

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230103

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

杨效¹, 曾成碧¹, 赖辉¹, 吴雪峰¹, 苗虹¹, 刘文飞², 杨勇²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术因提供阻尼和惯量而被广泛用于新能源并网逆变器。光储并网易发生频率耦合等问题, 因而 VSG 并网稳定性分析变得更加复杂。针对光储并网系统, 考虑频率耦合, 在 dq 域中建立基于谐波状态空间(harmonic state space, HSS)理论的多时间尺度虚拟同步发电机模型。采用归一化参数灵敏度分析法, 揭示功率环、电压环和低通滤波中虚拟惯量 J 、虚拟阻尼 D_p 、下垂系数 K_u 、比例系数 k_{pu} 和截止频率 ω_c 等关键控制参数根轨迹的特性和电网强度对系统稳定性的影响。并通过调整优化控制参数, 提高系统稳定性。最后在 Matlab/Simulink 仿真平台验证谐波状态空间模型精确度和关键参数根轨迹特性。

关键词: 虚拟同步发电机; 弱电网; 谐波状态空间; 稳定性分析

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

YANG Xiao¹, ZENG Chengbi¹, LAI Hui¹, WU Xuefeng¹, MIAO Hong¹, LIU Wenfei², YANG Yong²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) technology is widely used in the control of new energy grid-connected inverters because it provides damping and inertia. It is easy to cause frequency coupling when photovoltaic energy storage systems are connected to a weak grid, so analyzing the grid-connected stability of a VSG becomes more complicated. For photovoltaic energy storage systems connected to a weak grid, a multi-time scale VSG model based on harmonic state space (HSS) theory is established in the dq domain considering frequency coupling. The normalized parameter sensitivity analysis method is used to reveal the characteristics of root locus of key control parameters such as virtual inertia J , virtual damping D_p , droop coefficient K_u , proportional coefficient k_{pu} and cut-off frequency ω_c in power loop, voltage loop and low-pass filter, and the influence of power grid strength on system stability. The control parameters are adjusted and optimized to enhance system stability. Finally, the accuracy of the harmonic state space model and the root trajectory characteristics of the key parameters are verified on the Matlab/Simulink simulation platform.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Sichuan Province (No. 2023YFG0198).

Key words: virtual synchronous generator; weak power grid; harmonic state space; stability analysis

0 引言

虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制模拟同步机动态特性解决新能源并网导致惯量和阻尼不足而引发的稳定性问题。光储新能

源常分布于偏远地区, 电网呈现高感抗弱电网特性, 弱电网下并网换流器易发生谐振等稳定性问题^[1-4], 给光储-VSG 的稳定带来新的挑战。

建立系统的精准数学模型是分析弱电网下光储-VSG 稳定的前提。目前 VSG 并网系统的建模方法主要有阻抗模型法、状态空间法^[5-8]。阻抗模型法的物理意义明确、分析便捷, 但阻抗模型难以获取控制参数对振荡模态的灵敏度信息, 存在局限性^[9]。

基金项目: 四川省重点研发项目资助(2023YFG0198); 国家电网有限公司科技项目资助(52272222001J)

对于逆变器多频域系统, 国内外学者在状态空间理论的基础上, 研究谐波状态空间(harmonic state space, HSS)理论, 使时变周期系统(linear time periodic, LTP)在频域线性化, 理论上考虑所有谐波次数^[10-11]。相比于传统状态空间模型, HSS 可以有效处理多频率耦合, 适用于多频域系统动态特性和稳定性分析。谐波状态空间法最初应用于变频机车和 DC/DC 换流器建模^[12-13], 其后推广到模块化多电平换流器和并网换流器建模研究中。文献[14]建立多时间尺度下的模块化多电平换流器谐波状态空间模型, 但系统模型复杂、计算量大。文献[15]基于 HSS 建立 ab 域电压型并网逆变器模型, 用 HSS 模型有效描述系统频率耦合的动态特性。文献[16]提出一种通用的正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)开关函数傅里叶公式, 利用三相谐波平衡原理对谐波状态空间进行降阶。文献[17]基于 HSS 建立电容电流反馈有源阻尼 LCL 并网逆变器模型, 分析并网逆变器与电网之间谐波交互影响。文献[18]将谐波状态空间应用于 VSG 模型, 但未考虑电压电流环对系统的影响。

状态空间模型的稳定性分析常用的有灵敏度和

特征值分析方法, 分析结果用于控制器的优化设计^[19]。文献[20]建立下垂控制逆变器小信号状态空间模型, 提出实部和虚部灵敏度分析法, 提供特征根特性。文献[21]建立虚拟同步机(virtual synchronous machine, VSM)小信号状态空间模型, 分析 VSM 稳定性对有功阻尼的灵敏度, 调整有功阻尼能够增强系统稳定性。文献[22]建立 VSG 状态空间模型, 通过灵敏度分析和特征值分析揭示延时时间延长会恶化虚拟同步发电机稳定性。文献[23]建立考虑直流动态电压的光伏 VSG 小信号状态空间模型, 特征值分析指出光伏 MPPT 控制降低 VSG 稳定性。但均未实现多频域系统模型准确描述。

为探讨在弱电网条件下 VSG 并网系统稳定性分析方法, 本文建立基于谐波状态空间模型的光储-VSG 并入弱电网多频域系统的数学模型, 利用灵敏度和特征值对系统进行稳定性分析, 并给出稳定域控制参数设计, 搭建 VSG 并入弱电网的 Simulink 模型, 验证本文稳定性分析方法的有效性和正确性。

