

弱电网下光伏和VSG储能系统的小信号建模与稳定性分析

陈浩立, 梁远升, 李佳, 李海锋, 王钢
(华南理工大学电力学院, 广州市 510641)

摘要:【目的】基于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制的构网型(grid-forming, GFM)储能变流器能够有效为系统提供电压和频率支撑,但目前研究较少考虑新能源装置接入弱电网场景下VSG储能变流器的支撑能力。【方法】以光伏系统和VSG储能系统为基础,分析其与弱电网之间的稳定性规律。首先建立了弱电网下光伏系统和VSG储能系统的小信号模型;其次采用特征值分析法,详细分析了系统中光伏出力变化、短路比(short circuit ratio, SCR)变化对系统特征值的影响;然后,通过研究振荡模态和参与因子,找出其中影响系统稳定性的高灵敏度控制参数;接着,在临界稳定状态下通过研究主导模态的根轨迹,提出改善系统稳定性的控制参数调整方法。最后,在MATLAB/Simulink构建的时域仿真模型验证了理论分析的有效性。【结果】仿真结果表明,在光伏出力波动(0.5~2.0 p.u.)和电网短路比变化(SCR为0.6~2.0)的多种工况下,所建小信号模型能准确识别出对系统稳定性具有显著影响的控制参数。通过实施所提参数调整方案,系统光伏输出从1.2 p.u.增加到2.0 p.u.,SCR=0.6时依然保持稳定。【结论】光伏系统出力变化时,VSG储能系统内外环 q 轴PI参数和光伏系统内外环 q 轴PI参数具有高灵敏度;SCR变化时,VSG储能系统内外环 q 轴PI参数具有高灵敏度,通过对不同灵敏度的控制参数进行有序调整,提高系统的静态稳定性,为高比例新能源电网的稳定性提升提供了有效解决方案。

关键词:虚拟同步发电机(VSG);弱电网;光伏系统;小信号模型;稳定性分析

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)05-0056-13

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.05.006

Small Signal Modeling and Stability Analysis of Photovoltaic and VSG Energy Storage Systems Under Weak AC Grid

CHEN HaoLi, LIANG Yuansheng, LI Jia, LI Haifeng, WANG Gang

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

ABSTRACT: [Objective] Grid-forming control (GFM) energy storage converters based on virtual synchronous generator (VSG) control can effectively provide voltage and frequency support for the system; however, current research has rarely considered the support capability of VSG energy storage converters in the scenario of new energy devices connected to weak power grids. [Methods] This study analyzed the stability laws between photovoltaic systems, VSG energy storage systems, and weak electricity grids. First, small signal models for photovoltaic and VSG energy storage systems under weak AC grids were established. Second, the eigenvalue analysis method was used to comprehensively analyze the impact of changes in photovoltaic output and SCR on the system's eigenvalues. Third, we identified the high-sensitivity control parameters that affect system stability by studying the oscillation modes and participation factors. Finally, a method for adjusting control parameters to improve system stability was proposed by studying the root locus of the dominant mode at the critical steady state. Finally, the accuracy of the stability impact law of the system was verified through a MATLAB/Simulink simulation under different operating conditions. The time-domain simulation model constructed using MATLAB/Simulink verified the effectiveness of the theoretical analysis. [Results] The simulation results showed that the small signal model established in this paper can accurately identify the control parameters that significantly impact system stability under various operating conditions, such as photovoltaic output fluctuations (0.5~2.0 p.u.) and changes in grid short-circuit ratio (SCR=0.6~2.0). By implementing the proposed parameter adjustment scheme, the photovoltaic output of the system increased from 1.2

p. u. to 2.0 p. u. and remained stable at SCR=0.6. [Conclusions] When the output of the photovoltaic system changes, the q-axis pi parameters of the VSG energy storage system and the photovoltaic system have high sensitivity; when SCR changes, the internal and external q-axis pi parameters of the VSG energy storage system have high sensitivity. Orderly adjustment of the control parameters with different sensitivities improved the static stability of the system, thereby providing an effective solution for improving the stability of a high proportion of new energy grids.

This work is supported by Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2023A1515011035).

KEYWORDS: virtual synchronous generator (VSG); weak AC grid; photovoltaic system; small signal model; stability analysis

0 引言

在部分农村地区和偏远地区,由于距离变电站远,输电半径大,使农村电网呈现高感抗弱电网特性^[1-3]。随着可再生能源发电技术的发展,光伏发电、水电、风电等绿色能源逐渐成为我国的优势能源。其中,分布式光伏发电实现了乡村清洁能源的就地消纳,为实现乡村振兴打下了坚实的基础^[4-5]。但是,早期采用跟网型(grid-following, GFL)控制的光伏并入装置存在低惯量、低阻尼等特性^[6-9],进一步影响着弱电网的稳定性。

近年来,随着虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制技术的发展^[10-15],基于VSG控制的构网型(grid-forming, GFM)储能变流器能主动支撑系统的频率和电压,具有一定的惯性和阻尼,在电网稳定性提升方面起着积极作用^[16-23],然而在遭受扰动时可能出现频率或功率的波动,针对VSG系统的动态稳定性,国内外学者进行了大量的研究。文献[24]建立了详细的多机并联VSG系统小信号模型,分析线路连接阻抗、输出功率大小和有功控制环参数等因素对系统低频特征根的影响关系,但未考虑新能源系统的建模。文献[25-27]将VSG控制策略应用于光储系统中,提高系统电压和频率的小信号稳定性,但小信号模型过于简单,未考虑内环电压电流控制和VSG无功环对系统的影响。文献[28]针对VSG单机并网系统,从状态空间的角度建立高阶小信号模型,虽然能准确描述单机系统的动态特性,但由于阶数较高,难以扩展到弱电网下光伏系统和VSG储能系统的建模与分析。文献[29-30]研究了虚拟转动惯量和阻尼系数对VSG系统的影响,指出VSG策略中较大的虚拟转动惯量虽然会增强VSG的频率支撑能力,但会加剧系统的动态振荡,而较大的阻尼系数可以有效消除有功功率的振荡,减小频率的偏差,但未考虑VSG系统接入弱电网的场景。

综上所述,现有对VSG的研究未考虑到弱电网

下VSG储能系统连接新能源系统时的稳定性分析。本文针对弱电网下光伏系统和VSG储能系统,利用状态空间法,选取合适的状态变量,建立详细的弱电网下光伏系统和VSG储能系统的小信号模型;接着,通过研究特征根轨迹,详细分析光伏系统出力变化和交流线路短路比(short circuit ratio, SCR)变化对系统特征值的影响;然后,通过研究系统的振荡模态和参与因子^[31],找出影响系统稳定性的高灵敏度控制参数;在临界稳定状态下通过研究主导模态的根轨迹,提出改善系统稳定性的控制参数调整方法;最后,在MATLAB/Simulink平台上搭建相应的仿真模型,在不同工况下验证所提分析方法的正确性。

1 弱电网光伏系统和VSG储能系统的小信号建模

1.1 弱电网下光伏系统和VSG储能系统的拓扑结构

弱电网下光伏系统和VSG储能系统的拓扑结构如图1所示。

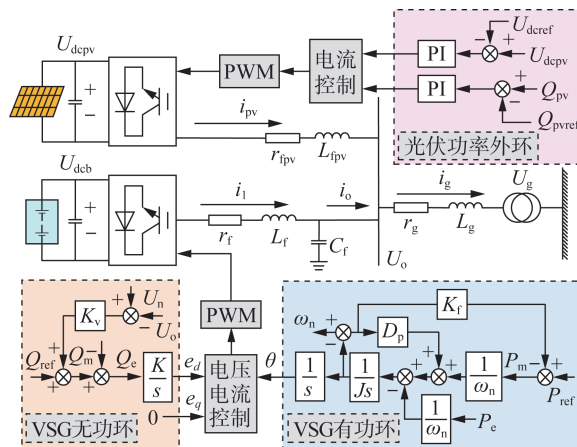


图1 弱电网下光伏系统和VSG储能系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of photovoltaic system and VSG energy storage system under weak grid

图1中: U_{dcpv} 为光伏系统直流侧电压; U_{dcref} 为光伏系统直流侧电压参考值; i_{pv} 为光伏系统输出电流; r_{fpv} 、 L_{fpv} 分别为滤波器的电阻和电感; Q_{pv} 、 Q_{pvref} 分别为光伏系统输出无功功率和其参考值;

U_{deb} 为储能系统直流侧电压; i_l 为储能系统逆变器输出电流; i_o 为储能系统输出电流; i_g 为交流线路电流; U_o 为储能系统输出电压; U_g 为交流电网侧电压; r_f, L_f, C_f 分别为 VSG 滤波器的电阻、电感、电容; r_g, L_g 分别为交流线路电阻和电感; U_n 为额定电压阈值; K_v 为电压下垂系数; K 为积分系数; Q_{ref} 为无功功率的给定值; Q_m 为无功功率的参考值; Q_e 为 VSG 无功功率的输出; P_{ref} 为有功功率的给定值; P_m 为有功功率的参考值; P_e 为 VSG 有功功率的输出; K_f 为频率下垂系数; D_p 为阻尼系数; ω_n 为系统额定角频率; J 为虚拟转动惯量; θ 为 VSG 的输出相角; e_d, e_q 分别为 $Q-V$ 下垂控制输出的 dq 轴电压值。

