

基于农村电网光伏台区的微电网控制策略研究

杨茂朕¹, 嵇仁君², 汤新宇³, 马一鸣⁴, 姜茂林⁵, 张雨若²

(1. 国网淮安供电公司, 江苏 淮安 223001; 2. 国网扬州供电公司, 江苏 扬州 225100; 3. 江苏国信扬州发电有限公司, 江苏 扬州 225100; 4. 国家电投集团江苏新能源有限公司, 江苏 南京 210008; 5. 国网南通供电公司海门区供电分公司, 江苏 南通 226142)

摘要: 针对高比例可再生能源接入与高比例电力电子设备应用现状, 光储微电网运行时缺少阻尼和惯性, 易导致母线电压、系统频率波动较大等问题, 提出一种模拟传统同步发电机运行外特性的虚拟同步发电机(VSG)控制方式, 将虚拟惯性、阻尼引入变流器控制环节中, 提升系统鲁棒性。首先, 将下垂控制和VSG控制进行对比分析, 对VSG工作原理进行数学推导并详细介绍建模过程; 其次, 建立并离网状态下小信号模型并绘制系统根轨迹, 对VSG参数选取进行稳定性分析; 随后, 研究转动关系和阻尼系数等关键参数对系统运行特性产生的影响; 最后, 在MATLAB/Simulink中仿真对比下垂控制和VSG控制的动态响应过程。结果表明, VSG控制下的母线电压、系统频率波动更小且弹性更强, 有效提升了运行稳定性。

关键词: 光储微电网; 虚拟同步电动机; 下垂控制; 逆变器控制策略

Research on microgrid control strategy based on rural power grid photovoltaic substation area

YANG Maozhen¹, JI Renjun², TANG Xinyu³, MA Yiming⁴, JIANG Maolin⁵, ZHANG Yuruo²

(1. State Grid Huaian Power Supply Company, Huai'an 223001, China; 2. State Grid Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225100, China; 3. Jiangsu Guoxin Yangzhou Power Generation Co., Ltd., Yangzhou 225100, China; 4. State Power Investment Corporation Jiangsu New Energy Co., Ltd., Nanjing 210008, China; 5. State Grid Nantong Power Supply Company Haimen District Power Supply Branch, Nantong 226142, China)

Abstract: In response to the current situation of high proportion of renewable energy access and high proportion of power electronic equipment application, the lack of damping and inertia in the operation of photovoltaic microgrids can easily lead to large fluctuations in bus voltage and system frequency. This paper proposes a virtual synchronous generator (VSG) control method that simulates the external characteristics of traditional synchronous generator operation. Virtual inertia and damping are introduced into the inverter control link to improve system robustness. Firstly, compare and analyze Droop Control and VSG Control, mathematically derive the working principle of VSG, and provide a detailed introduction to the modeling process; Secondly, establish a small signal model under off grid conditions and draw the system root trajectory to conduct stability analysis on the selection of VSG parameters; Subsequently, the influence of key parameters such as rotational relationship and damping coefficient on the power and frequency characteristics of the system was studied; Finally, the dynamic response processes of droop control and VSG control were simulated and compared in MATLAB/Simulink. The results indicate that under VSG control, the bus voltage and system frequency have smaller fluctuations and stronger elasticity, effectively improving operational stability.

Keywords: photovoltaic storage microgrid; virtual synchronous generator; droop control; inverter control strategy

式中, u_{abc} 为逆变器三相电压; i_{abc} 为逆变器三相电流; i_f 为模拟励磁电流; E_0 为空载电动势幅值。

式 (1) 给出了输出电压与空载电动势之间的数学关系, 也介绍了励磁电流与电动势幅值的联系。同时在等式两侧乘以常数项 $\omega_0 M_f$, 可得

$$\omega_0 M_f i_f = \omega_0 M_f i_{f0} + \omega_0 M_f \Delta i_f \quad (2)$$

将空载电动势数学表达式结合式 (2) 可得

$$E_0 = \frac{E_{s0} + \Delta E_s}{\omega_0} \omega = \frac{E_s}{\omega_0} \omega \quad (3)$$