1 光储-VSG 并网换流器

光储-VSG 拓扑及控制结构如图 1 所示。直流

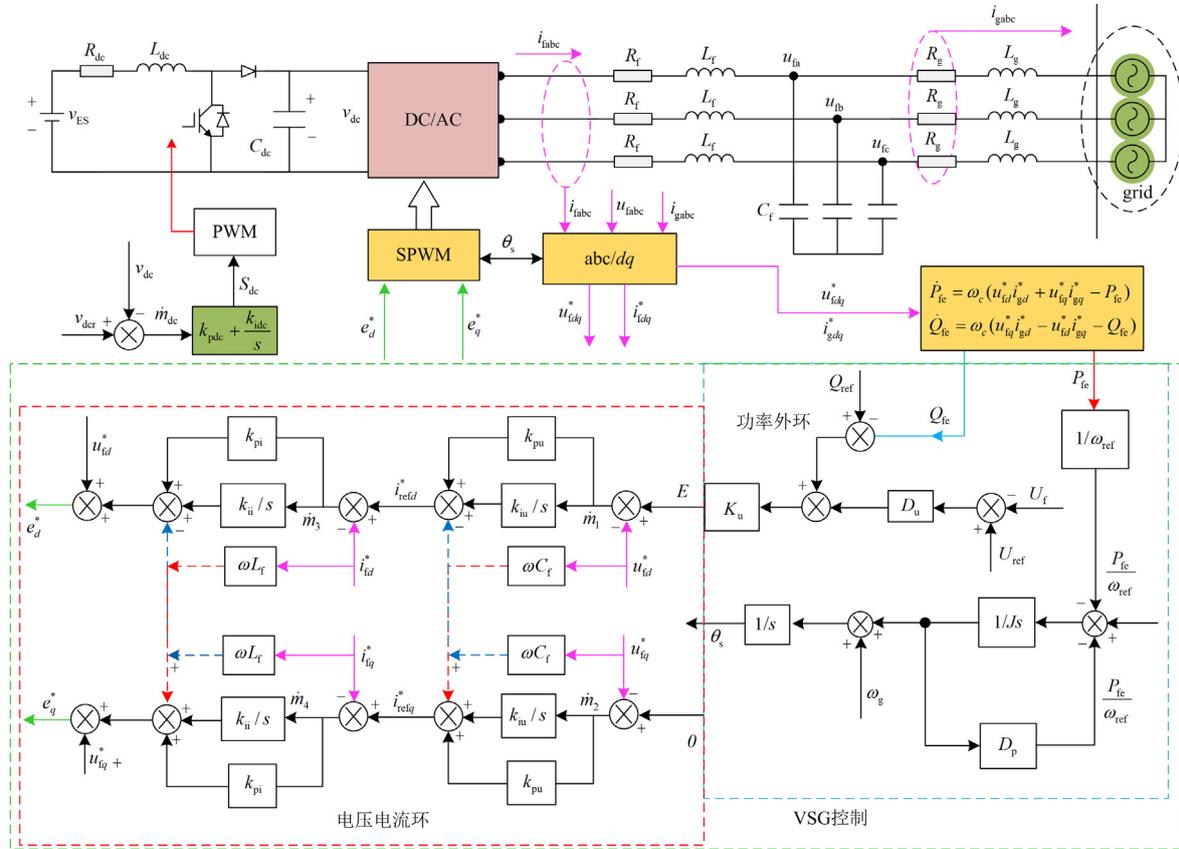


图 1 光储-VSG 并网换流器拓扑及控制框图

Fig. 1 ES-VSG grid-connected topology and control block diagram

$$\Gamma(x_d) = \begin{bmatrix} X_1 & X_{-3} & X_{-5} & 0 & 0 \\ X_3 & X_1 & X_{-3} & X_{-5} & 0 \\ X_5 & X_3 & X_1 & X_{-3} & X_{-5} \\ 0 & X_5 & X_3 & X_1 & X_{-3} \\ 0 & 0 & X_5 & X_3 & X_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\Gamma(x_q) = \begin{bmatrix} 0 & jX_{-3} & jX_{-5} & 0 & 0 \\ -jX_3 & 0 & jX_{-3} & jX_{-5} & 0 \\ -jX_5 & -jX_3 & 0 & jX_{-3} & jX_{-5} \\ 0 & -jX_5 & -jX_3 & 0 & jX_{-3} \\ 0 & 0 & -jX_5 & -jX_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

以公共点 dq 域作为参考坐标系, 假定 VSG 控制系统的 dq 域与公共 dq 域之间功角差为 δ_s , dq 域转移矩阵如式(12)^[24]所示。

$$\mathbf{T}_{dq}(\delta_s) = \begin{bmatrix} \cos(\delta_s) & -\sin(\delta_s) \\ \sin(\delta_s) & \cos(\delta_s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

假定控制系统中 dq 域变量表示为 x^* , 状态变量转移过程为

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{dq}(\delta_s) \begin{bmatrix} x_d^* \\ x_q^* \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(9)和式(12)可知, HSS 模型 dq 坐标系变换示意图如图 2 所示, 其方程见式(14)。

$$\begin{bmatrix} X_{d,\pm h} \\ X_{q,\pm h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_s & -\sin \delta_s \\ \sin \delta_s & \cos \delta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{d,\pm h}^* \\ X_{q,\pm h}^* \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(14)将 HSS 模型的谐波分量统一于参考 dq 坐标系下。

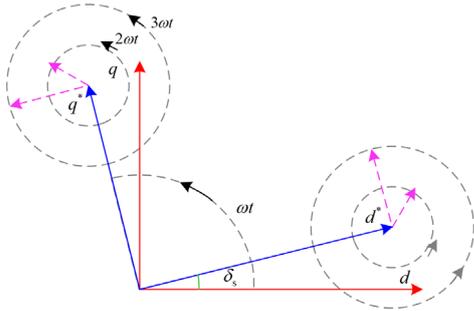


图 2 dq 坐标系变换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dq frame transformation

2.3 状态空间线性化

详细小信号模型见附录 A, VSG 小信号模型矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(t_0) & \mathbf{B}_1(t_0) & \mathbf{B}_2(t_0) \\ \mathbf{C}_1(t_0) & \mathbf{D}_1(t_0) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta x &= [\Delta i_{gd} \ \Delta i_{gq} \ \Delta i_{fd} \ \Delta i_{fq} \ \Delta u_{fd} \ \Delta u_{fq} \ \Delta m_1 \ \Delta m_2 \ \Delta m_3 \\ &\quad \Delta m_4 \ \Delta \delta_s \ \Delta \omega_s \ \Delta E \ \Delta P_{ef} \ \Delta Q_{ef} \ \Delta v_{dc} \ \Delta i_{dc} \ \Delta m_{dc}] \\ \Delta u_1 &= [\Delta S_{dc} \ \Delta S_d \ \Delta S_q \ \Delta \omega_g \ \Delta P_{ref} \ \Delta Q_{ref} \ \Delta i_{fd}^* \ \Delta i_{fq}^* \ \Delta u_{fd}^* \\ &\quad \Delta u_{fq}^* \ \Delta e_d \ \Delta e_q] \end{aligned}$$

$$\Delta u_2 = [\Delta v_{ES} \ \Delta u_{gd} \ \Delta u_{gq}]$$

式中: Δu_1 为系统输入变量; ΔS_{dc} 为 Boost 电路开关函数变量; ΔS_d 、 ΔS_q 为三相换流器开关函数 dq 轴变量; Δi_{fd}^* 、 Δi_{fq}^* 为控制系统 dq 域下滤波电流 dq 轴分量; Δu_{fd}^* 、 Δu_{fq}^* 为控制系统 dq 域下滤波电压 dq 轴分量; Δe_d 、 Δe_q 为公共 dq 域下输入 PWM 环节的调制波 dq 轴分量; Δu_2 为外部输入变量; Δv_{ES} 为光储输出直流电压分量; Δu_{gd} 、 Δu_{gq} 为公共 dq 域下电网电压 dq 轴分量; Δx 为系统状态变量; Δi_{gd} 、 Δi_{gq} 为公共 dq 域下电网电流 dq 轴分量; Δi_{fd} 、 Δi_{fq} 为公共 dq 域下滤波电流 dq 轴分量; Δu_{fd} 、 Δu_{fq} 为公共 dq 域下滤波电压 dq 轴分量; Δm_1 、 Δm_2 为电压环 dq 轴误差积分变量; Δm_3 、 Δm_4 为电流环 dq 轴误差积分变量; Δv_{dc} 、 Δi_{dc} 分别为直流侧电压变量和电流变量; Δm_{dc} 为直流侧电压误差积分变量; t_0 为系统处于稳定运行的时刻。根据式(15), 可得式(16)。

$$\mathbf{A}'(t_0) = \mathbf{A} - \mathbf{B}_1 \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{C}_1 \quad (16)$$

根据式(15)和式(16), 图 1 所示的光储-VSG 并网系统的状态空间矩阵为

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A}'(t_0) \Delta x + \mathbf{B}_2(t_0) \Delta u_2 \quad (17)$$

根据 Toeplitz 矩阵, 小信号模型(17)转换为 HSS 模型, 状态空间为

$$\dot{X} = (\mathbf{A}_H - \mathbf{N})X + \mathbf{B}_H U \quad (18)$$

式中, \mathbf{A}_H 、 \mathbf{B}_H 分别为 $\mathbf{A}'(t_0)$ 、 $\mathbf{B}_2(t_0)$ 的 Toeplitz 矩阵形式, 表示不同谐波分量特性。

