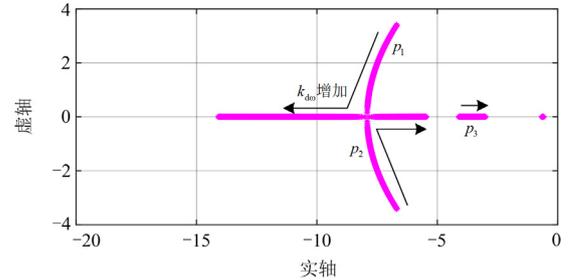


图 11 k_{doi} 变化时系统的主导极点分布图

Fig. 11 Distribution of the dominant poles when k_{doi} changes

如图 12 所示, 在 k_{doi} 相同的情况下, β 取不同值时系统的阻尼基本相同, 这同样表明 β 对系统阻尼的影响较小, 系统的阻尼主要受 k_{doi} 的影响。事实上, β 不能选择过小, 因为过小的 β 意味着较大的延时, 这会对系统的稳定性带来不利影响; β 也不能选择过大, 过大的 β 无法形成对有功超调有效抑制。综上所述, 本文 β 选取为 0.63。

由于阻尼改进项不会影响系统的稳态特性, 因此 k_{doi} 的取值可以不需要按照 VSG 额定容量成比例, 为简化分析, 令 3 个 VSG 的 k_{doi} 都相等。图 13 表示 k_{doi} 分别为 0、2000、4000 和 8000, J_{oi} 从 1 增加到 50 时系统特征根的轨迹图。在 J_{oi} 相同的情况下, 随着 k_{doi} 的增加, p_1 、 p_2 离虚轴越远, 表明随

着 k_{do} 的增加, 系统阻尼增大。因此可通过增大 k_{do} 来增加系统阻尼, 从而抑制系统有功超调。尽管越大的 k_{do} 越有利于抑制有功功率超调, 但是在实际应用中, 过大的 k_{do} 会导致采样噪声放大, 不利于系统的稳定。综合上述几个方面考虑, 本文中 k_{do} 取值为 6000。

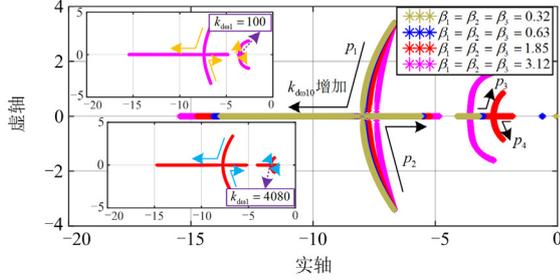


图 12 β 取值不同的情况下 k_{do} 变化时系统主导极点分布图

Fig. 12 Distribution of the system dominant poles when k_{do} changes with different β

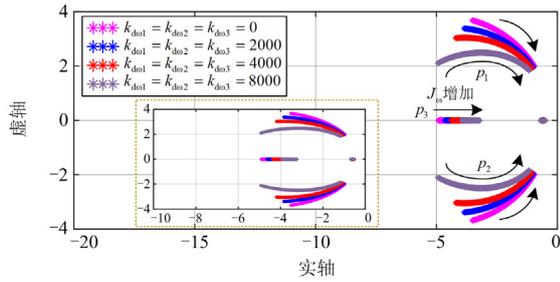


图 13 k_{do} 取值不同的情况下 J_o 变化时系统主导极点分布图

Fig. 13 Distribution of the system dominant poles when J_o changes with different k_{do}

4 仿真验证

为验证本文所提控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建了 3 台 VSG 并联仿真模型, 并分别进行了传统 VSG 控制策略、传统二次调频控制策略和本文所提控制策略的仿真对比, 系统的主要仿真参数如表 1 所示。