为了在VSG控制方式中呈现传统同步发电机的励磁调节过程, 本文在VSG控制策略中加入一阶惯性环节, 使其励磁响应过程更加贴合同步发电机工作模式, 因此VSG控制本体模型如图2所示。

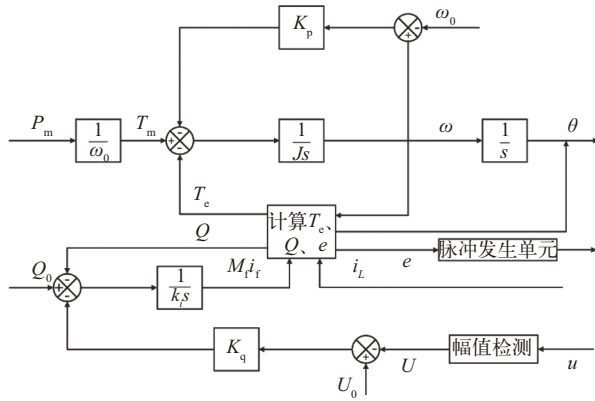


图2 VSG控制本体模型

Fig. 2 VSG control ontology model

VSG控制策略的核心部分是虚拟励磁控制器和虚拟转速控制器。虚拟励磁控制器模拟同步发电机的调压功能, 虚拟转速控制器参考同步发电机的调频功能, 因此, VSG本体模型模拟的是同步发电机的机电运行特性。该控制方式各模块相互配合, 使光储微电网能够展示出与同步发电机输出特性一致的运行状态。

VSG虚拟转速环节的数学模型为

$$K_p (\omega^* - \omega) + P_0 = P_m \quad (4)$$

式中, K_p 为有功-频率下垂系数; ω 为转子实际角速度; ω^* 为转子参考角速度; P_0 为有功功率参考值; P_m 为机械功率。

带有虚拟转速控制环节的VSG下垂曲线,

不仅具有普通下垂控制的运行特性, 还具有实现系统功率调配的应用功能。结合式 (2) ~ 式 (4), VSG有功-环节控制结构框图如图3所示。

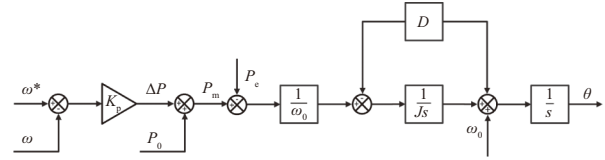


图3 VSG有功环节控制结构框图

Fig. 3 VSG active power control structure diagram

同步发电机可通过调整励磁电流大小改变系统无功功率输出, 且二者呈现线性正比例关系。当微电网频率一定时, 系统端电压近似于发电机感应电动势幅值大小。因此, 可以通过调整端电压幅值大小改变励磁电流, 以维持无功功率的输出平衡。

VSG控制下, 励磁电流表达式为

$$i_f = G(s)(U_{ref} - U) \quad (5)$$

一次调频下垂关系为

$$U_{ref} = U_n + \frac{1}{K_q} (Q_{ref} - Q) \quad (6)$$

式中, K_q 为VSG无功-电压下垂系数。

联立式 (5)、式 (6) 可得

$$i_f = \frac{G(s)}{K_q} [K_q (U_n - U) + (Q_{ref} - Q)] \quad (7)$$

在VSG控制技术中, 无功环节可将励磁电流等效为系统电压幅值, 保证输出电压能够无静差跟踪参考电压。本文选取积分调节器作为控制器件, VSG无功-电压控制环可表示为