2.4 HSS 的 VSG 小信号模型验证

一般认为电网强度(short circuit ratio, SCR)小于 10 为弱电网^[26-27], 图 1 的光储-VSG 并网系统参数由表 1 给出, 计算得到 $L_g > 3.61$ mH 时光储-VSG 并入弱电网。

光储-VSG 的 HSS 数学模型的解析结果和 Simulink 仿真结果对比见附录 B, 光储-VSG 的 HSS 数学模型的稳态电流电压及功率、功率动态响应都与 Simulink 仿真结果一致, 验证本文建立的 HSS 模型在稳态运行和动态过程中有效且准确。

为进一步证明 HSS 模型在多频域尺度下的准确性。在电网侧注入 3、5、7 次谐波, 参数如表 2

所示, 比较分析了 HSS 模型和 Simulink 仿真的时域波形, 如图 3 所示。可见, HSS 模型的 dq 域下电网电流与仿真电流基本一致, HSS 模型的有功功率波动与 Simulink 仿真中有功功率波动重合, 验证 HSS 模型在不同频域下精确性高。

表 1 光储-VSG 并入弱网系统参数

参数	取值	参数	取值
k_{pu}	3	P_{ref}/kW	10
J	10	$Q_{ref}/kvar$	8
D_p	100	L_r/mH	3.6
D_u	50	L_g/mH	8
K_u	0.5	$C_f/\mu F$	20
U_{dc}/V	1000	U_{ref}/V	220

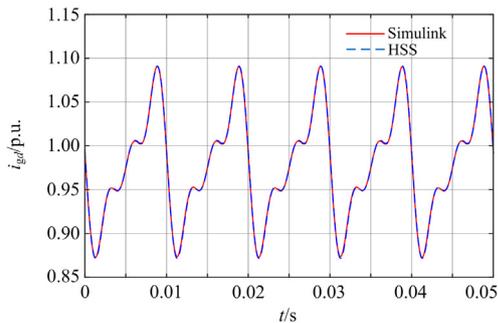
3 HSS 模型稳定性分析方法

3.1 灵敏度分析

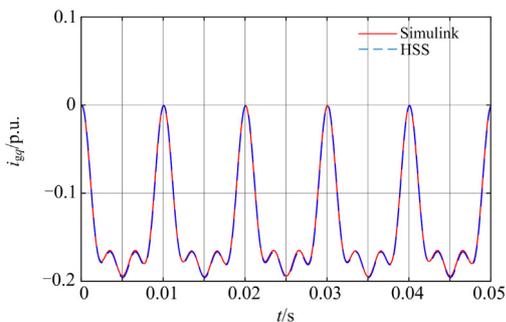
采用表 1 的参数, 光储-VSG 并网系统特征根的分布见附录 C 图 C1, 系统特征根都在坐标轴左侧, 表明光储-VSG 并网系统稳定。特征根的分布

表 2 电网侧谐波参数

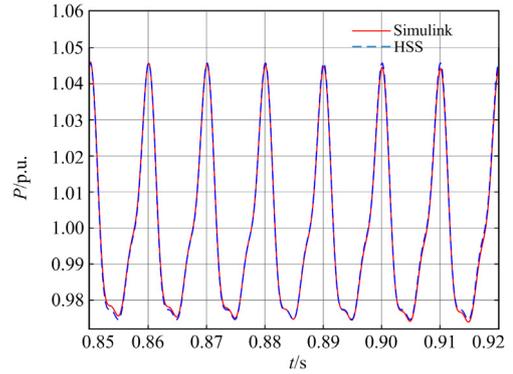
电压谐波次数	幅值/p.u.
基波	1
3	0.05
5	0.05
7	0.05



(a) 电网电流 d 轴分量



(b) 电网电流 q 轴分量



(c) VSG 输出有功功率

图 3 HSS 模型和 Simulink 的时域波形

Fig. 3 Time domain waveform of HSS model and Simulink

可以分为 3 个不同区域, 区域一的特征根主要与电路拓扑有关, 区域二的特征根主要与电流内环有关, 区域三的特征根主要与电压内环及功率环有关^[21]。特征根 $\lambda = \sigma \pm j\omega$ 中, σ 为阻尼, ω 为振荡频率。在虚轴附近主导并网系统模态并对系统稳定性起决定性作用特征根, 本文定义为“主导模态”, 区域三的特征根即为主导模态。

本文采用归一化灵敏度分析方法^[22], 阻尼灵敏度和振荡频率灵敏度计算公式如式(19)和式(20)所示。

$$S_{\sigma_i} = \frac{d\sigma_i}{d\alpha} \frac{|\alpha|}{|\sigma_i|} = \frac{1}{2} \left(\mathbf{u}_i^T \frac{d\mathbf{A}_{inv}}{d\alpha} \mathbf{w}_i + \mathbf{u}_k^T \frac{d\mathbf{A}_{inv}}{d\alpha} \mathbf{w}_k \right) \frac{|\alpha|}{|\sigma_i|} \quad (19)$$

$$S_{\omega_i} = \frac{d\omega_i}{d\alpha} \frac{|\alpha|}{|\omega_i|} = \frac{1}{2j} \left(\mathbf{u}_i^T \frac{d\mathbf{A}_{inv}}{d\alpha} \mathbf{w}_i - \mathbf{u}_k^T \frac{d\mathbf{A}_{inv}}{d\alpha} \mathbf{w}_k \right) \frac{|\alpha|}{|\omega_i|} \quad (20)$$

式中: $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ 为 λ_k 对应得共轭特征根; \mathbf{A}_{inv} 为 HSS 模型 $\mathbf{A}_H - \mathbf{N}$ 矩阵; \mathbf{u}_i 和 \mathbf{w}_i 分别为矩阵 \mathbf{A}_{inv} 的左特征向量和右特征向量。

由基频特征根与其他频域特征根之间的映射关系, 在不同频域的同类型特征根称为同组特征根, 以 $\{\lambda_3, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8\}$ 为例, 同组特征根的阻尼灵敏度相同, 如图 4 所示。

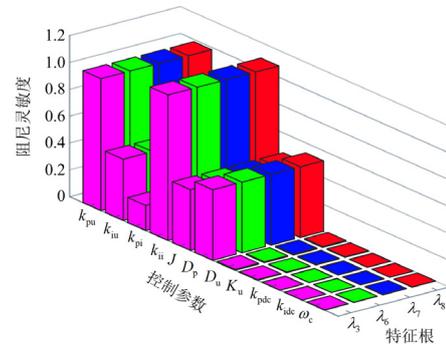


图 4 同组特征根的阻尼灵敏度

Fig. 4 Damping sensitivity of parameters to the same group of eigenvalues

由于系统稳定性主要取决于主导模态, 本文只讨论不同控制参数对主导模态的阻尼灵敏度, 如图5所示。控制参数 k_{pu} 、 k_{iu} 、 k_{ii} 、 J 、 D_p 、 D_u 、 K_u 对 λ_5 阻尼灵敏度较大, 此控制参数对系统稳定性有较程度的影响, 优化调整此控制参数有利于提高系统稳定性。 ω_c 对 λ_5 阻尼灵敏度不低, ω_c 对系统稳定性有一定的影响, 在设计参数时不可忽视 ω_c 。 k_{pdc} 、 k_{idc} 对 λ_2 阻尼灵敏度较高, 改变直流侧控制参数(k_{pdc} 、 k_{idc})会影响并网系统稳定性。