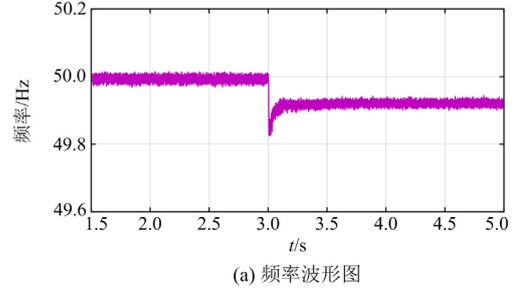
表 1 系统主要参数

Table 1 Main parameters of the system

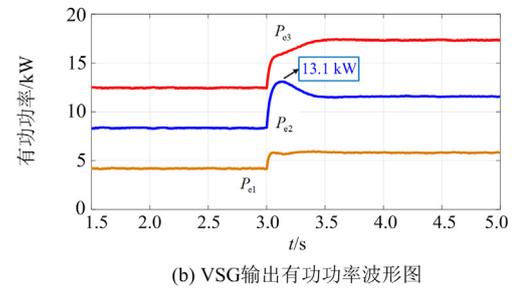
参数	VSG1	VSG2	VSG3
额定容量/kVA	10	20	30
转动惯量 J_o	1	1	1
阻尼系数 D_p	30	60	90
二次调频控制参数 a	300	600	900
二次调频控制参数 b	$10^{-4}/30$	$10^{-4}/60$	$10^{-4}/90$
阻尼改进控制参数 β	0.63	0.63	0.63
阻尼改进控制参数 k_{do}	6000	6000	6000

4.1 有功负荷突增时微电网频率和有功功率波形

仿真中, 3 s 时有功负荷突增 10 kW。如图 14(a)所示, 当采用传统 VSG 控制时, 微电网频率存在稳态偏差。从图 14(b)可看出, VSG2 输出有功功率 P_{e2} 存在较大超调, 峰值功率为 13.1 kW, 超调量为 12.9%。



(a) 频率波形图



(b) VSG输出有功功率波形图

图 14 负荷突增时采用传统 VSG 控制时仿真波形图

Fig. 14 Simulation results when using traditional VSG control when load increases suddenly

当采用传统二次调频控制时, 如图 15 所示, 微电网频率能够恢复到额定值, 然而 VSG2 输出有功功率 P_{e2} 依旧存在较大超调, 其峰值功率为 13.08 kW。

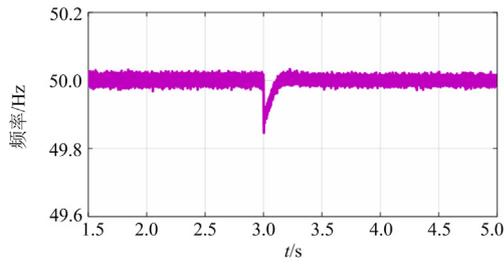
当采用本文所提控制方法时, 如图 16(a)所示, 微电网频率在遭受系统扰动后会恢复到额定值。如图 16(b)所示, 有功超调降低到 4.3%, 3 台 VSG 输出有功功率能平滑过渡到新的稳态。

上述对比说明, 所提控制策略在实现微电网二次无差调频和有功精确分配的同时, 能够抑制负载突变期间 VSG 输出有功功率超调。

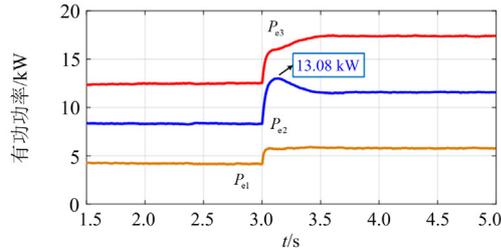
4.2 有功负荷突减时微电网频率和有功功率波形

3 s 时有功负荷突减 10 kW。采用传统 VSG 控制时, 如图 17 所示, 系统频率存在稳态偏差, 且 VSG2 和 VSG3 出力不均衡, 均无法平滑过渡到稳态。

当采用传统二次调频控制时, 如图 18(a)所示, 微电网频率能够恢复到额定值。然而, 从图 18(b)可以看出, VSG2 和 VSG3 输出有功功率均未平滑过渡到稳态, 负荷突变情况下各台 VSG 输出有功功率的动态性能一般, 无法平滑过渡到稳态。