$$E = \frac{1}{K_s} [K_q (U_n - U) + (Q_{ref} - Q)] \quad (8)$$

VSG无功环节控制结构框图如图4所示。

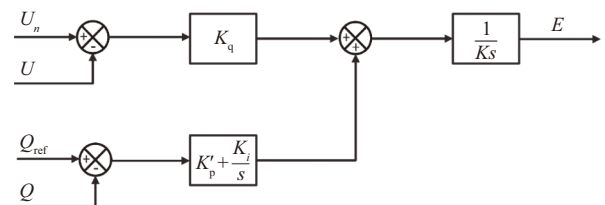


图4 VSG无功环节控制结构框图

Fig. 4 VSG reactive power control structure diagram

2 VSG控制策略参数判定

2.1 VSG稳定性分析

建立VSG正常工况下的等效模型，如图5所示，本文在该模型基础上对VSG控制的关键参数进行稳定性分析。

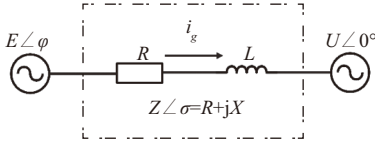


图5 VSG 简化等效模型

Fig. 5 VSG simplifies the equivalence model

图5中， $E\angle\varphi$ 为VSG输出电压； i_g 为VSG输出电流； $U\angle 0^\circ$ 为电网电压， $R+jX$ 为线路等效阻抗。

由图5可知，VSG输出电流为

$$i_g = \frac{E\angle\varphi - U\angle 0^\circ}{Z\angle\sigma} = \frac{E\cos\varphi - U + jE\sin\varphi}{R + jX} \quad (9)$$

进一步对式（9）推导VSG输出复功率，可得

$$\begin{aligned} S &= P + jQ \\ &= \frac{RUE\cos\varphi + UEX\sin\varphi - U^2R}{R^2 + X^2} + \\ &\quad j \frac{U^2X - UEX\cos\varphi + UER\sin\varphi}{R^2 + X^2} \end{aligned} \quad (10)$$

对式（10）进行线性化简，可得

$$\begin{cases} \Delta P = \frac{\partial P}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial P}{\partial E} \Delta E = K_{11} \Delta \varphi + K_{12} \Delta E \\ \Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial Q}{\partial E} \Delta E = K_{21} \Delta \varphi + K_{22} \Delta E \end{cases} \quad (11)$$

其中

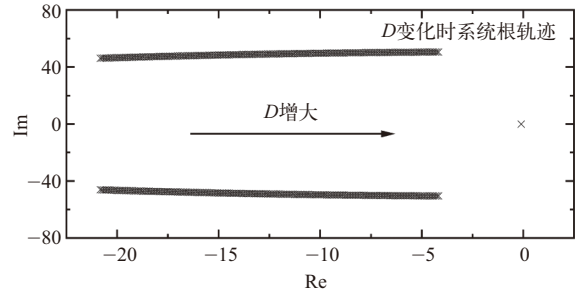
$$\begin{aligned} K_{11} &= \frac{UEX\cos\varphi - RUE\sin\varphi}{R^2 + X^2} \\ K_{12} &= \frac{RU\cos\varphi + UX\sin\varphi}{R^2 + X^2} \\ K_{21} &= \frac{UEX\sin\varphi + UER\cos\varphi}{R^2 + X^2} \\ K_{22} &= \frac{UR\sin\varphi - UX\cos\varphi}{R^2 + X^2} \end{aligned} \quad (12)$$

令 $x = (\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta E)^\top$ ，联立式（9）～式（11），且 $s\Delta\varphi(s) = \Delta\omega(s)$ ，可知VSG小信号模

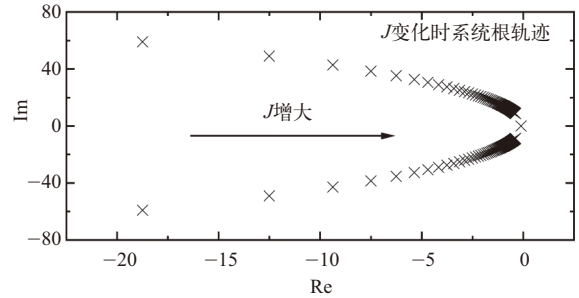
型为

$$\dot{x} = AX = \begin{pmatrix} -\frac{D}{J} & -\frac{K_{11}}{J} & -\frac{K_{12}}{J} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_p K_{21}}{1 + K_p K_{22}} & -\frac{(D_q + K_i) K_{21}}{1 + K_p K_{22}} & -\frac{(D_q + K_i) K_{22}}{1 + K_p K_{22}} \end{pmatrix} x \quad (13)$$