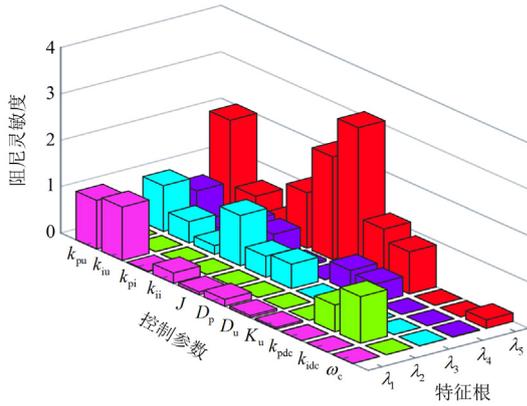


图5 关键特征根的阻尼灵敏度

Fig. 5 Damping sensitivity of parameters to key eigenvalues

振荡频率灵敏度如图6所示, 大部分特征根振荡频率灵敏度极小, 本文忽略不计(图中对应特征根参考附录C)。电压PI控制的比例系数 k_{pu} 和积分系数 k_{iu} 对 λ_1 振荡频率灵敏度较高, 可以调节电压PI控制器参数获得较低得振荡频率。虚拟阻尼 D_p 和虚拟惯量 J 在 λ_5 的振荡灵敏度较大, 而且 D_p 对 λ_5 的振荡灵敏度大于 J , 表明 D_p 和 J 对振荡频率均有一定的影响, 若要减少振荡频率, 调节虚拟惯量的效果好于调节虚拟阻尼。直流电压控制中 k_{pdc} 对 λ_{12} 、 λ_{13} 的振荡灵敏度不低, 表明 k_{pdc} 对系统振荡频率也有一定的影响。

3.2 参数根轨迹特性分析方法

基于光储-VSG 并网的 HSS 模型, 使用特征值分析方法绘制不同参数的根轨迹来分析光储-VSG 并网系统稳定性。由于谐波状态空间的特征根存在频域映射关系, 同组特征根阻尼灵敏度相同, 同组特征根轨迹变化趋势也相同, 根轨迹如图7所示, 所以只需讨论一个频域中的关键根轨迹。基于前述灵敏度的分析, 选取 k_{pu} 、 J 、 D_p 等作为研究系统

稳定性的关键参数, 给出弱电网($L_g = 8 \text{ mH}$)下不同参数变化时的 VSG 并网系统的根轨迹, 色标尺表示参数变化范围内的百分比。

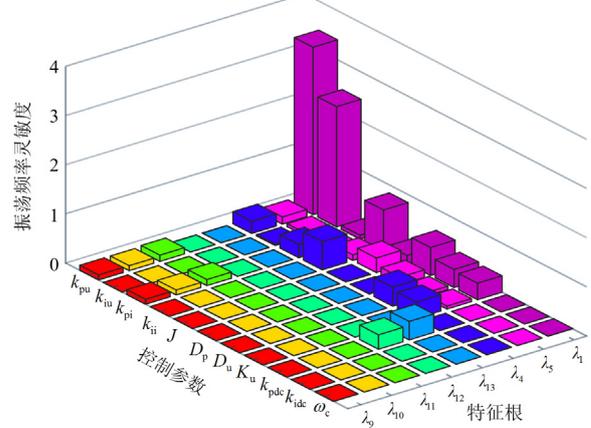


图6 振荡频率灵敏度

Fig. 6 Oscillation frequency sensitivity

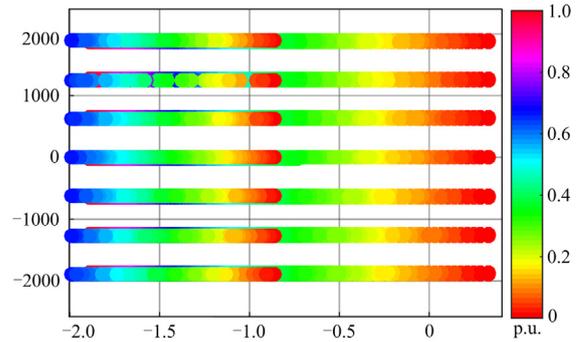


图7 同组特征根轨迹

Fig. 7 Eigenvalue trajectories of the same set

由图8(a)可知, 随着电压环比例系数 k_{pu} 增加, 主导模态 λ_5 向左移动, 在 k_{pu} 增至 1.8 时穿过虚轴, 表明系统从失稳状态趋于稳定, 稳定性呈现单调递增趋势, 适当增大 k_{pu} 有利于增强系统稳定性。由图8(b)可知, 随着电压环积分系数 k_{iu} 增加, 主导模态 λ_5 向右移动, 在 k_{iu} 增至 24 时重新向左移动, 表明系统稳定性呈现非单调变化趋势, 适当增大 k_{iu} 有利于增强系统稳定性。

由图9(a)可知, 随着 k_{ii} 增加, 主导模态 λ_5 向右移, 表明系统稳定性降低。由图9(b)可知, 随着 ω_c 增加, 主导模态 λ_5 向左移, 在 ω_c 增至 15π 时, 系统恢复稳定, 表明系统稳定性持续上升, 呈现单调递

增趋势； ω_c 设计过窄，限制功率环响应速度，造成系统失稳，过宽会引入高频分量，因此选取合适的 ω_c 对系统稳定性有重要意义。

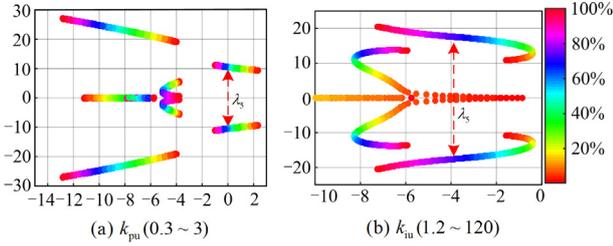


图 8 k_{pu} 和 k_{iu} 的根轨迹

Fig. 8 Eigenvalue trajectories of k_{pu} and k_{iu}

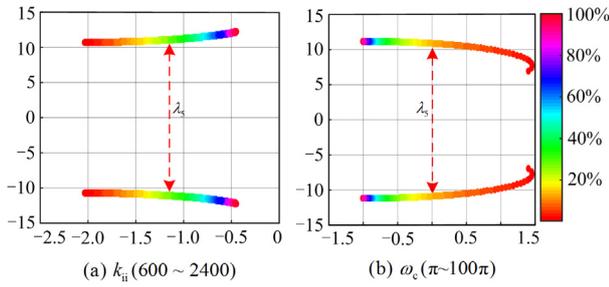


图 9 k_{ii} 和 ω_c 的根轨迹

Fig. 9 Eigenvalue trajectories of k_{ii} and ω_c

由图 10(a)可知，随着虚拟惯量 J 增加，主导模态 λ_5 先向右移动，在 J 增至 60 时转向左移动，系统稳定性呈现非单调变化趋势，表明 J 在一定范围内增加会降低弱电网下 VSG 并网系统的稳定性，甚至系统失稳，因此为兼顾系统稳定性和 VSG 惯量作用，需要根轨迹特性合理调整 J ，避免 J 过大造成系统失稳。由图 10(b)可知，随着 D_p 增加，主导模态 λ_5 先向左移动，在 D_p 增至 68 时越过虚轴，表明系统恢复稳定，在 D_p 增至 280 时转向左移动，表明此时并网系统的稳定性开始降低，呈现非单调变化趋势；因此在根轨迹转折点处系统稳定性最高。