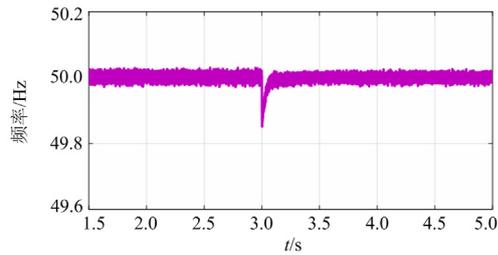


(a) 频率波形图

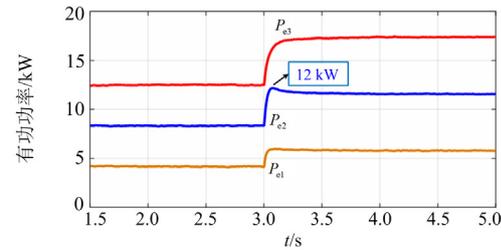


(b) VSG输出有功功率波形图

图 15 负荷突增时采用传统二次调频控制时仿真波形图
Fig. 15 Simulation waveforms when using traditional secondary frequency regulation control when load increases suddenly

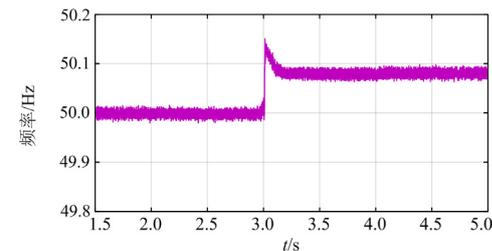


(a) 频率波形图

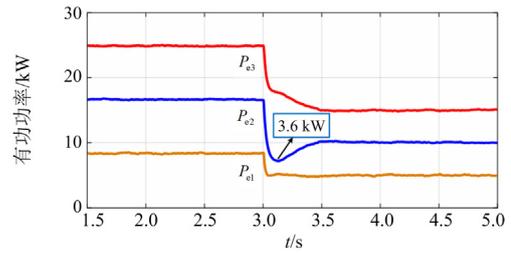


(b) VSG输出有功功率波形图

图 16 负荷突增时采用所提控制时仿真波形图
Fig. 16 Simulation waveforms when using proposed control method when load increases suddenly

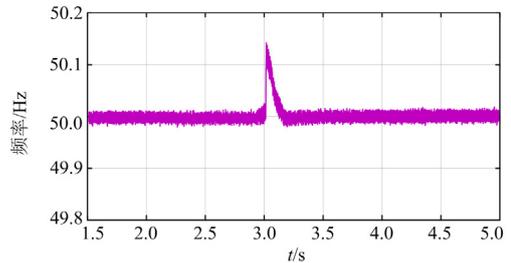


(a) 频率波形图

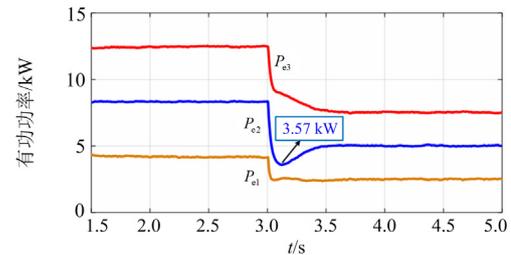


(b) VSG输出有功功率波形图

图 17 负荷突减时采用传统 VSG 控制时仿真波形图
Fig. 17 Simulation waveforms when using traditional VSG control when load reduces suddenly



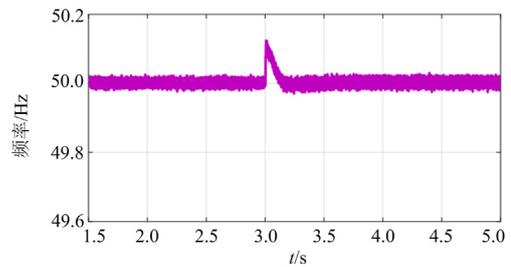
(a) 频率波形图



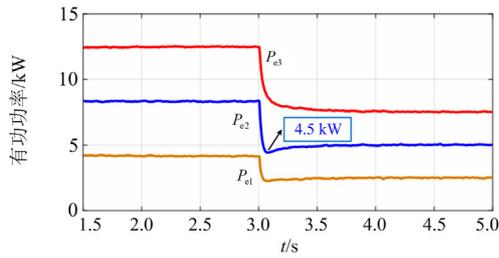
(b) VSG输出有功功率波形图

图 18 负荷突减时采用传统二次调频控制时仿真波形图
Fig. 18 Simulation waveforms when using traditional secondary frequency regulation method when load reduces suddenly