1.2 VSG 控制原理

VSG 有功外环控制的数学表达式为:

$$\begin{cases} P_m = P_{ref} + K_f(\omega_n - \omega) \\ J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} + D_p(\omega_n - \omega) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为 VSG 的虚拟角频率。

VSG 无功外环控制的数学表达式为:

$$\begin{cases} Q_m = Q_{ref} + K_v(U_n - U_o) \\ e_d = \frac{K}{s}(Q_m - Q_e) \\ e_q = 0 \end{cases} \quad (2)$$

1.3 VSG 储能系统

1.3.1 VSG 虚拟阻抗回路

虚拟阻抗回路用于调整逆变器的输出阻抗,其表达式为^[11]:

$$\begin{cases} u_{od}^* = e_d - r_v i_{od} + \omega L_v i_{oq} \\ u_{oq}^* = e_q - r_v i_{oq} - \omega L_v i_{od} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{od}^*, u_{oq}^* 分别为 VSG 输出电压指令值的 d, q 轴分量; r_v, L_v 分别为虚拟电阻和电感; i_{od}, i_{oq} 分别为 VSG 输出电流的 d, q 轴分量; 下标 d, q 分别为相应变量的 d 轴、 q 轴分量,下同。

1.3.2 VSG 功率计算

VSG 输出有功功率 P_e 和无功功率 Q_e 由采集的输出电压 u_{od}, u_{oq} 与输出电流 i_{od}, i_{oq} 经瞬时功率计算后得到:

$$\begin{cases} P_e = \frac{3}{2}(u_{od} i_{od} + u_{oq} i_{oq}) \\ Q_e = \frac{3}{2}(u_{oq} i_{od} - u_{od} i_{oq}) \end{cases} \quad (4)$$

1.3.3 VSG 内环电压电流控制

VSG 内环电压电流控制表达式为:

$$\begin{cases} i_{ldref} = (k_{dvlp} + \frac{k_{dcli}}{s})u_{odx} - \omega_n C_f u_{oq} + i_{od} \\ i_{lqref} = (k_{qvlp} + \frac{k_{qcli}}{s})u_{oqx} + \omega_n C_f u_{od} + i_{oq} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{dref} = (k_{dclp} + \frac{k_{dcli}}{s})i_{ldx} - \omega_n L_f i_{lq} + u_{od} \\ u_{qref} = (k_{qc1p} + \frac{k_{qc1i}}{s})i_{lqx} + \omega_n L_f i_{ld} + u_{oq} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $k_{dvlp}, k_{dcli}, k_{qvlp}, k_{qcli}$ 分别为电压环 d 轴、 q 轴的 PI 控制参数; $k_{dclp}, k_{dcli}, k_{qc1p}, k_{qc1i}$ 分别为电流环 d 轴、 q 轴的 PI 控制参数; $u_{odx} = u_{od}^* - u_{od}$; $u_{oqx} = u_{oq}^* - u_{oq}$; $i_{ldx} = i_{ldref} - i_{ld}$; $i_{lqx} = i_{lqref} - i_{lq}$ 。

1.3.4 VSG 滤波器与连接线路

VSG 逆变器输出端及连接线路的表达式为:

$$\begin{cases} \frac{du_{od}}{dt} = \omega u_{oq} + \frac{i_{ld} - i_{od}}{C_f} \\ \frac{du_{oq}}{dt} = -\omega u_{od} + \frac{i_{lq} - i_{oq}}{C_f} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{di_{ld}}{dt} = -\frac{r_f i_{ld}}{L_f} + \omega i_{lq} + \frac{u_{dref} - u_{od}}{L_f} \\ \frac{di_{lq}}{dt} = -\frac{r_f i_{lq}}{L_f} - \omega i_{ld} + \frac{u_{qref} - u_{oq}}{L_f} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} i_{od} = i_{gd} - i_{dpv} \\ i_{oq} = i_{gq} - i_{qp} \end{cases} \quad (9)$$

式中: i_{gd}, i_{gq} 分别为交流线路 d 轴、 q 轴的电流值; i_{dpv}, i_{qp} 分别为光伏系统 d 轴、 q 轴的电流值。

1.4 光伏系统

1.4.1 光伏系统电压电流控制

由图 1 可知,光伏系统电压电流控制的数学表达式为:

$$\begin{cases} i_{drefpv} = (k_{d1ppv} + \frac{k_{d1ipv}}{s})(U_{dc} - U_{dref}) \\ i_{qrefpv} = (k_{q1ppv} + \frac{k_{q1ipv}}{s})(Q_{pv} - Q_{pvref}) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} u_{drefpv} = (k_{d2ppv} + \frac{k_{d2ipv}}{s})i_{drefpv}^* - \omega L_{fpv} i_{qpv} + u_{od} \\ u_{qrefpv} = (k_{q2ppv} + \frac{k_{q2ipv}}{s})i_{qrefpv}^* + \omega L_{fpv} i_{dpv} + u_{oq} \end{cases} \quad (11)$$

式中: i_{drefpv}, i_{qrefpv} 分别为光伏系统电流环控制 d 轴、 q 轴的指令值; u_{drefpv}, u_{qrefpv} 分别为光伏系统电流环控制生成的 d 轴、 q 轴调制电压; k_{d1ppv}, k_{d1ipv} 和 k_{q1ppv}, k_{q1ipv} 分别为电压环 d 轴、 q 轴的 PI 控制参数; k_{d2ppv}, k_{d2ipv} 和 k_{q2ppv}, k_{q2ipv} 分别为电流环 d 轴、 q 轴的 PI 控制参数; L_{fpv} 为光伏系统的滤波电感; U_{dc} 为直流侧电压; P_{pv} 和 Q_{pv} 分别为光伏系统输出有功功率和无功功率,其数学模型与式(4)类似; $i_{dpv}^* = i_{drefpv} - i_{dpv}$; $i_{qp}^* = i_{qrefpv} - i_{qp}$ 。

1.4.2 光伏系统滤波器

光伏系统滤波器的表达式为:

$$\begin{cases} \frac{di_{dpv}}{dt} = -\frac{r_{fpv}i_{dpv}}{L_{fpv}} + \omega i_{qpv} + \frac{u_{drefpv} - u_{od}}{L_{fpv}} \\ \frac{di_{qpv}}{dt} = -\frac{r_{fpv}i_{qpv}}{L_{fpv}} - \omega i_{dpv} + \frac{u_{qrefpv} - u_{oq}}{L_{fpv}} \end{cases} \quad (12)$$

1.4.3 光伏系统直流侧

$$P_m - P_{pv} = U_{dc} C_{pv} \frac{dU_{dc}}{dt} \quad (13)$$

式中: C_{pv} 为光伏系统直流侧电容。

1.5 交流电网

交流连接线路的表达式为:

$$\begin{cases} \frac{di_{gd}}{dt} = -\frac{r_g i_{gd}}{L_g} + \omega i_{gq} + \frac{u_{od} - u_{gd}}{L_g} \\ \frac{di_{gq}}{dt} = -\frac{r_g i_{gq}}{L_g} - \omega i_{gd} + \frac{u_{oq} - u_{gq}}{L_g} \end{cases} \quad (14)$$

在小干扰下,可以认为交流侧系统的电压 U_g 和频率 ω_g 为恒定值,将该电压变换到公共坐标系^[24]:

$$\begin{cases} u_{gd} = E_g \cos \theta \\ u_{gq} = -E_g \sin \theta \end{cases} \quad (15)$$

式中: E_g 为电网电压幅值; u_{gd} 、 u_{gq} 分别为电网电压的

d 、 q 轴分量。

将式(1)~(14)线性化并结合式(15),可得弱电网下光伏系统和VSG储能系统的详细小信号模型。

2 影响因素分析

为验证所建立小信号模型的正确性,根据附录表A1的系统参数和控制参数,本文基于MATLAB/Simulink平台搭建了弱电网下光伏和VSG储能系统。 $t=0.5$ s时设置VSG储能系统有功阶跃扰动50 kW,计算并绘制输出电气量的时域波形曲线,如附录图A1所示。

由附录图A1可知,小信号模型的输出波形与仿真模型的输出波形基本一致,验证了小信号模型的正确性。

2.1 弱电网下光伏和VSG储能系统的振荡模态和主要参与因子分析

根据附录表A1的参数,可以求得系统状态空间矩阵的特征根。通过稳定性判别与主要参与因子筛选^[31],可算得系统振荡模态、振荡频率、阻尼比如附录表A2所示,各模态参与因子灵敏度如图2所示,其中各模态主要参与因子说明如附录表A3所示。