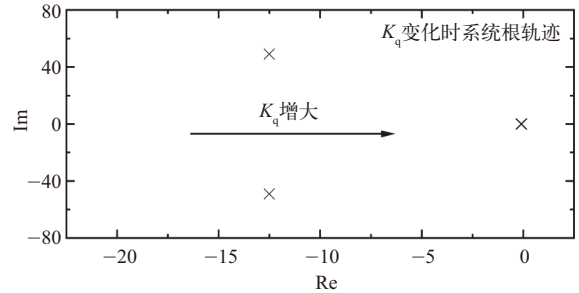
VSG正常运行时，其输出的暂态响应特性受转动惯量 J 、阻尼系数 D 、无功环节下垂系数 K_q 的影响较多。因此，对上述三种关键参数绘制根轨迹，对系统稳定性影响开展定性分析，如图6所示。



(a) $J=0.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $K_q=2 \times 10^{-4}$, $D=5\sim 30 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$



(b) $D=25 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $K_q=2 \times 10^{-3}$, $J=0.2\sim 25 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$



(c) $J=0.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $D=15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $K_q=2 \times 10^{-4}\sim 2 \times 10^{-2}$

图6 VSG 关键参数变化时系统根轨迹

Fig. 6 The root trajectory of the system when the key parameters of VSG change

由图6a可知，当 J 和 K_q 保持固定，且 D 增大时，VSG特征值实部绝对值增加，虚部减小，调节时间缩短，鲁棒性随之增强；由图6b可知，

当 D 和 K_q 保持固定,且 J 变大时,极点向虚轴靠近,此时VSG动态响应性能下降,调节时间增加,VSG稳定裕度降低;由图6c可知,当 J 、 D 保持固定,且 K_q 变化时,VSG共轭极点不随参数大小变化而变化,说明 K_q 取值大小对VSG稳定性影响较小。

2.2 转动惯量对VSG动态运行特性分析

将VSG虚拟转速环节等效为SG转子结构,根据刚体力学对转动惯量进行定量分析,可知转动惯量的表达式为

$$J=mr^2 \quad (14)$$

式中, m 为转子质量; r 为转子半径。

此时,转子储存的动能为

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (15)$$

由式(15)可知,转动惯量 J 是常数,当负载产生波动时,VSG转子动能上会产生偏差量,此时的能量差值为

$$\Delta E = \frac{1}{2} (J \omega_2^2 - J \omega_1^2) \quad (16)$$

式中, ω_1 为扰动前的VSG角频率; ω_2 为扰动后的VSG角频率。

当动能偏差量 ΔE 恒定时,转动惯量和VSG角频率偏差量成反比。若能对 J 进行控制则可实现对VSG角频率的调整。整理式(16)可得

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d \quad (17)$$

当 $T_m - T_e - T_d$ 一定时,VSG角频率变化率与 J 成反比,证明在VSG动态响应过程中,转动惯量可以减缓大扰动产生的系统冲击,抑制系统频率的波动量,有效提升VSG频率稳定性。

为进一步验证上述理论分析的可靠性,假设系统在0.4 s时增加5 kW负载,0.7 s时将负载切除,此时 $D=21 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$,改变转动惯量 J 的大小,此时VSG频率响应特性如图7所示。

由图7可知,在VSG中引入转动惯量 J 之后,系统频率不会立即突变,而是呈现一定弹性的缓慢变化,减小了大扰动对VSG频率的影响。转动惯量取值增大,系统惯性与VSG稳定性提升,但

响应速度随之下降。

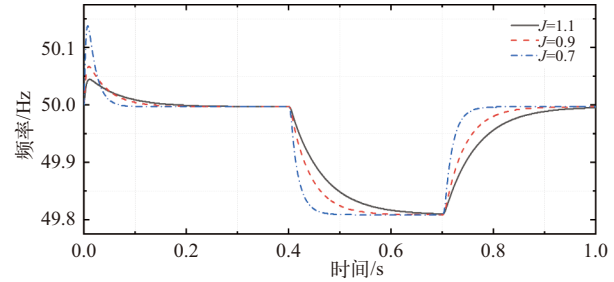


图7 不同转动惯量下VSG系统频率响应

Fig. 7 Frequency response of VSG system under different moment of inertia

2.3 阻尼系数对VSG动态运行特性分析

阻尼系数在VSG运行过程中,对系统频率稳态值具有重要的作用,阻尼系数与系统频率之间的关系为

$$\Delta\omega = \frac{T_m - T_e - J \frac{d\omega}{dt}}{D} \quad (18)$$

当 $T_m - T_e - Jd\omega/dt$ 恒定时,可降低VSG角频率偏差量,使系统尽快恢复稳态,此时阻尼系数较大,体现了虚拟阻抗的作用,保证了频率稳定。