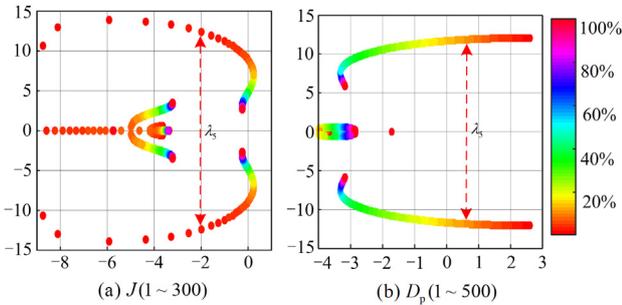


图 10 J 和 D_p 根轨迹

Fig. 10 Eigenvalue trajectories of J and D_p

由图 11(a)可知，随着 K_u 增加，主导模态 λ_5 向右移动，在 K_u 增至 1.15 时越过虚轴，表明系统稳定性逐渐降低，最终失稳； K_u 过大会造成系统失稳， K_u 过小电压响应速度过快，需要综合考虑选取 K_u 。由图 11(b)可知，随着 D_u 增加，主导模态 λ_5 向左移，表明系统稳定性持续上升，呈现单调递增趋势，并网换流器 VSG 控制中 D_u 越大，电压偏差越小。

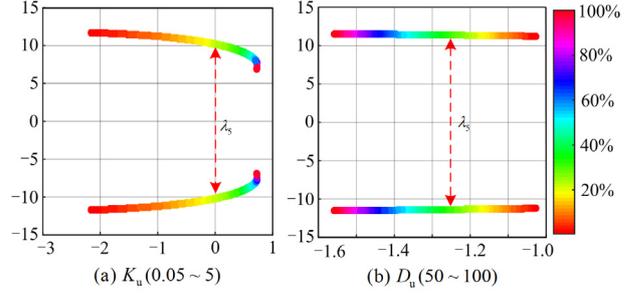


图 11 K_u 和 D_u 根轨迹

Fig. 11 Eigenvalue trajectories of K_u and D_u

由图 12(a)可知，随着 k_{pdc} 增加，主导模态 λ_2 向右移动，系统稳定性不断降低，呈现单调递减趋势；由图 12(b)可知，随着 k_{idc} 增加，主导模态 λ_2 向左移动，系统稳定性不断增强，呈现单调递增趋势；表明直流电压控制参数 k_{pdc} 、 k_{idc} 对交流侧有交互作用，在考虑系统稳定性时直流侧影响不可忽视。在 k_{pdc} 和 k_{idc} 变化时，都不影响关键特征根 λ_1 、 λ_5 ，验证了灵敏度分析结论。

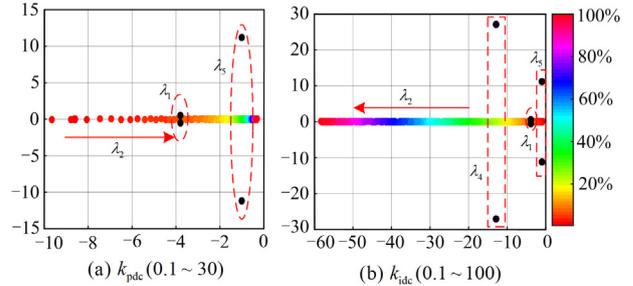


图 12 k_{pdc} 和 k_{idc} 的根轨迹

Fig. 12 Eigenvalue trajectories of k_{pdc} and k_{idc}

不同电网强度下虚拟阻尼的根轨迹如图 13 所示， D_p 从 100 增至 150，主导模态 λ_5 向左移动。 $L_g = 8$ mH 时，主导模态 λ_5 均在虚轴左侧； $L_g = 2$ mH 时，主导模态 λ_5 均在虚轴右侧； $L_g = 5$ mH 时， D_p 增至 110，主导模态 λ_5 穿越虚轴，系统恢复稳定。根轨迹表明 VSG 并网稳定性随电网强度增加而降低，增加 D_p 可改善系统稳定性。

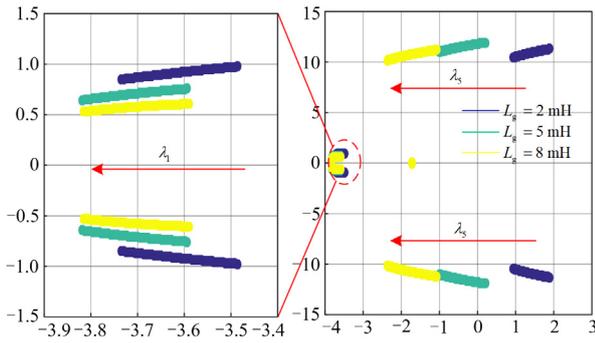

 图 13 不同电网强度下 D_p 的根轨迹(100~150)

 Fig. 13 Eigenvalue trajectories of different SCR D_p (100~150)

综上所述,影响主导模态,造成系统失稳的控制参数主要是功率外环的虚拟惯量 J 、虚拟阻尼 D_p 及下垂系数 K_u 、电压环的 PI 控制比例系数和功率低通滤波的截止频率。根据上述控制参数变化时主导模态所呈现的根轨迹特性,合理调整设计控制参数,有利于增强系统稳定性,避免低频振荡。

4 稳定分析方法验证

4.1 根轨迹分析方法验证

为验证不同控制参数根轨迹变化特性,在 Simulink 中设置 6 组光储-VSG 并网系统仿真工况。

工况 1: 初始系统处于稳定运行状态,虚拟惯量 $J = 10$ 。在 $t = 5$ s 时,虚拟惯量 J 改变,在 $t = 6$ s 时,有功功率指令从 0.5 p.u. 阶跃至 1.0 p.u., VSG 系统动态响应特性如图 14 所示。由图 14 可知, $J = 20$ 时有功功率振荡收敛, $J = 60$ 时有功功率振荡发散, $J = 240$ 时有功功率振荡收敛,验证了虚拟惯量 J 稳定性分析结论。

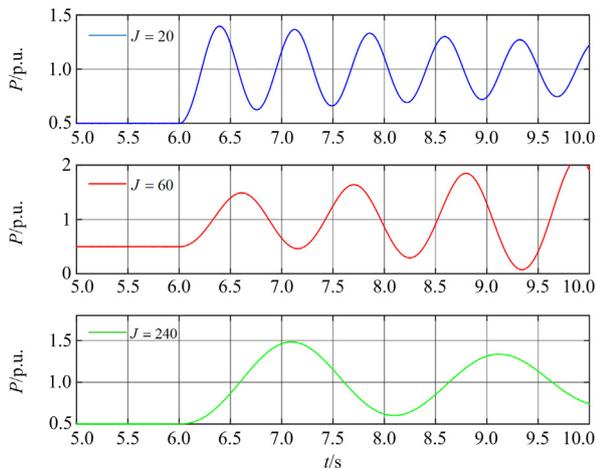


图 14 工况 1 动态响应特性

Fig. 14 Dynamic response characteristics of case 1

工况 2: 初始系统处于稳定运行状态,虚拟阻尼 $D_p = 100$ 。在 $t = 5$ s 时,虚拟阻尼 D_p 改变,在 $t = 6$ s 时,有功功率指令从 0.5 p.u. 阶跃至 1.0 p.u., VSG 动态响应特性如图 15 所示。由图 15 可知, $D_p = 60$ 时有功功率振荡发散, $D_p = 80$ 时有功功率振荡收敛,验证了虚拟阻尼 D_p 稳定性分析结论。