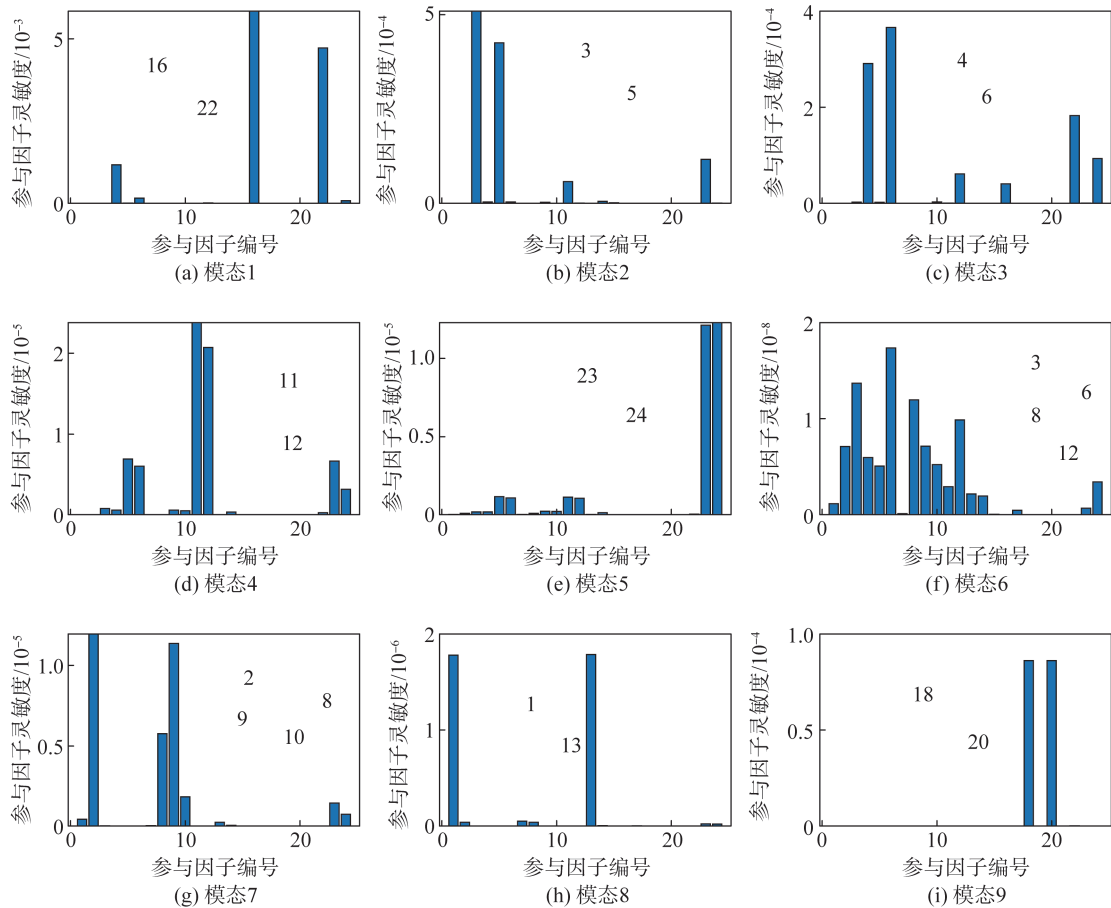


图2 9种模态的参与因子灵敏度

Fig. 2 Sensitivity of participation factors for nine modes

2.2 光伏系统输出功率对系统稳定性的影响分析

设置 VSG 储能系统的输出功率 P_e 恒定为 1 p. u. ; 交流线路 SCR=1 (当 SCR 大于 3 时, 为强电网; 当 SCR 小于 3 时, 为弱电网); 光伏系统的输入功率 P_{mpv} 从 0 p. u. 逐渐增加到 1.5 p. u. , 得到系统根轨迹和主要参与因子运动轨迹, 如图 3 所示。

由图 3(a)、3(b)可知, 随着光伏系统的输入功率 P_{mpv} 的增大, 大部分系统特征根向右移动。当 P_{mpv} 达到 0.6 p. u. 时, 2 个实数特征根 λ_3 和 λ_4 变成了一对共轭复数特征根, 导致系统增加了一个振荡模态; 当 P_{mpv} 大于 1.2 p. u. 时, 特征根 λ_7 和 λ_8 越过虚轴进入右半平面, 造成系统失稳。由图 3(c)、3(d)可知, 在光伏输出功率变化的过程中, 特征根 $\lambda_{3,4}$ 的主要参与因子是光伏系统输出电流 q 轴分量 i_{oqPV} 和光伏系统输出无功 Q_{PV} , 受 VSG 储能系统内外环 q 轴控制参数影响较大; $\lambda_{7,8}$ 的主要参与因子是 VSG 储能系统输出电流 q 轴分量 i_{oqVSG} 和输出电压 q 轴分量 u_{oqVSG} , 受光伏系统内外环 q 轴控制参数影响较大。

当系统处于临界稳定即 $P_{mpv}=1.2$ p. u. 时, 分别改变 VSG 储能系统内外环 q 轴控制参数和光伏系统内外环 q 轴控制参数, 得到主导模态 $\lambda_{7,8}$ 根轨迹。VSG 储能系统控制参数变化时的根轨迹如图 4 所示。光伏系统控制参数变化时的根轨迹如图 5 所示。

由图 4 可得, k_{qv1p} 和 k_{qc1p} 的增大, 会使特征根 $\lambda_{7,8}$ 向左移动, 系统稳定性得到改善; 而 k_{qv1i} 和 k_{qc1i} 的增大, 会使特征根 $\lambda_{7,8}$ 向右移动, 系统稳定性降低。同时, 每个控制参数对小信号稳定性的影响程度不同, k_{qv1i} 和 k_{qc1i} 的灵敏度明显小于 k_{qv1p} 和 k_{qc1p} 。

由图 5 可得, k_{q1ppv} 、 k_{q1ipv} 和 k_{q2ipv} 的减小, 会使特征根 $\lambda_{7,8}$ 向左移动, 系统稳定性得到改善; 而 k_{q2ppv} 的减小, 会使特征根 $\lambda_{7,8}$ 向右移动, 系统稳定性降低。同时, 每个控制参数对小信号稳定性的影响程度不同, k_{qv1i} 、 k_{qc1p} 和 k_{qv1p} 的灵敏度明显大于 k_{qc2i} 。

通过上述分析可知, 当光伏系统输出功率 P_{mpv} 从 0 p. u. 增大到 1.2 p. u. 时, 系统的稳定性逐渐下降, 当 P_{mpv} 超过 1.2 p. u. 时, 系统失稳。在该过程中, VSG 储能系统内外环 q 轴控制参数和光伏系统内外环 q 轴控制参数有较高的灵敏度, 且每个控制参数的灵敏度也有所不同, 基于此, 本文采用的参数调整方案为: 先对灵敏度高的控制参数进行“粗调”, 若系统稳定, 则结束参数调整; 若系统不稳定, 再对灵敏度低控制参数进行“细调”。对于 VSG 储能系统, 可以通过先增大 k_{qv1p} 和 k_{qc1p} , 再减小 k_{qv1i} 和 k_{qc1i} 来改善系统稳定性; 对于光伏系统, 可以通过先减小 k_{q1ppv} 、 k_{q1ipv}

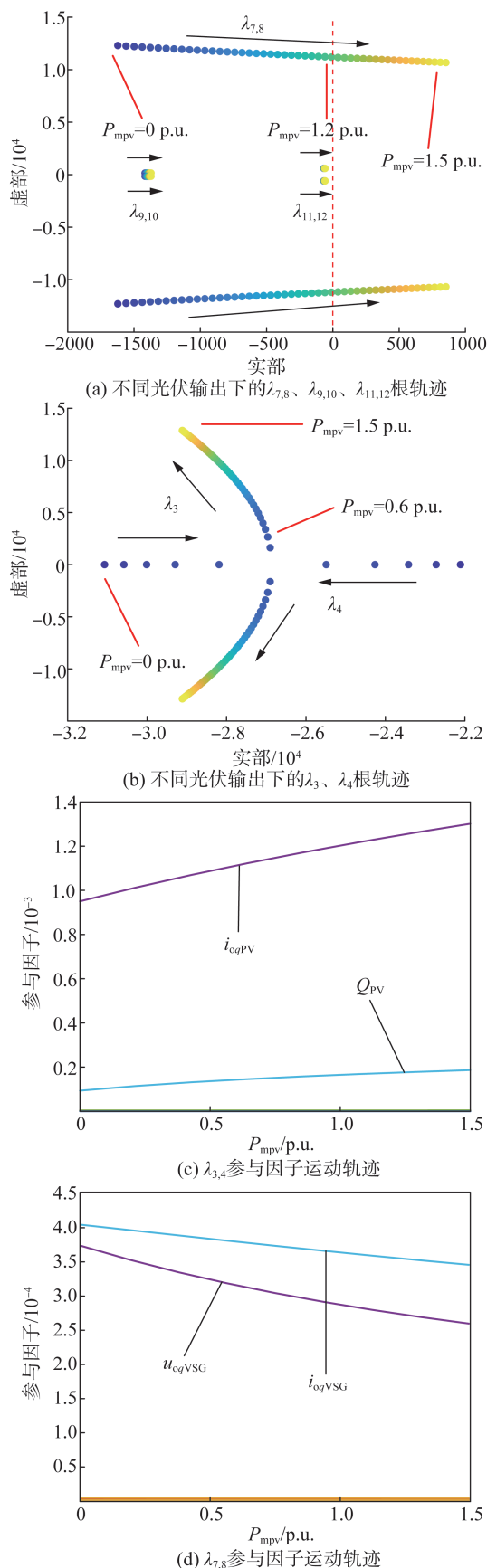


图 3 光伏输出功率变化时系统的根轨迹和主要参与因子运动轨迹
Fig. 3 Root trajectory and main participating factor motion trajectory of the system when the photovoltaic output power changes