当采用本文所提控制方法时, 如图 19(a)所示, 微电网频率能恢复到额定值。如图 19(b)所示, 3 台 VSG 输出有功功率之比为 1:2:3, 实现了有功精确分配, 并且 VSG1、VSG2、VSG3 输出有功功率都会平滑过渡到稳态, 表明所提方法能改善负荷突变期间各台 VSG 输出有功功率的动态特性。



(a) 频率波形图



(b) VSG输出有功功率波形图

图 19 负荷突减时采用所提控制时仿真波形图

Fig. 19 Simulation waveforms when using proposed control method when load reduces suddenly

5 实验验证

为了进一步验证所提控制方法的有效性，搭建了 3 台 VSG 并联的实验平台，进行实验验证。图 20 表示有功负荷突增时未采用所提控制时微电网母线电压实验波形。可看出当有功负荷突增时，微电网频率为 49.5 Hz，偏离了额定值。

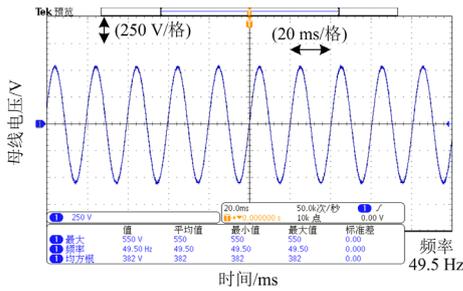


图 20 负荷突增情况下未采用所提控制时微电网线电压实验波形

Fig. 20 Experimental waveform of microgrid line voltage without the proposed control method when load increases suddenly

在负荷突增情况下，当采用所提控制方法时，微电网母线电压实验波形如图 21 所示，此时微电网频率为 50 Hz，实现了微电网频率的恢复。

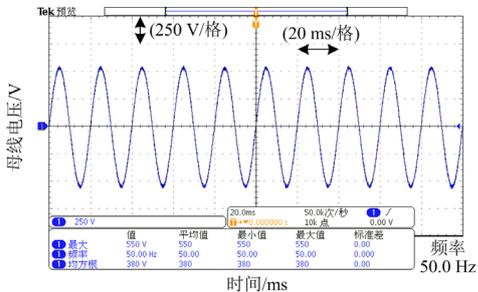


图 21 负荷突增情况下采用所提控制时微电网线电压实验波形

Fig. 21 Experimental waveform of microgrid line voltage with the proposed control method when load increases suddenly

此时 VSG 输出电流的实验波形如图 22 所示。可看出 VSG1、VSG2 和 VSG3 输出电流均能平滑过渡到稳态，且达到稳态时 3 台 VSG 输出电流比例约为 1:2:3，说明每台 VSG 能够在参加二次调频的同时还能按照自身额定容量去承担负荷功率。

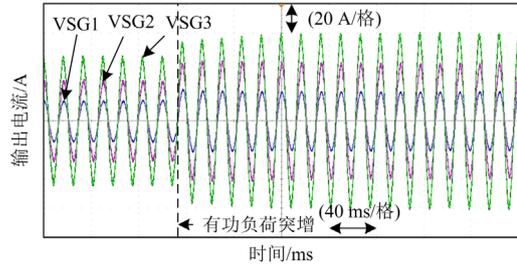


图 22 负荷突增情况下采用所提控制时 VSG 输出电流实验波形

Fig. 22 Experimental waveform of output currents of VSG with the proposed control method when load increases suddenly