为了验证上述定量分析的有效性,选取不同阻尼系数,令 $J=0.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,调整阻尼系数 D 的大小,VSG频率响应如图8所示。

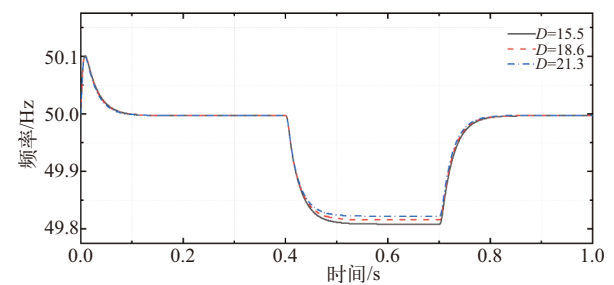


图8 不同阻尼系数下VSG系统频率响应

Fig. 8 Frequency response of VSG system under different damping coefficient

在VSG中引入阻尼系数后,微电网能够对一次调频后的频率稳态值进行调整,增加虚拟阻抗可减小大扰动后系统频率偏差量。由图8可知,阻尼系数取值越大,频率偏差量越小,但也会增加VSG动态响应时间,因此需对阻尼系数进行合理取值。

3 实验验证

3.1 两种控制方式定量分析

微电网逆变器算法中，下垂控制和VSG控制都是将同步发电机运行外特性引入逆变器控制环的控制方法。下垂控制对SG一次调节功能进行模拟，而VSG控制在此基础上将SG特有的惯性和阻尼特性引入微电网逆变器控制环节中。

两种控制方法的下垂关系为

$$\frac{\omega^* - \omega}{P^* - P} = 2\pi m_p \quad (19)$$

由式(19)可知，对于两种控制方式的有功-频率环节，若能满足 $2\pi m_p = 1/(D_0\omega_0 + K_p)$ ，并引入一阶惯性环节 $1/(1+\tau s)$ 时，VSG控制与下垂控制可具有相同的稳态特性。

3.2 光储微电网VSG控制策略

为了进一步验证上述量化指标分析的正确性，在MATLAB/Simulink中搭建基于光伏阵列单元的分布式模块作为电源侧的微电网模型，如图9所示。

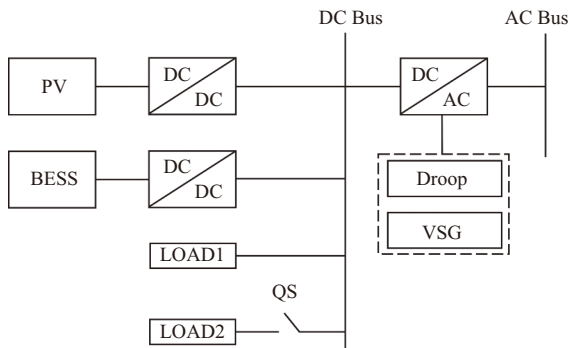


图9 光储微电网结构框图

Fig. 9 Structural diagram of PV-BESS microgrid

图9中，分布式电源采用光伏阵列作为发电单元，在直流母线侧接入磷酸铁锂电池作为储能元件。在微电网系统中设置直流负载，并通过开关状态切换，对负载状态进行调整。直流母线与交流母线之间通过微电网变流器进行电能双向传输。