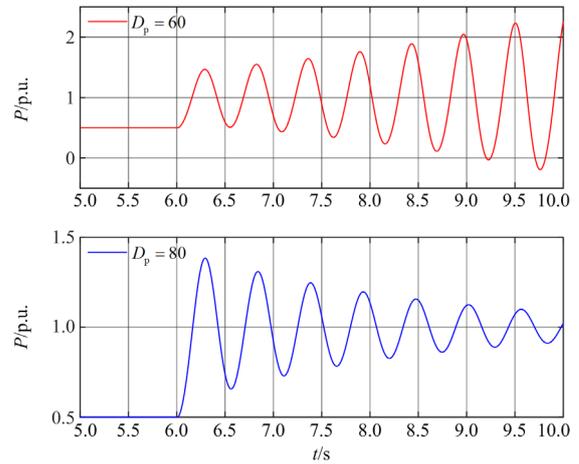


图 15 工况 2 动态响应特性

Fig. 15 Dynamic response characteristics of case 2

工况 3: 初始系统处于稳定运行状态,截止频率 $\omega_c = 100\pi$ 。在 $t = 5$ s 时,截止频率 ω_c 改变,在 $t = 6$ s 时,有功功率指令从 0.5 p.u. 阶跃至 1.0 p.u., VSG 动态响应特性如图 16 所示。由图 16 可知, $\omega_c = 10\pi$ 时有功功率振荡发散, $\omega_c = 20\pi$ 时有功功率振荡收敛,验证截止频率 ω_c 稳定性分析结论。

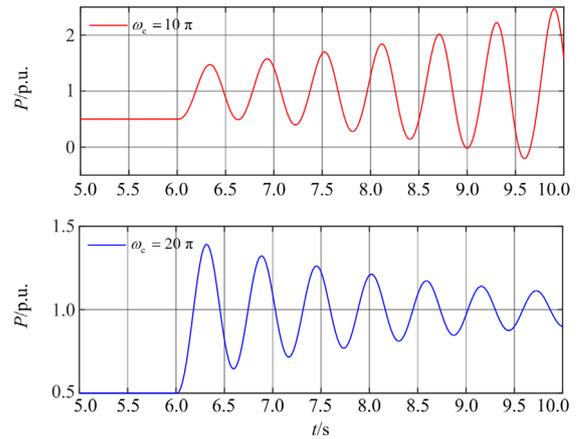


图 16 工况 3 动态响应特性

Fig. 16 Dynamic response characteristics of case 3

工况 4: 初始系统处于稳定运行状态,电压 PI 控制器比例系数 $k_{pu} = 3$ 。在 $t = 5$ s 时, k_{pu} 改变,在

$t = 6\text{ s}$ 时,有功功率指令从 0.5 p.u. 阶跃至 1.0 p.u. , VSG 动态响应特性如图 17 所示。由图 17 可知, $k_{\text{pu}} = 1.6$ 时有功功率振荡发散, $k_{\text{pu}} = 2.0$ 时有功功率振荡收敛, 验证了比例系数 k_{pu} 的稳定性分析结论。

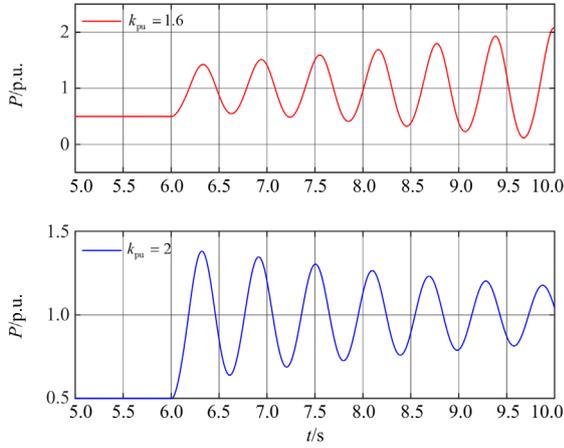


图 17 工况 4 动态响应特性

Fig. 17 Dynamic response characteristics of case 4

工况 5: 初始系统处于稳定运行状态, 下垂系数 $K_u = 0.5$ 。在 $t = 5\text{ s}$ 时, K_u 改变, 在 $t = 6\text{ s}$ 时, 有功功率指令从 0.5 p.u. 阶跃至 1.0 p.u. , VSG 动态响应特性如图 18 所示。由图 18 可知, $K_u = 2$ 时有功功率振荡发散, $K_u = 1$ 时有功功率振荡收敛, 验证了下垂系数 K_u 稳定性分析结论。

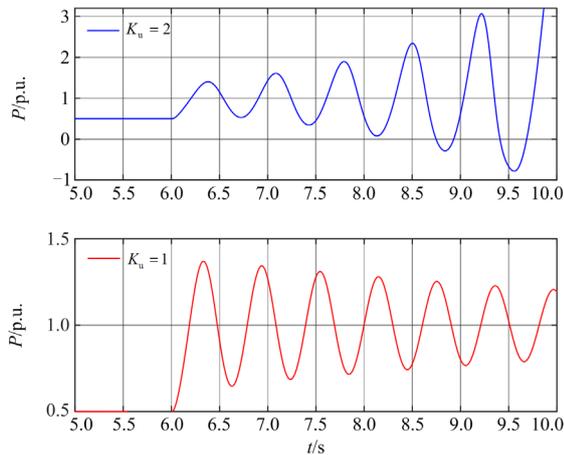
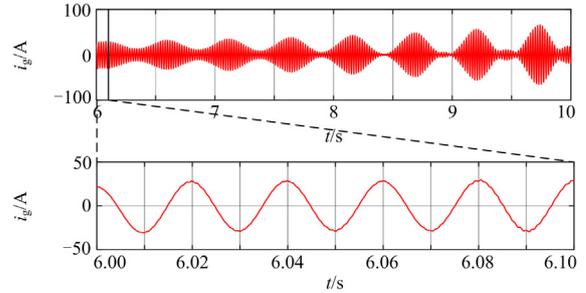


图 18 工况 5 动态响应特性

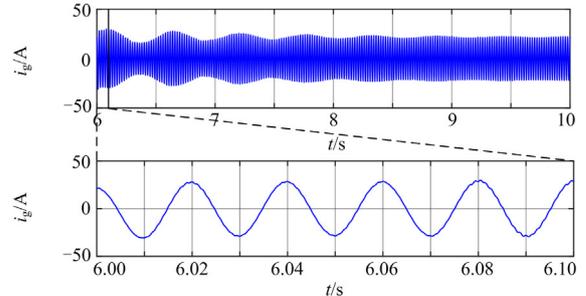
Fig. 18 Dynamic response characteristics of case 5

工况 6: 不同弱电网条件下的系统稳定性验证。初始系统处于稳定运行状态, 电网电感 $L_g = 8\text{ mH}$ 。在 $t = 6\text{ s}$ 时, L_g 改变, VSG 动态响应特性如图 19 所示。由图 19 可知, 在 $D_p = 150$ 的 VSG 系统中,

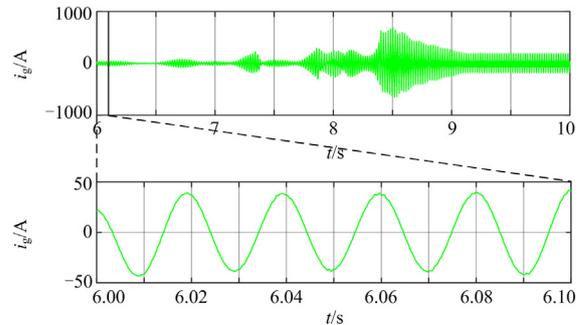
$L_g = 5\text{ mH}$ 时系统稳定, $L_g = 2\text{ mH}$ 时系统失稳; $D_p = 100$ 、 $L_g = 5\text{ mH}$ 的 VSG 并网系统中无法维持稳定运行。仿真结果符合不同电网强度下虚拟阻尼 D_p 的根轨迹特性, 验证了电网强度的稳定性分析结论。



(a) 电网电流 ($D_p = 100, L_g = 5\text{ mH}$)