图 23 表示有功负荷突减时未采用所提控制时微电网母线电压实验波形。由图 23 可知，此时微电网频率为 50.3 Hz，偏离额定值。

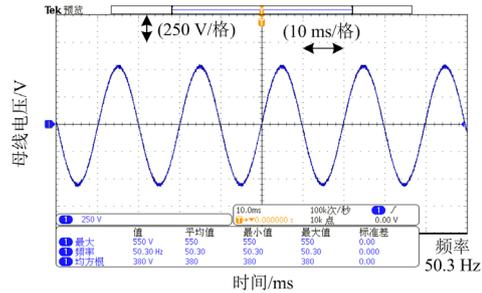


图 23 负荷突减情况下未采用所提控制时微电网线电压实验波形

Fig. 23 Experimental waveform of microgrid line voltage without the proposed control method when load reduces suddenly

当有空负荷突减时，采用所提控制方法的微电网线电压实验波形如图 24 所示，微电网频率恢复为 50.0 Hz。

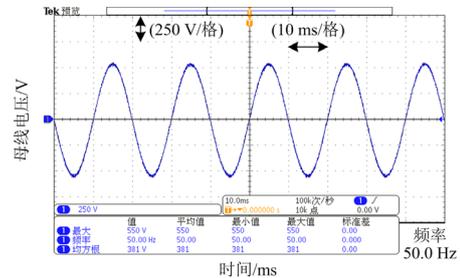


图 24 负荷突减情况下采用所提控制时微电网线电压实验波形

Fig. 24 Experimental waveform of microgrid line voltage with the proposed control method when load reduces suddenly

50 Hz, 实现了微电网频率的无差调节。图 25 表示有功负荷突减时 VSG 输出电流实验波形。可以看出在负荷突减时, 3 台 VSG 输出电流均减小且都能平滑过渡到稳态, 3 台 VSG 输出电流比例依然接近 1:2:3, 说明所提控制也适用于有功负荷突减的工况。

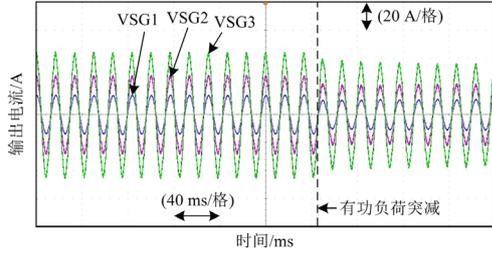


图 25 有功负荷突减时 VSG 输出电流实验波形图

Fig. 25 Experimental waveform of output currents of VSG with the proposed control method when load reduces suddenly

6 结论

针对传统 VSG 控制频率有差调节以及负荷突变过程中孤岛微电网 VSG 并联系统输出有功功率超调的问题, 提出了孤岛微网中多虚拟同步发电机频率无差协调控制策略。可得到如下结论:

1) 通过分散式二次调频协调控制, 微电网各 VSG 按照自身容量成比例共同承担微电网频率恢复所需有功功率, 无需通信即可实现孤岛微电网频率恢复和有功功率精确分配;

2) 通过将阻尼改进项加载到 VSG 有功控制环进行阻尼改进, 不同 VSG 之间阻尼改进控制相互支撑, 在不影响系统稳态特性的前提下, 可主动有效抑制负荷突变过程中的 VSG 输出有功超调。

附录 A

矩阵 B 、 C 和 D 分别如式(A1)一式(A3)所示。

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_3} & -\frac{1}{J_3} \\ \mathbf{0}_{14 \times 1} & \mathbf{0}_{14 \times 1} & \mathbf{0}_{14 \times 1} & \mathbf{0}_{14 \times 1} \end{bmatrix} \quad (A1)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 11} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ -K_1 & -K_2 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 11} \\ \mathbf{0}_{11 \times 3} & \mathbf{0}_{11 \times 3} & \mathbf{0}_{11 \times 11} \end{bmatrix} \quad (A2)$$

$$D = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{5 \times 1} & \mathbf{0}_{5 \times 1} & \mathbf{0}_{5 \times 1} & \mathbf{0}_{5 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \mathbf{0}_{11 \times 1} & \mathbf{0}_{11 \times 1} & \mathbf{0}_{11 \times 1} & \mathbf{0}_{11 \times 1} \end{bmatrix} \quad (A3)$$

矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 的表达式分别如式(A4)一式(A7)所示。

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{D_1 + k_{d\omega 1}}{J_1} & 0 & 0 & -\frac{K_1}{J_1} & 0 & \frac{\beta_1}{J_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_2 + k_{d\omega 2}}{J_2} & 0 & 0 & -\frac{K_2}{J_2} & 0 & \frac{\beta_2}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{D_3 + k_{d\omega 3}}{J_3} & \frac{K_1}{J_3} & \frac{K_2}{J_3} & 0 & 0 & \frac{\beta_3}{J_3} \\ \frac{K_2 + K_3}{K_1 + K_2 + K_3} & -\frac{K_2}{K_1 + K_2 + K_3} & -\frac{K_3}{K_1 + K_2 + K_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_1}{K_1 + K_2 + K_3} & \frac{K_1 + K_3}{K_1 + K_2 + K_3} & -\frac{K_3}{K_1 + K_2 + K_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{d\omega 1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_{d\omega 2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_{d\omega 3} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_3 \end{bmatrix} \quad (A4)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -K_1/J_1 & -K_2/J_1 & -K_3/J_1 \\ \sum_{m=1}^3 K_m & \sum_{m=1}^3 K_m & \sum_{m=1}^3 K_m \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -K_1/J_2 & -K_2/J_2 & -K_3/J_2 \\ \sum_{m=1}^3 K_m & \sum_{m=1}^3 K_m & \sum_{m=1}^3 K_m \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -K_1/J_3 & -K_2/J_3 & -K_3/J_3 \\ \sum_{m=1}^3 K_m & \sum_{m=1}^3 K_m & \sum_{m=1}^3 K_m \\ \mathbf{0}_{6 \times 3} & \mathbf{0}_{6 \times 3} & \mathbf{0}_{6 \times 3} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (A5)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -a_1 b_1 & 0 & 0 \\ 0 & -a_1 b_1 & 0 \\ 0 & 0 & -a_1 b_1 \end{bmatrix} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \begin{bmatrix} -a_2 b_2 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 b_2 & 0 \\ 0 & 0 & -a_2 b_2 \end{bmatrix} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \begin{bmatrix} -a_3 b_3 & 0 & 0 \\ 0 & -a_3 b_3 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 b_3 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (A6)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 \end{bmatrix} & \mathbf{O}_{3 \times 6} \\ \begin{bmatrix} a_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 \end{bmatrix} & \mathbf{O}_{3 \times 6} \\ \begin{bmatrix} a_3 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix} & \mathbf{O}_{3 \times 6} \end{bmatrix} \quad (A7)$$

参考文献

- [1] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [2] 张运, 姜望, 张超, 等. 基于储能荷电状态的主从控制微电网离网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 180-187.
ZHANG Yun, JIANG Wang, ZHANG Chao, et al. Off-grid coordinated control strategy of a master/slave control microgrid based on the state of charge of energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 180-187.
- [3] 马文忠, 邵宇阳, 王玉生, 等. 面向新能源接入的电能路由器模式切换协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 52-61.
MA Wenzhong, TAI Yuyang, WANG Yusheng, et al. Mode switching coordination control strategy of an electrical energy router for new energy access[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 52-61.
- [4] 孙佳航, 王小华, 黄景光, 等. 基于 MPC-VSG 的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 51-60, 81.
SUN Jiahang, WANG Xiaohua, HUANG Jingguang, et al. MPC-VSG based control strategy for dynamic stability of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 51-60, 81.
- [5] 余威, 杨欢红, 焦伟, 等. 基于优劣解距离算法的光储配电网自适应虚拟惯性控制策略[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(10): 1317-1324.
YU Wei, YANG Huanhong, JIAO Wei, et al. Adaptive virtual inertial control strategy of optical storage and distribution network based on TOPSIS algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(10): 1317-1324.
- [6] 方仍存, 雷何, 杨东俊, 等. 变流器辅助换流的柔性切换开关拓扑与控制[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 43-49, 123.
FANG Rengcun, LEI He, YANG Dongjun, et al. A converter-assisting flexible switch topology and its control strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 43-49, 123.
- [7] 蒋小亮, 李元臣, 郝元钊, 等. 计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 169-176.
JIANG Xiaoliang, LI Yuanchen, HAO Yuanzhao, et al. Evaluation of power system equivalent inertia considering new energy virtual inertia[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 169-176.
- [8] 阳建, 刘勇, 盘宏斌, 等. 基于虚拟同步机的微网逆变器无频差控制[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2001-2008.
YANG Jian, LIU Yong, PAN Hongbin, et al. Method of frequent deviation-free control of microgrid inverter based on virtual synchronous generator control[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2001-2008.
- [9] 洪灏灏, 顾伟, 潘静, 等. 具有延时开关特性的多 VSG 微电网频率恢复控制策略[J]. 供用电, 2019, 36(4): 18-23.
HONG Haohao, GU Wei, PAN Jing, et al. Frequency