仿真模型主要参数见下表。微电网逆变器分别采用VSG控制和下垂控制，对两种方法响应过程进行对比。

表 仿真参数选取

Tab. Simulation parameters

参数	取值	参数	取值
直流母线电压 U_{dc}/V	750	阻尼系数 $D/(N \cdot m \cdot s/rad)$	13.5
交流母线电压 U_{ac}/V	220	惯量系数 $J/(kg \cdot m^2)$	0.15
滤波电容 $L/\mu F$	35	无功功率指令值 $Q_{ref}/kvar$	6
滤波电感 C/mH	3	有功功率指令值 P_{ref}/kW	15
无功-电压下垂系数 K_q	4×10^{-3}	有功-频率下垂系数 K_p	5×10^{-3}

设置仿真时长为1 s，在0~0.4 s时，本地负载有功功率为10 kW，无功功率为6 kvar。在0.4~0.7 s时，增加有功功率为5 kW、无功功率为6 kvar的负载。在0.7 s时，切断所增加负载的开关。微电网功率响应如图10所示，微电网电压、频率响应如图11所示。

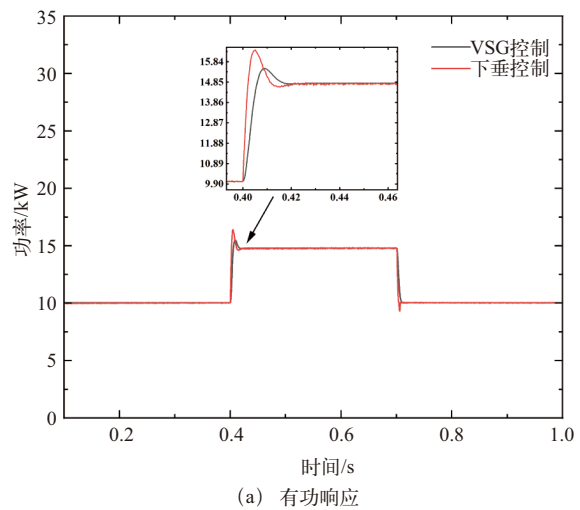
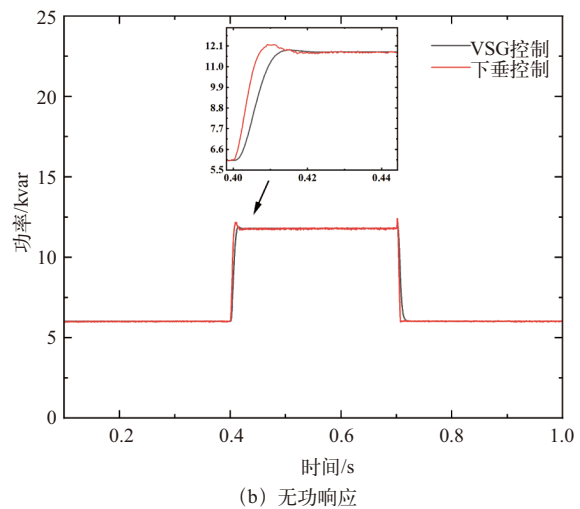


图10 两种控制方式功率响应

Fig. 10 Two control methods for power response

由图10可知,当光储微电网系统进行负载状态投切时,两种控制方式下的稳态值基本一致,但二者的动态响应过程有着明显的区别。在0.4 s时,对负载状态进行投切,在VSG控制的阻尼和惯性的作用下,增加了系统的弹性,降低了约7%的有功波动以及2%左右的无功波动,避免了因功率快速变化引起的系统稳定性问题。

由图11可知,当光储微电网负载突变时,VSG控制下的频率响应相较于下垂控制降低了约1.5%的波动。虚拟阻尼和虚拟惯性的存在,可有效控制一次调压过程后的母线电压稳态值,且VSG控制的动态响应过程呈现缓慢变化,有效降低了系统发生扰动时的敏感度。