(b) 电网电流 ($D_p = 150, L_g = 5\text{ mH}$)



(c) 电网电流 ($D_p = 150, L_g = 2\text{ mH}$)

图 19 工况 6 电网电流

Fig. 19 Grid current of case 6

4.2 参数优化及稳定裕度验证

根据第 3 节根轨迹特性分析, 优化 VSG 并网系统控制参数, 表 3 给出优化前后控制参数。图 20 给出原 VSG 系统和优化后的 VSG 系统在 0.5 p.u. 至 1.0 p.u. 阶跃响应时的动态特性, 由表 4 可知, 优化参数后的超调量和调节时间减少, 优化后 VSG 动态性能得到改善。

表 3 系统控制参数

Table 3 System control parameters

控制参数	初始值	优化值
k_{pu}	3	5
J	10	1
D_p	100	280
D_u	50	100
K_u	0.5	0.1

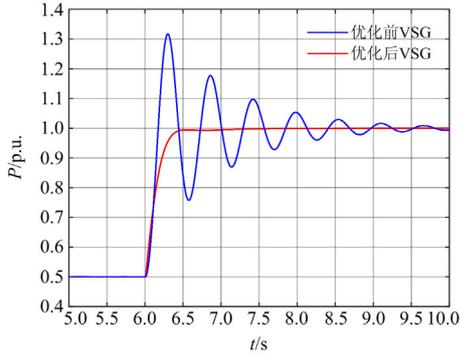


图 20 优化前后 VSG 系统的动态特性

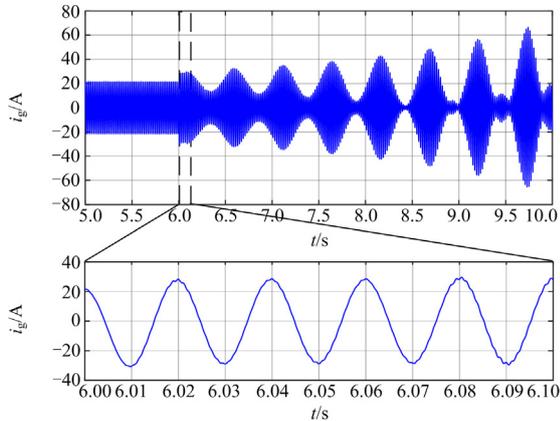
Fig. 20 Dynamic characteristics of VSG system before and after optimization

表 4 动态性能

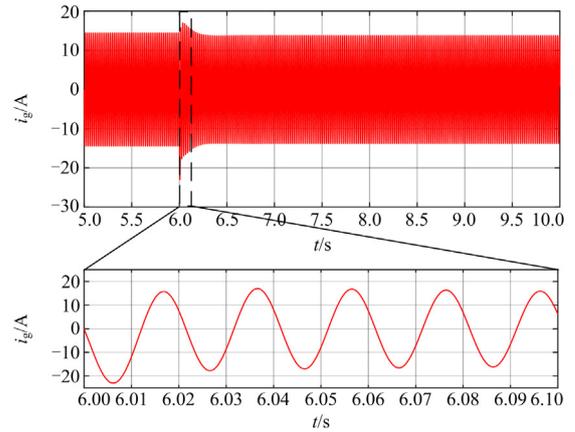
Table 4 Dynamic performance

模型	超调量/%	调节时间/s
优化前 VSG	58.52	1.97
优化后 VSG	-2.2	0.34

由图 21 可知, $t=6\text{ s}$ 时, VSG 系统电网电感 $L_g=8\text{ mH}$ 切换为 5 mH , 优化后 VSG 并网系统保持稳定运行状态; 而优化前 VSG 并网系统电网电流振荡发散, 系统失稳。仿真结果表明, 根据根轨迹特性设计控制参数有效提高了系统稳定性, 为参数优化提供改进方向。



(a) 优化前VSG电网电流



(b) 优化后VSG电网电流

 图 21 优化前后 VSG 系统的电网电流($L_g=5\text{ mH}$)

 Fig. 21 Grid current ($L_g=5\text{ mH}$) before and after optimization of VSG system

5 总结

针对光储并入弱电网, 基于 HSS 理论建立弱电网光储-VSG 并网系统 dq 域小信号模型, 以参数灵敏度作为指标, 优化关键控制参数, 根据根轨迹特性分析控制参数和电网强度对光储并入弱电网系统稳定性的影响, 结论如下:

1) 弱电网虚拟同步发电机的 HSS 模型中, 基频特征根与 3、5 及 7 次谐波的特征根相对应, 同组特征根阻尼灵敏度相同, 根轨迹变化趋势相似。

2) 根据阻尼灵敏度和振荡频率灵敏度, 选取 k_{pu} 、 k_{iu} 、 k_{ii} 、 J 、 D_p 、 D_u 、 K_u 、 ω_c 、 k_{pdc} 、 k_{idc} 作为关键控制参数, 关键控制参数根轨迹表明 J 、 D_p 、 K_u 、 k_{pu} 、 ω_c 设计不当会造成系统失稳。 k_{pdc} 、 k_{idc} 仅影响部分关键特征根轨迹, 减少 k_{pdc} 、增加 k_{idc} 能改善交流侧稳定性。电网强度越弱, 系统稳定性越强, 表明虚拟同步机控制适用于弱电网。

3) 虚拟惯量 J 和虚拟阻尼 D_p 根轨迹特性呈现非单调趋势, 下垂系数 K_u 根轨迹特性呈现单调趋势, 电压环比例系数 k_{pu} 和截止频率 ω_c 根轨迹特性呈现单调趋势, 电网强度根轨迹特性呈现单调递减趋势, 其控制参数和电网强度根轨迹特性在 Matlab/Simulink 仿真中得到验证。

4) 本文依据弱电网下关键参数根轨迹特性, 优化调整弱电网 VSG 系统控制参数, 并在仿真中验证优化后 VSG 系统稳定性优于优化前 VSG 系统, 表明关键控制参数根轨迹可以为 VSG 控制设计和选择提供有效指导。

附录 A VSG 小信号数学模型

在矩阵中, 稳态时参数变量表示为 x_* , 控制系统 dq 域变量表示为 x^* 。矩阵中: i_{gd}^* 、 i_{gq}^* 为公共域 dq 下稳态电网电流 dq 轴分量; i_{fd}^* 、 i_{fq}^* 为公共域 dq 下稳态滤波电流 dq 轴分量; u_{fd}^* 、 u_{fq}^* 为公共域 dq 下稳态滤波电压 dq 轴分量; S_{d^*} 、 S_{q^*} 为三相换流器开关函数 dq 轴稳态分量; S_{dc^*} 为 Boost 电路开关函数稳态量; v_{dc^*} 、 i_{dc^*} 为直流侧稳态电压、电流。