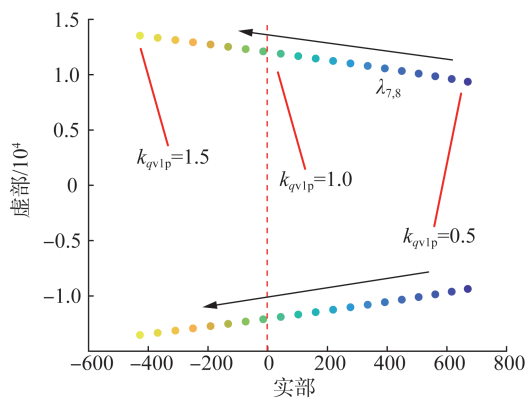
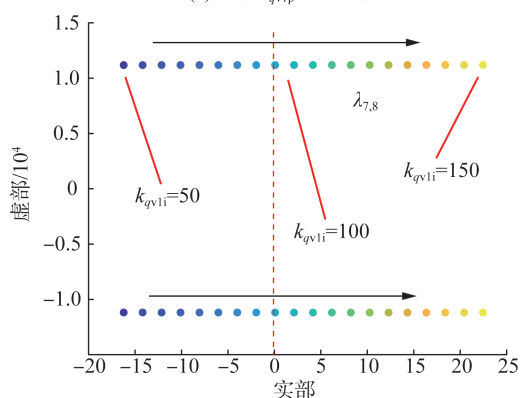
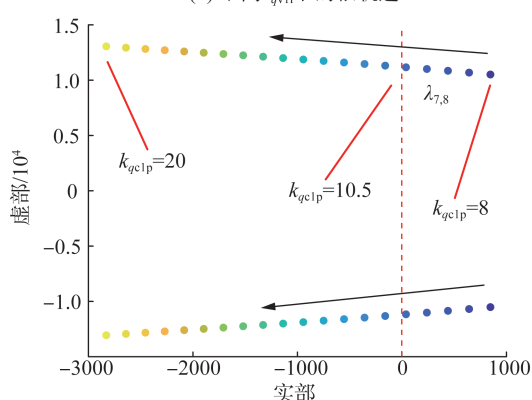
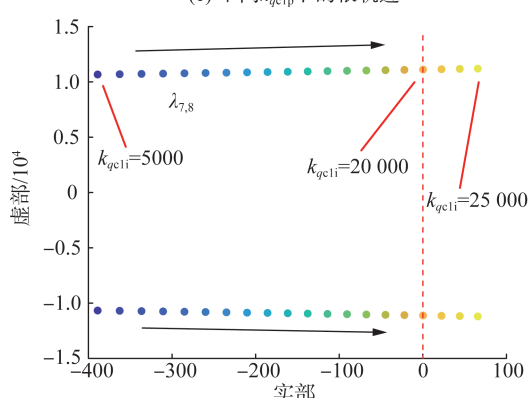
(a) 不同 k_{qvlp} 下的根轨迹(b) 不同 k_{qvli} 下的根轨迹(c) 不同 k_{qc1p} 下的根轨迹(d) 不同 k_{qc1i} 下的根轨迹

图4 VSG储能系统控制参数变化时的根轨迹($P_{mpv}=1.2$ p. u.)

Fig. 4 Root locus of VSG energy storage system when control parameters change ($P_{mpv}=1.2$ p. u.)

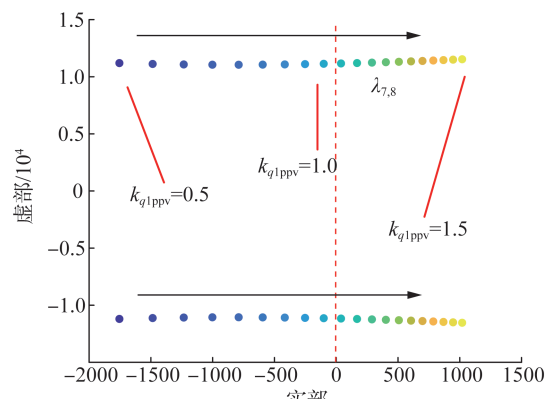
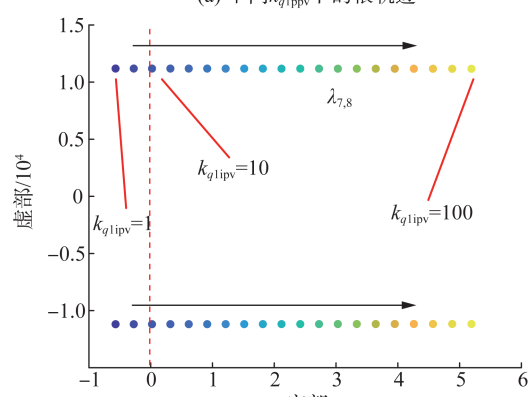
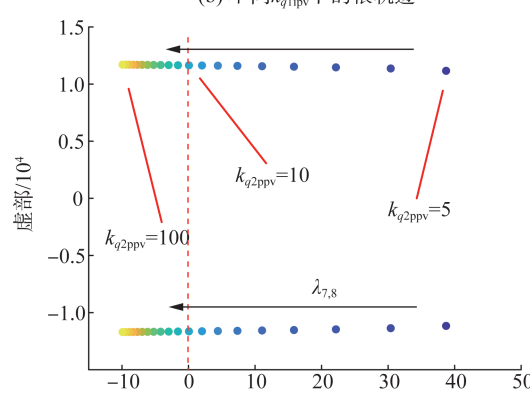
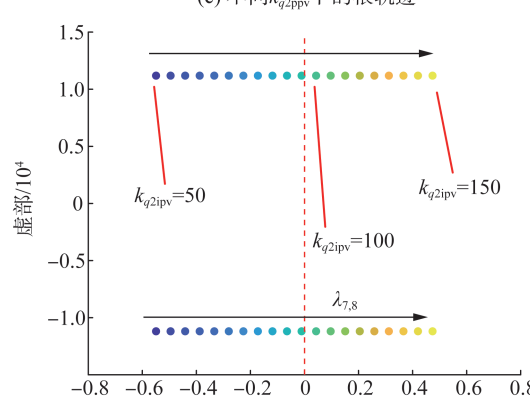
(a) 不同 k_{q1ppv} 下的根轨迹(b) 不同 k_{q1ipv} 下的根轨迹(c) 不同 k_{q2ppv} 下的根轨迹(d) 不同 k_{q2ipv} 下的根轨迹

图5 光伏系统控制参数变化时的根轨迹

Fig. 5 Root locus of photovoltaic system when control parameters change

和增大 k_{q2ppv} 再减小 k_{q2ipv} 来改善系统稳定性。

2.3 SCR 对系统稳定性的影响分析

设置 VSG 储能系统的输出功率 P_e 恒定为 1 p. u. ; 光伏系统的输出功率 P_{mpv} 恒定为 1 p. u. ; 令交流线路短路比从 2.0 逐渐降低到 0.3, 得到系统根轨迹和主要参与因子运动轨迹如图 6 所示。

由图 6(a)、6(b) 可知, 随着交流线路 SCR 的降低, 大部分系统特征根向右移动。当 SCR 达到 1.3, 特征根 λ_{11} 和 λ_{12} 运动方向发生转向, 朝虚轴方向运动; 当 SCR 小于 0.6, 特征根 λ_7 和 λ_8 越过虚轴进入右半平面, 造成系统失稳。由图 6(c)、6(d) 可知, 在光伏输出功率变化的过程中, 特征根 $\lambda_{7,8}$ 的主要参与因子是 VSG 储能系统输出电流 q 轴分量 i_{oqVSG} 和输出电压 q 轴分量 u_{oqVSG} , 受 VSG 储能系统内外环 q 轴控制参数影响较大; $\lambda_{11,12}$ 的主要参与因子是交流线路电流的 dq 轴分量, 受交流线路阻抗影响较大, 但其不是可控的系统参数。

当系统处于临界稳定, 即 SCR=0.6 时, 分别改变 VSG 储能系统内外环 q 轴控制参数, 得到主导模态 $\lambda_{7,8}$ 根轨迹如图 7 所示。

由图 7 可得, k_{qv1p} 和 k_{qclp} 的增大, 会使特征根 $\lambda_{7,8}$ 向左移动, 系统稳定性得到改善; 而 k_{qv1i} 和 k_{qcli} 的增大, 会使特征根 $\lambda_{7,8}$ 向右移动, 降低系统稳定性。同时, 每个控制参数对小信号稳定性的影响程度不同, k_{qv1i} 和 k_{qcli} 的灵敏度明显小于 k_{qv1p} 和 k_{qclp} 。