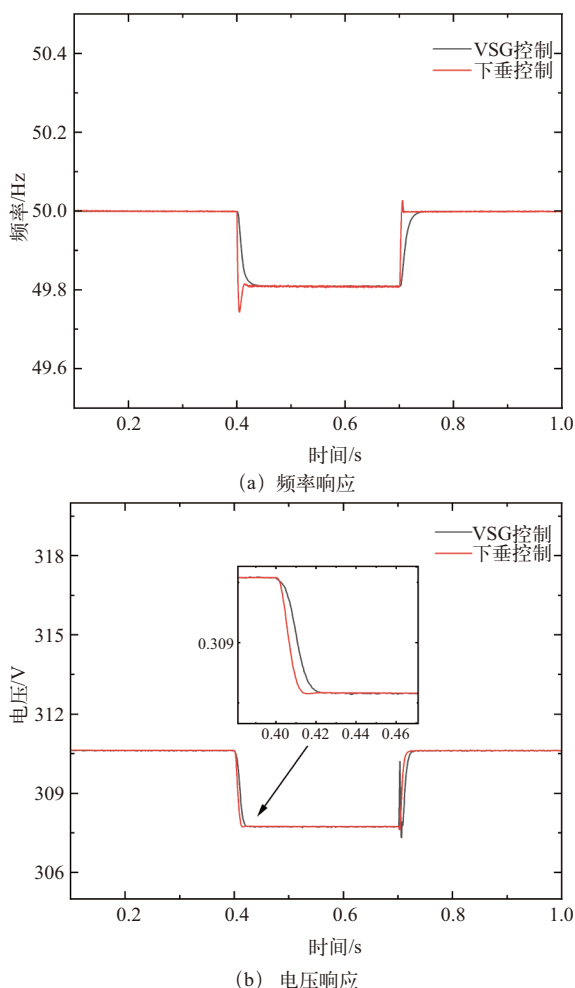


图 11 两种控制方式频率、电压响应
Fig. 11 Two control methods for frequency and voltage response

4 结束语

本文针对光储微电网变流器采取传统下垂控制缺少阻尼和惯性导致系统输出特性变化过快的问题,提出了一种改进式的虚拟发电机控制技术。将虚拟惯性、虚拟阻尼引入变流器控制环节中,使其模拟同步发电机运行外特性,有效改善了光储微电网的动态响应过程。本文所采取的VSG控制技术能够将交流发电机阻尼和惯性特点以算法形式引入逆变器控制环之中,能够有效改善下垂控制方式下系统输出特性易产生突变的问题。在光储微电网场景下,将VSG控制技术应用到微电网变流器中,能够有效降低微电网遭受扰动时系统母线电压、频率产生的波动,提升了微电网供电可靠性。

参考文献

- [1] 纪君奇, 杨黎晖, 马西奎. 基于虚拟同步发电机控制的并网逆变器切换型振荡及其非光滑分岔特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7860-7873.
- [2] 李生虎, 宫俊伟, 夏伟健, 等. 含虚拟同步机光伏并网电力系统小干扰稳定约束最优潮流算法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 146-153.
- [3] 张林, 张海波, 蒋维勇, 等. 基于自适应动态虚拟同步阻抗的虚拟同步机功率解耦策略[J]. 中国电机工程学, 2024, 44(15): 6010-6023.
- [4] 石荣亮, 王斌, 黄冀, 等. 储能虚拟同步机的并网阻尼特性分析与改进策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(7): 30-38.
- [5] 陈杰, 程静, 王维庆, 等. 应用多参数协同自适应方法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 74-85.
- [6] EBERLEIN S, RUDION K. Impact of inner control loops on small-signal stability and model-order reduction of grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2812-2824.
- [7] HABIBI S I, SHEIKHI M A, KHALILI T, et al. Multiagent-based nonlinear generalized minimum variance control for islanded ac

- microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(1): 316-328.
- [8] ALGHAMDI B, CAÑIZARES C A. Frequency regulation in isolated microgrids through optimal droop gain and voltage control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 988-998.
- [9] REN Q, CHEN A, FANG J, et al. An improved passivity-based direct power control strategy for ac/dc converter under unbalanced and distorted grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12153-12165.
- [10] LEI J, XIANG X, LIU B, et al. Transient stability analysis of grid forming converters based on damping energy visualization and geometry Approximationin[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(3): 2510-2521.
- [11] 张忠会, 雷大勇, 蒋昌辉, 等. 基于二阶锥规划和NNC法的交直流混合配电网双层规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 70-85.
-
- 作者简介**
- 杨茂朕（1998—），男，硕士，助理工程师，研究方向为智能微电网及其功率变换技术。
- （收稿日期：2025-03-03）