- recovery control strategies with delayed switching characteristics for microgrid with multiple VSG units[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(4): 18-23.
- [10] 葛胜升, 王鹏, 施凯. 基于二阶线性自抗扰的虚拟同步发电机二次调频控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(10): 81-88.
GE Shengsheng, WANG Peng, SHI Kai. Secondary frequency modulation control of virtual synchronous generator based on second-order linear active disturbance rejection control[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(10): 81-88.
- [11] 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.
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.
- [12] 郭小龙, 张江飞, 亢朋朋, 等. 含基于PI控制受端二次调频的特高压直流虚拟同步控制策略[J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 66-72.
GUO Xiaolong, ZHANG Jiangfei, KANG Pengpeng, et al. Virtual synchronization control strategy for UHVDC with secondary frequency modulation based on PI control[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 66-72.
- [13] 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.
- [14] SIMPSON-PORCO J W, SHAFIEE Q, DORFLER F, et al. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(11): 7025-7038.
- [15] KIM Y S, KIM E S, MOON S I. Distributed generation control method for active power sharing and self-frequency recovery in an islanded microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(1): 544-551.
- [16] MOHAMMADI K, AZIZI E, CHOI J, et al. Asynchronous periodic distributed event-triggered voltage and frequency control of microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4524-4538.
- [17] 董家伟, 龚春阳, 包俊, 等. 事件触发改进一致性算法的孤岛运行多逆变器微电网系统分布式二次调频方法[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-14[2023-09-12]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222048.
DONG Jiawei, GONG Chunyang, BAO Jun, et al. Event-triggered improved consensus algorithm distributed secondary frequency regulation of multi-inverter microgrid systems with islanded operation[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-14[2023-09-12]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222048.
- [18] 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.
- [19] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Decentralized optimal frequency control in autonomous microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2345-2353.
- [20] REY J M, MARTÍ P, VELASCO M, et al. Secondary switched control with no communications for islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(11): 8534-8545.
- [21] 涂春鸣, 杨义, 兰征, 等. 含多虚拟同步机的微电网二次调频策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(10): 2186-2195.
TU Chunming, YANG Yi, LAN Zheng, et al. Secondary frequency regulation strategy in microgrid based on VSG[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(10): 2186-2195.
- [22] ZHANG Qian, LI Yan, DING Zhuwei, et al. Self-adaptive secondary frequency regulation strategy of micro-grid with multiple VSGs[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(5): 6007-6108.
- [23] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Electronics*, 2011, 58(4): 1259-1267.

收稿日期: 2023-08-29; 修回日期: 2023-11-21

作者简介:

王自力(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网运行与控制; E-mail: ziliwang@hnu.edu.cn

陈燕东(1979—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电系统建模与控制、微电网技术、特种电源技术; E-mail: yandong_chen@hnu.edu.cn

李雪萍(1993—), 女, 博士研究生, 研究方向为新能源发电、风电场优化控制。

(编辑 张颖)