通过上述分析可知, 当交流线路 SCR 从 2.0 降低至 0.6 时, 系统的稳定性逐渐下降, 当 SCR 低于 0.6 时, 系统失稳。该过程中, VSG 储能系统内外环 q 轴控制参数有较高的灵敏度, 可以通过先增大 k_{qv1p} 和 k_{qclp} , 再减小 k_{qv1i} 和 k_{qcli} 来改善系统稳定性。

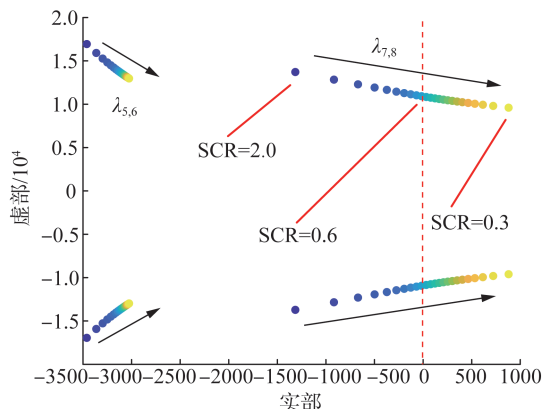
3 仿真验证

3.1 光伏系统出力变化

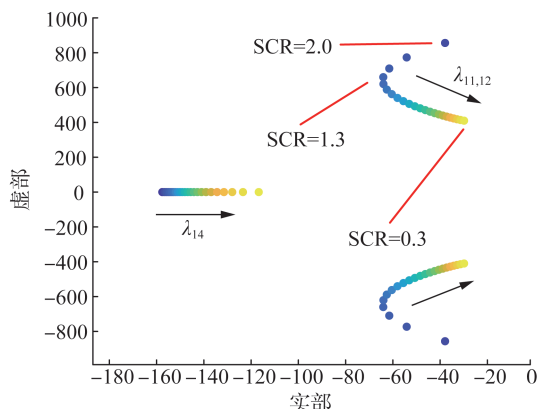
设置 VSG 储能系统的输出功率 P_e 恒定为 1 p. u. ; 交流线路 SCR=1; 令光伏输出功率从 0.5 p. u. 不断增加到 2 p. u. , 得到系统仿真波形, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 当光伏输出功率从 0.5 p. u. 上升至 1.0 p. u. 的过程中, 系统能够保持稳定; 当光伏输出上升至 1.2 p. u. , 系统失稳。

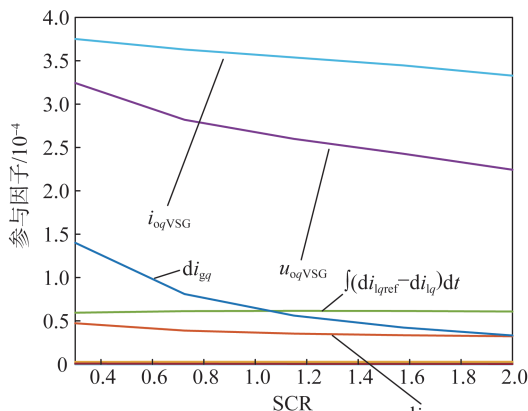
通过对系统状态空间的分析, 考虑调整 VSG 储能系统内外环 q 轴控制参数和光伏系统内外环 q 轴控制参数来提高系统的稳定性。将光伏系统电压外环 q 轴的 PI 参数 k_{q1ppv} 、 k_{q1ipv} 由 1、10 调整为 0.1、5; 光伏系统电流内环 q 轴的 PI 参数 k_{q2ppv} 、 k_{q2ipv} 由 10、100 调整为 15、50; VSG 储能系统电压外环 q 轴 PI 参数 k_{qv1p} 、



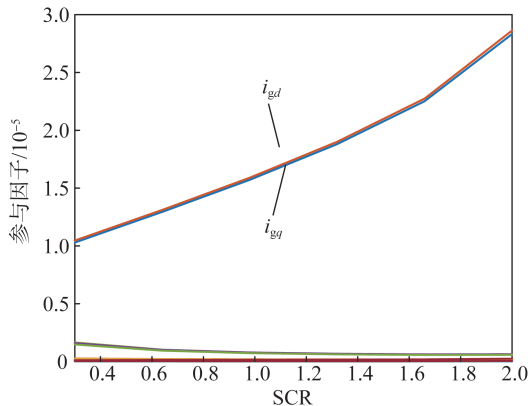
(a) 不同 SCR 下的 $\lambda_{5,6}$ 、 $\lambda_{7,8}$ 根轨迹



(b) 不同 SCR 下的 $\lambda_{11,12}$ 、 λ_{14} 根轨迹



(c) $\lambda_{7,8}$ 参与因子运动轨迹



(d) $\lambda_{11,12}$ 参与因子运动轨迹

图 6 SCR 变化时系统的根轨迹和主要参与因子运动轨迹
Fig. 6 Root trajectory and main participating factor motion trajectory of the system during SCR changes

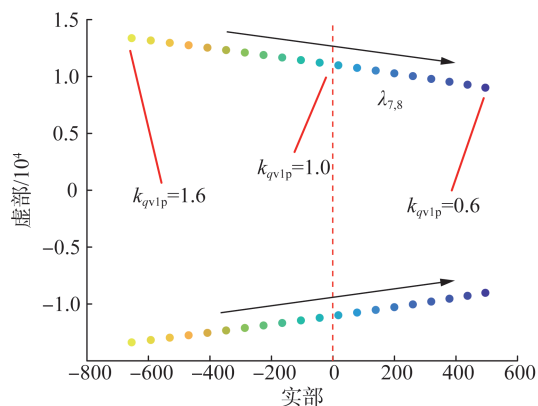
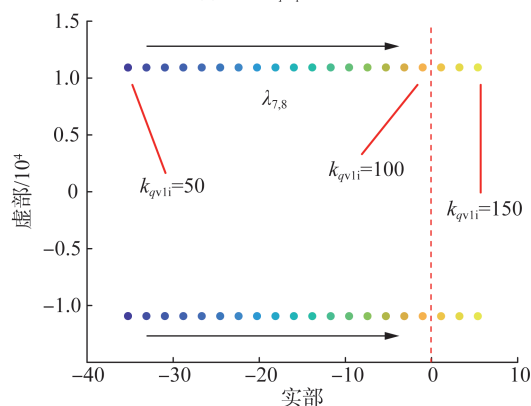
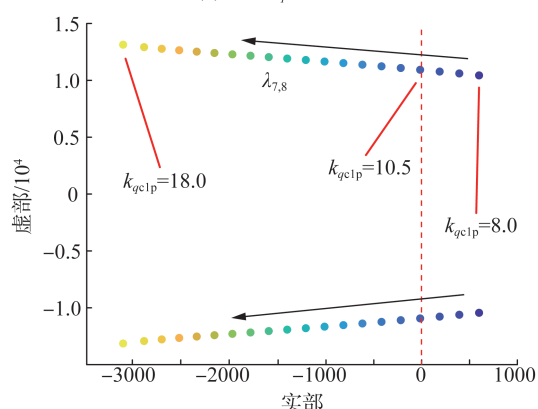
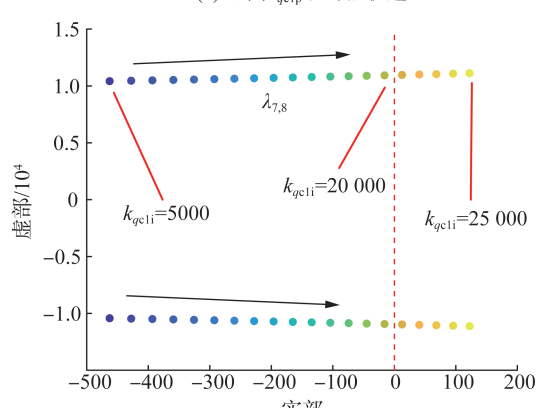
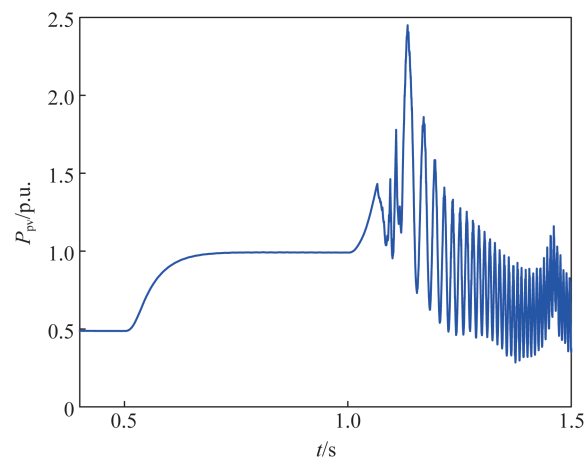
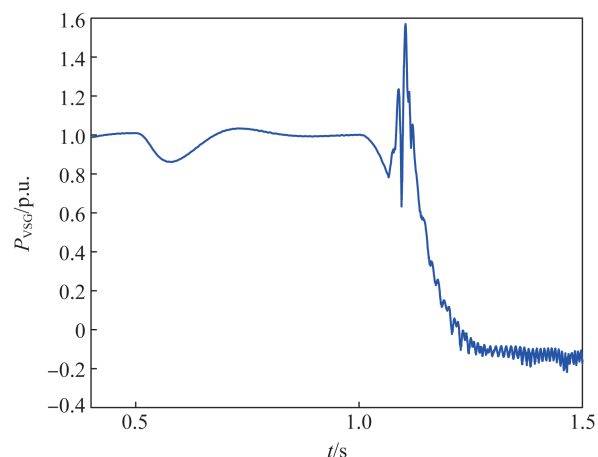
(a) 不同 k_{qvlp} 下的根轨迹(b) 不同 k_{qvli} 下的根轨迹(c) 不同 k_{qc1p} 下的根轨迹(d) 不同 k_{qc1i} 下的根轨迹

图7 VSG储能系统控制参数变化时的根轨迹(SCR=0.6)

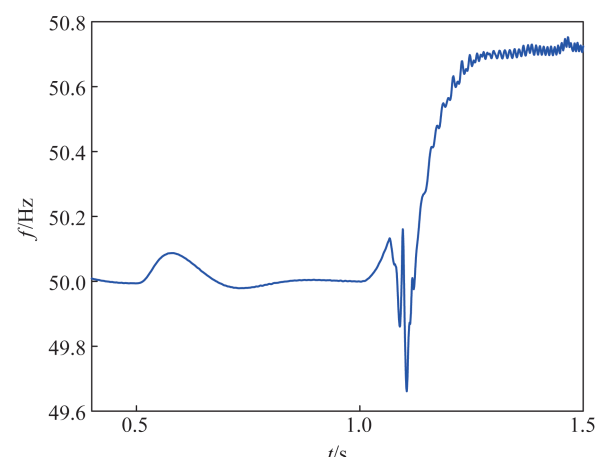
Fig. 7 Root locus of VSG energy storage system when control parameters change(SCR=0.6)



(a) 光伏输出有功功率



(b) VSG输出有功功率



(c) VSG输出频率

图8 不同光伏输出功率下系统仿真波形

Fig. 8 System simulation waveforms under different photovoltaic output powers

k_{qvli} 由1、100调整至1.5、50;VSG储能系统电流内环 q 轴PI参数 k_{qc1p} 、 k_{qc1i} 由10.5、20 000调整至100、15 000,观察不同光伏输出功率下系统的仿真波形,如图9所示。

由图9可知,光伏输出从0.5 p.u. 上升至2.0 p.u. 的过程中,系统能保持稳定状态,验证了分析的正确

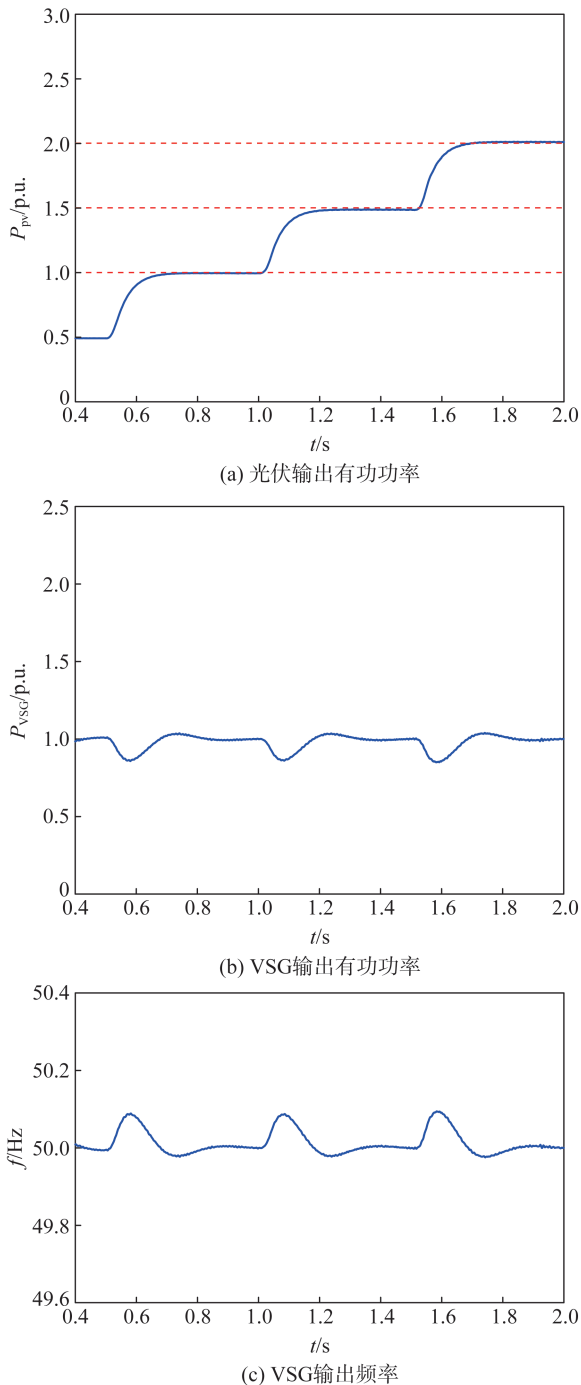


图9 控制参数调整后系统仿真波形

Fig. 9 System simulation waveform after adjusting control parameters

性和所提方法的有效性。因此,当光伏系统输出功率持续增大时,对于VSG储能系统,可以通过先增大 k_{qv1p} 和 k_{qc1p} ,再减小 k_{qv1i} 和 k_{qc1i} 来改善系统稳定性;对于光伏系统,可以通过先减小 k_{q1ppv} 和 k_{q1ipv} 和增大 k_{q2ppv} 再减小 k_{q2ipv} 来改善系统稳定性。

3.2 SCR变化

设置VSG储能系统的输出功率 P_e 恒定为1 p. u.; 光伏系统初始输出功率为1 p. u.,在不同电网强度

下,令光伏系统输出功率在 $t=1.5$ s突增20%,观察系统仿真波形。不同SCR下系统仿真波形如图10所示。由图10可知,随着SCR的减小,系统的稳定性逐渐降低。

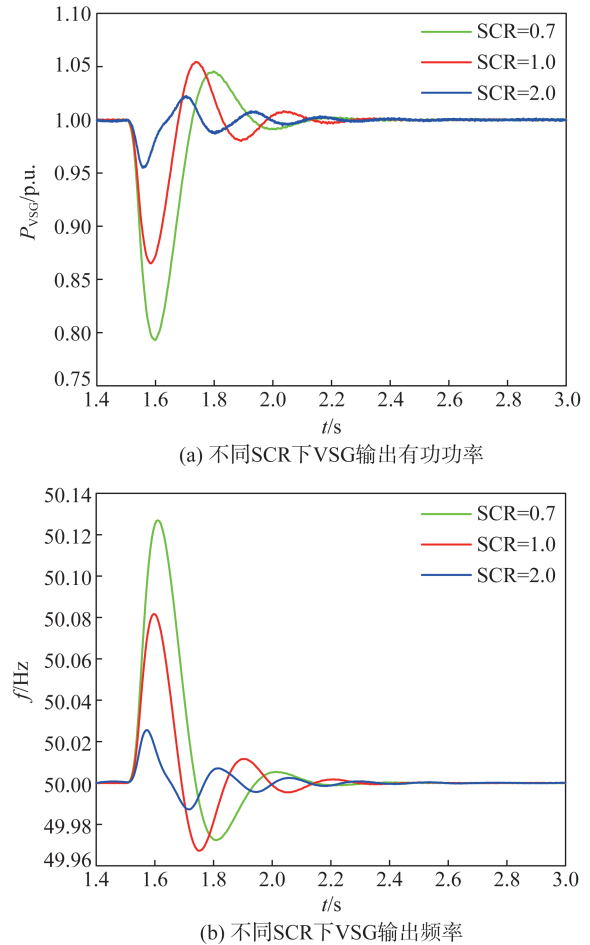


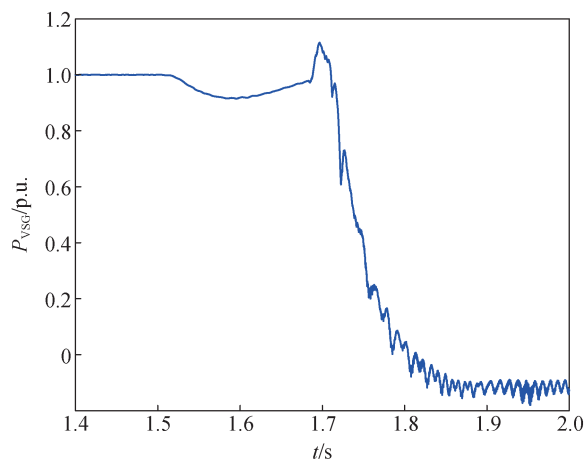
图10 不同SCR下系统仿真波形

Fig. 10 System simulation waveforms under different SCR conditions

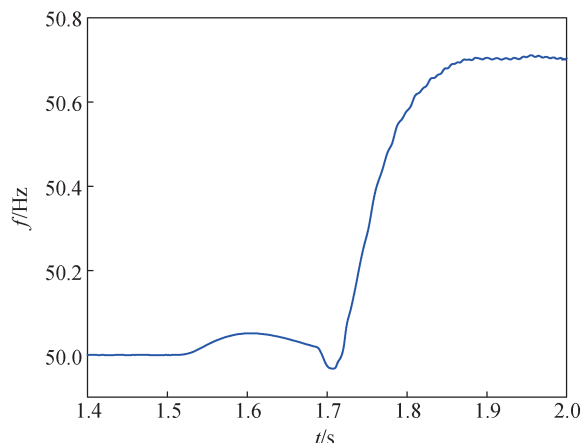
SCR=0.6时系统仿真波形如图11所示。由图11可知,当SCR减小到0.6时,系统处于临界稳定状态, $t=1.5$ s光伏系统出力发生波动后,系统失稳。

通过对系统状态空间的分析,考虑调整VSG储能系统内外环 q 轴控制参数来提高系统的稳定性。将VSG系统电压外环PI参数 k_{qv1p} 、 k_{qv1i} 由1、100调整至1.5、50;VSG系统电流内环PI参数 k_{qc1p} 、 k_{qc1i} 由10.5、20 000调整至100、15 000,观察不同SCR下系统的仿真波形。控制参数调整后SCR=0.6时系统仿真波形如图12所示。

由图12可知, $t=1$ s光伏系统出力突增20%后,系统保持稳定; $t=2$ s,光伏系统出力突增50%后,系统依然保持稳定,验证了分析的正确性和所提方法的有效性。因此,光伏和VSG储能系统连接弱电网



(a) SCR=0.6时VSG输出有功功率



(b) SCR=0.6时VSG输出频率

图11 SCR=0.6时系统仿真波形

Fig. 11 System simulation waveform at SCR=0.6

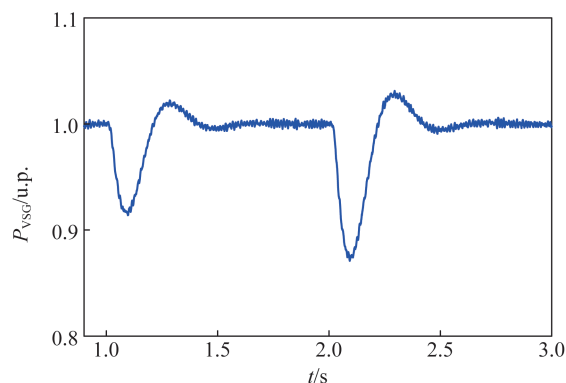
时,可以通过先增大 k_{qv1p} 和 k_{qc1p} ,再减小 k_{qv1i} 和 k_{qc1i} 来改善系统稳定性。

4 结论

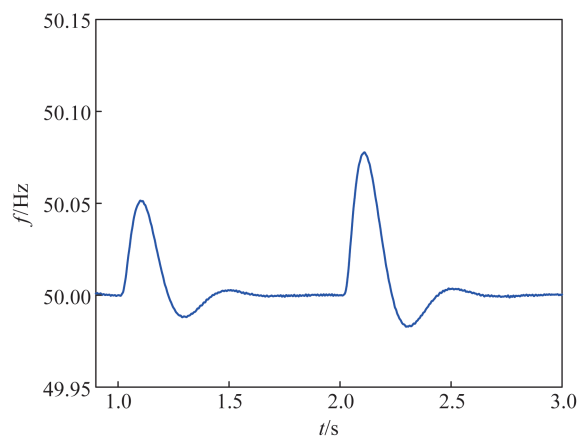
1)本文所提弱电网下光伏和VSG储能系统的小信号建模方法能够正确和有效反映不同参数变化对系统的影响。

2)光伏出力增加的过程中VSG储能系统内外环 q 轴控制参数和光伏系统内外环 q 轴控制参数有较高的灵敏度,根据控制参数对系统的影响程度,VSG储能系统可以通过先增大电压电流环 q 轴比例系数再减小电压电流环 q 轴积分系数来改善系统稳定性;光伏系统可以通过先增大外环 q 轴比例积分系数和减小内环 q 轴比例系数再减小内环 q 轴积分系数来改善系统稳定性。

3)SCR降低的过程中VSG储能系统内外环 q 轴控制参数有较高的灵敏度,根据控制参数对系统的影响程度,VSG储能系统可以通过先增大电压电流环



(a) VSG输出有功功率



(b) VSG输出频率

图12 控制参数调整后SCR=0.6时系统仿真波形

Fig. 12 System simulation waveform with SCR=0.6 after adjusting control parameters

q 轴比例系数再减小电压电流环 q 轴积分系数来改善系统稳定性。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

陈浩立设计VSG-光伏协同控制实验方案,搭建MATLAB/Simulink仿真平台;梁远升设计系统稳定性分析的整体研究思路,制定小信号建模与参数灵敏度分析方案;李佳对研究方案的可行性进行调查分析,实施研究过程;李海锋起草论文,修订论文,审核论文;王钢参与论文修订、论文最终版本修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

5 参考文献

- [1] 杨效,曾成碧,赖辉,等. 弱电网下基于谐波状态空间模型的光储—虚拟同步发电机稳定性分析与优化控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 34-47.
YANG Xiao, ZENG Chengbi, LAI Hui, et al. A stability analysis method and optimal control of a photovoltaic energy storage-virtual synchronous generator based on a harmonic state space model in a

- weak grid [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 34-47.
- [2] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [3] 易铭. 光伏储能系统连接弱电网的稳定性分析及低频振荡抑制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- YI Ming. Stability analysis and low frequency oscillation suppression of photovoltaic and energy sustem connected to weak grid [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [4] 王亚华, 舒全峰. 中国精准扶贫的政策过程与实践经验[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2021, 36(1): 141-155, 205.
- WANG Yahua, SHU Quanfeng. The policy process and practical experience of the targeted poverty alleviation in China[J]. Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences), 2021, 36(1): 141-155, 205.
- [5] 国家能源局. 新时代中国能源在高质量发展道路上奋勇前进[N]. 人民日报, 2020-12-31(011).
- [6] 兰征, 龙阳, 曾进辉, 等. 考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率振荡抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 131-141.
- LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. Transient power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator considering overshoot [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 131-141.
- [7] 王振浩, 张越, 成龙, 等. 多参数协同自适应的改进虚拟同步控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2403-2414.
- WANG Zhenhao, ZHANG Yue, CHENG Long, et al. Improved virtual synchronization control strategy with multi-parameter adaptive collaboration [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2403-2414.
- [8] GUO L L, XU Z Y, JIN N, et al. A weighted voltage model predictive control method for a virtual synchronous generator with enhanced parameter robustness [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(4): 1-11.
- [9] 胡英杰, 李强, 李群. 考虑容量限制的构网型光储系统惯量与一次调频参数优化配置方法[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 115-122.
- HU Yingjie, LI Qiang, LI Qun. Co-optimization of inertia and droop control coefficient for grid-forming photovoltaic-storage system considering capacity limits [J]. Electric Power, 2024, 57(10): 115-122.
- [10] 石荣亮, 张烈平, 王文成, 等. 基于频率微分原理的储能变换器虚拟惯量控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2088-2101.
- SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. Research on virtual inertia control strategy for energy storage converters based on a frequency derivative scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2088-2101.
- [11] 林继灿, 刘沈全, 王钢, 等. 基于一致性算法的多虚拟同步机功率振荡协调抑制[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4668-4682.
- LIN Jican, LIU Shenquan, WANG Gang, et al. Coordinated power oscillation suppression of multi-VSG based on consensus algorithm [J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4668-4682.
- [12] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.
- ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [13] 项中明, 倪秋龙, 李振华, 等. 采用功率同步控制的构网型换流器并网暂态同步稳定研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(9): 77-88.
- XIANG Zhongming, NI Qiulong, LI Zhenhua, et al. Research on transient synchronous stability of integrated grid-forming converters using power synchronization control [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(9): 77-88.
- [14] 杨万里, 涂春鸣, 肖凡, 等. 面向频率稳定性提升的VSG暂态稳定性增强方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 52-66.
- YANG Wanli, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Transient stability enhancement method of VSG with frequency stability improvement [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 52-66.
- [15] SUN K, YAO W, WEN J Y, et al. A two-stage simultaneous control scheme for the transient angle stability of VSG considering current limitation and voltage support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2137-2150.
- [16] 龚凯, 肖晃庆, 张展, 等. 新能源并网换流器的自适应混合同步控制及其小信号稳定性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(11): 3-14.
- GONG Kai, XIAO Huangqing, ZHANG Zhan, et al. Adaptive hybrid synchronization control of grid-connected converters in renewable power plants and its small-signal stability analysis [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11): 3-14.
- [17] 杨成顺, 王鹏, 许德智, 等. 基于改进虚拟惯性控制的直流充电桩控制方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(5): 150-159.
- YANG Chengshun, WANG Peng, XU Dezhi, et al. DC charging pile control method based on improved virtual inertia control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5): 150-159.
- [18] 陆海洋, 汪楠楠, 马秀达, 等. 新能源经柔直送出系统的VSG控制及故障穿越策略[J]. 浙江电力, 2024, 43(7): 10-19.
- LU Haiyang, WANG Nannan, MA Xiuda, et al. Virtual synchronous generator control and fault ride-through strategies of VSC-HVDC system for new energy transmission [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 10-19.
- [19] 刘桃志, 庞丹, 葛津铭, 等. 计及光储接入场景下的柔性互联系统多模式优化运行[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(6): 1-10.
- LIU Guangzhi, PANG Dan, GE Jinming, et al. The multi-mode optimization operation of the flexible interconnection system considering the photovoltaic and energy storage access scenarios [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(6): 1-10.
- [20] 管敏渊, 姚瑛, 吴圳宾, 等. 基于RBF神经网络的储能VSG控制策略优化[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 55-64.
- GUAN Minyuan, YAO Ying, WU Zhenbin, et al. Optimization of energy storage VSG Control strategy based on RBF neural networks [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 55-64.
- [21] 李宇骏, 陆艺源, 牟同鹏, 等. 新能源发电经换流器并网系统的稳定性分析与控制综述[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 79-94.
- LI Yujun, LU Yiyuan, MU Tongpeng, et al. A review of stability analysis and control of renewable energy integration systems via converters [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 79-94.
- [22] 李可雨, 王峰, 贾红云, 等. 基于光伏逆变器的快速功率控制系统研究及应用[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 241-247.

LI Keyu, WANG Feng, JIA Hongyun, et al. Research and application of rapid power control system based on photovoltaic inverter [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42 (4): 241-247.

[23] 龚仁喜,黎洛琦,王奇. 一种虚拟同步发电机自适应阻尼补偿方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 83-88.

GONG Renxi, LI Luoqi, WANG Qi. An adaptive damping compensation method for virtual synchronous generators [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 83-88.

[24] 曾德银,姚骏,张田,等. 虚拟同步发电机多机并联系统的频率小信号稳定性分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2048-2061, 2385.

ZENG Deyin, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Research on frequency small-signal stability analysis of multi-parallel virtual synchronous generator-based system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2048-2061, 2385.

[25] 温春雪,毛健,王鹏,等. 基于虚拟同步发电机的构网型光储变流器控制策略研究[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(1): 1-8.

WEN Chunxue, MAO Jian, WANG Peng, et al. Research on control strategy of grid-configured photovoltaic storage converters based on VSG[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(1): 1-8.

[26] 杨赞,梅飞,张宸宇,等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.

YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.

[27] 杨萍,陈卓,罗婷,等. 基于VSG的光伏发电与混合储能的控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 83-91, 113.

YANG Ping, CHEN Zhuo, LUO Ting, et al. A control method of photovoltaic power generation and hybrid energy storage based on VSG [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 83-91, 113.

[28] 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.

[29] YU Y, GUAN Y J, KANG W F, et al. Fractional-order virtual synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 6874-6879.

[30] 段玉,朱子民,王小云,等. 基于改进粒子群算法的自适应构网型变流器控制策略[J]. 广东电力, 2024, 37(2): 10-17.

DUAN Yu, ZHU Zimin, WANG Xiaoyun, et al. Adaptive grid-type converter control strategy based on improved particle swarm algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(2): 10-17.

[31] 昆德. 电力系统稳定与控制[M]. 《电力系统稳定与控制》翻译组,译. 北京: 中国电力出版社, 2002.

KUNDUR P. Power system stability and control [M]. Translation Group of Power System Stability and Control, trans. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

收稿日期: 2024-11-25 修回日期: 2025-01-16

作者简介:

陈浩立(2000),男,硕士研究生,研究方向为交直流混联孤岛配电网的控制与优化;

梁远升(1980),男,博士,副教授,通信作者,研究方向为配电网电压风险评估、电力系统保护、控制和自动化,E-mail: ysliang@scut.edu.cn;

李佳(1999),女,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电系统的控制稳定与优化;

李海锋(1976),男,博士,教授,研究方向为电力系统故障分析与保护;

王钢(1966),男,博士,教授,研究方向为电力系统保护、控制与自动化。

(编辑 景贺峰)

附录 A

表 A1 弱电网下光伏和VSG储能系统的系统参数
Table A1 System parameters of photovoltaic and VSG energy storage systems under weak current grid

参数	数值	参数	数值
VSG有功给定值/kW	100	光伏直流电压参考值/V	800
VSG无功给定值/var	0	光伏输出无功参考值/var	0
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.1	光伏系统输入有功/kW	100
阻尼系数 D	80	光伏电压环 d 轴PI参数	10, 100
VSG有功下垂系数	100	光伏电压环 q 轴PI参数	1, 10
VSG无功下垂系数	1/200	光伏电流环PI参数	10, 100
VSG无功积分系数	1/15	光伏系统滤波电感/mH	2
VSG虚拟阻抗	$-1\times10^{-3}, 0.4\times10^{-3}$	交流线路电阻/ Ω	0.060 5
VSG滤波电感/mH	1.35	交流线路电感/mH	0.44
VSG滤波电容/ μF	50	交流电网电压/V	380
VSG电压环PI参数	1, 100	VSG电流环PI参数	10.5, 2000

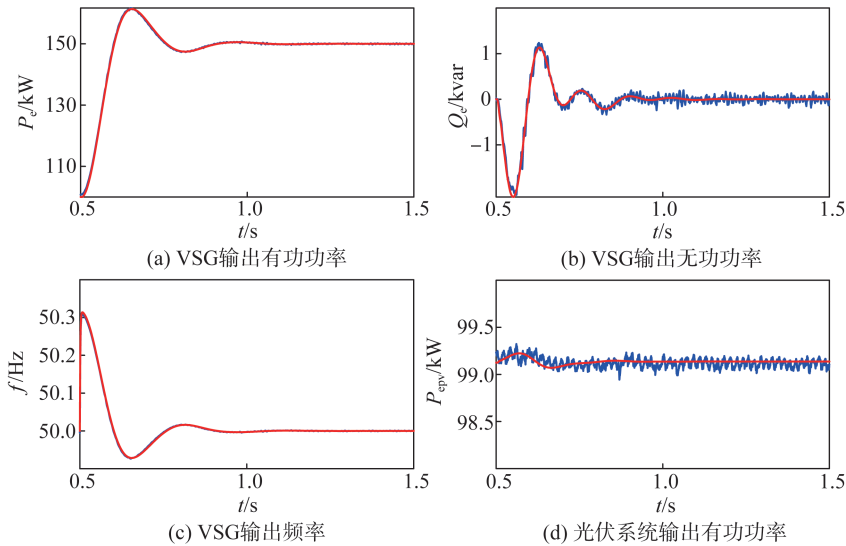


图 A1 小信号模型与仿真模型的对比

Fig. A1 Comparison between small signal model and simulation model

表 A2 弱电网下光伏和 VSG 储能系统特征根

Table A2 Characteristic roots of photovoltaic and VSG energy storage systems under weak AC grid

序号	特征根	振荡频率/Hz	阻尼比
1	-20.00	0	0
2	-50 922.30	0	0
3,4	-28 029.58 ± 9 211.99i	1 466.130	0.95
5,6	-3 166.11 ± 14 082.06i	2 241.230	0.21
7,8	-209.81 ± 11 318.74i	1 801.430	0.01
9,10	-1 391.33 ± 151.81i	24.160	0.99
11,12	-62.92 ± 594.33i	94.590	0.11
13	-803.72	0	0
14	-152.88	0	0
15,16	-8.65± 46.84i	7.450	0.18
17,18	-100.21 ± 0.10i	0.010	0.99
19,20	-9.70 ± 20.16i	3.200	0.43
22,23	-9.99 ± 0.007i	0.001	0.99
24	-9.99	0	0

表 A3 各模态主要参与因子编号说明

Table A3 Explanation of the main participating factor numbers for each modality

编号	说明	编号	说明
1	VSG 储能系统输出有功功率	11	VSG 输出 q 轴电压实际值与参考值差值的积分
2	VSG 储能系统输出无功功率	12	VSG 输出 q 轴电流实际值与参考值差值的积分
3	VSG 储能系统输出电压 d 轴分量	13	VSG 储能系统输出相位
4	VSG 储能系统输出电压 q 轴分量	16	光伏系统输出电流 q 轴分量
5	VSG 储能系统逆变器输出电流 d 轴分量	18	光伏系统输出无功功率实际值与参考值差值积分
6	VSG 储能系统逆变器输出电流 q 轴分量	20	光伏系统输出电流 q 轴分量实际值与参考值积分
8	VSG 输出无功功率测量值与计算值差值的积分	22	光伏系统输出无功功率
9	VSG 输出 d 轴电压实际值与参考值差值的积分	23	交流线路电流 d 轴分量
10	VSG 输出 q 轴电压实际值与参考值差值的积分	24	交流线路电流 q 轴分量