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & 0 \\ A_{41} & 0 & 0 & A_{44} & 0 \\ A_{51} & 0 & 0 & 0 & A_{55} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{R_g}{L_g} & \omega & 0 & 0 & \frac{1}{L_g} & 0 \\ -\omega & -\frac{R_g}{L_g} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_g} \\ 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \omega & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ -\frac{1}{C_f} & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{iu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{iu} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{pu} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D_p}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_{34} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_u} \end{bmatrix}$$

$$A_{41} = \frac{3}{2}\omega_c \begin{bmatrix} u_{fd}^* & u_{fq}^* & 0 & 0 & i_{gd}^* & i_{gq}^* \\ u_{fq}^* & -u_{fd}^* & 0 & 0 & -i_{gq}^* & i_{gd}^* \end{bmatrix}$$

$$A_{44} = \begin{bmatrix} -\omega_c & 0 \\ 0 & -\omega_c \end{bmatrix}$$

$$A_{51} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{3}{2}S_{d^*} & -\frac{3}{2}S_{q^*} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{55} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-S_{dc^*})}{C_{dc}} & 0 \\ \frac{(1-S_{dc^*})}{L_{dc}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{idc} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & B_{14} \\ 0 & 0 & B_{23} & 0 \\ 0 & B_{32} & B_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{51} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & Z_{12} & Z_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ Z_{51} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & -k_{pu} & -\omega C_f \\ 0 & -1 & \omega C_f & -k_{pu} \end{bmatrix}$$

$$B_{32} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ \frac{D_p}{J} & \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{K_u} \end{bmatrix} \quad B_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{D_u}{K_u} \end{bmatrix}$$

$$B_{51} = \begin{bmatrix} \frac{i_{dc}^*}{C_{dc}} & -\frac{1.5i_{fd}^*}{C_{dc}} & -\frac{1.5i_{fq}^*}{C_{dc}} \\ -\frac{v_{dc}^*}{L_{dc}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_g} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad Z_{13} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_g} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad Z_{51} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_{dc}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{C}_1 &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_{15} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_{23} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{32} & \mathbf{C}_{33} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} & \mathbf{C}_{15} &= \begin{bmatrix} -k_{\text{pdc}} & 0 & k_{\text{idc}} \\ S_{\text{d}^*} & 0 & 0 \\ S_{\text{q}^*} & 0 & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{C}_{33} &= \begin{bmatrix} e_{d^*} \sin(\delta_s) - e_{q^*} \cos(\delta_s) & 0 & k_{\text{pu}} k_{\text{pi}} \\ e_{d^*} \cos(\delta_s) + e_{q^*} \sin(\delta_s) & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{C}_{21} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cos(\delta_s) & \sin(\delta_s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin(\delta_s) & \cos(\delta_s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\delta_s) & \sin(\delta_s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin(\delta_s) & \cos(\delta_s) \end{bmatrix} & \mathbf{D}_1 &= \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{14} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{23} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{33} & \mathbf{D}_{34} \end{bmatrix} & \mathbf{D}_{11} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & v_{\text{dc}^*} & 0 \\ 0 & 0 & v_{\text{dc}^*} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{C}_{23} &= \begin{bmatrix} -i_{\text{id}^*} \sin(\delta_s) + i_{\text{iq}^*} \cos(\delta_s) & 0 & 0 \\ -i_{\text{id}^*} \cos(\delta_s) - i_{\text{iq}^*} \sin(\delta_s) & 0 & 0 \\ -u_{\text{id}^*} \sin(\delta_s) + u_{\text{iq}^*} \cos(\delta_s) & 0 & 0 \\ -u_{\text{id}^*} \cos(\delta_s) - u_{\text{iq}^*} \sin(\delta_s) & 0 & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{D}_{14} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} & \mathbf{D}_{23} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{C}_{32} &= \begin{bmatrix} k_{\text{iu}} k_{\text{pi}} & 0 & k_{\text{ii}} & 0 \\ 0 & k_{\text{iu}} k_{\text{pi}} & 0 & k_{\text{ii}} \end{bmatrix} & \mathbf{D}_{33} &= \begin{bmatrix} -k_{\text{pi}} & -\omega L_{\text{f}} & 1 - k_{\text{pu}} k_{\text{pi}} & -\omega C_{\text{f}} k_{\text{pi}} \\ \omega L_{\text{f}} & -k_{\text{pi}} & \omega C_{\text{f}} k_{\text{pi}} & 1 - k_{\text{pu}} k_{\text{pi}} \end{bmatrix} \\
 & & \mathbf{D}_{34} &= \begin{bmatrix} -\cos(\delta_s) & -\sin(\delta_s) \\ \sin(\delta_s) & -\cos(\delta_s) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

附录 B VSG 稳定运行状态信息

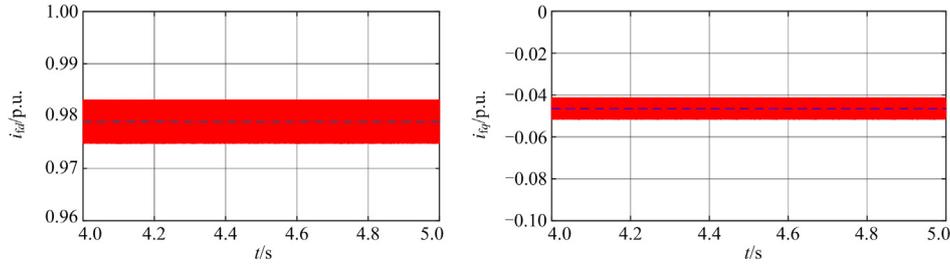


图 B1 稳态滤波电流

Fig. B1 Steady filter voltage

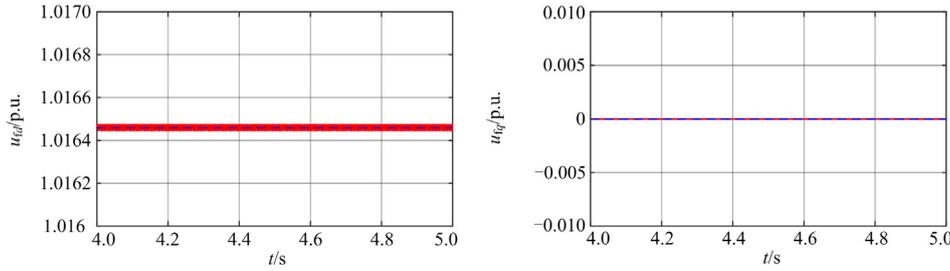


图 B2 稳态滤波电压

Fig. B2 Steady filter voltage

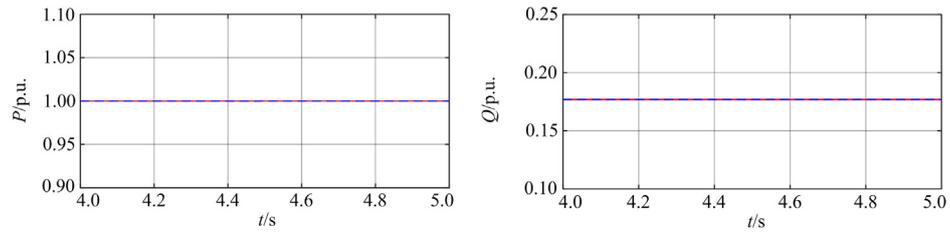


图 B3 功率

Fig. B3 Output power

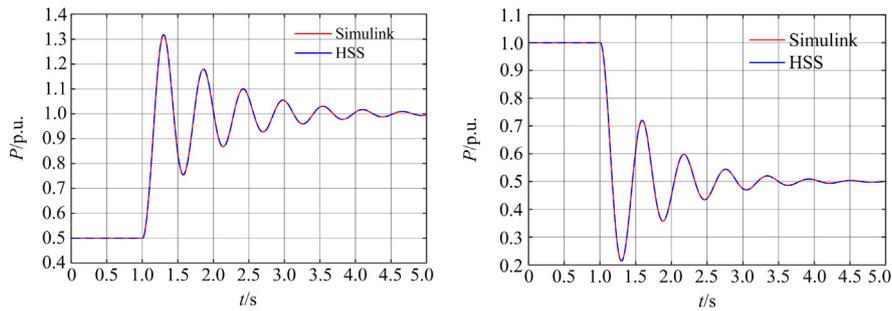


图 B4 动态阶跃响应

Fig. B4 Dynamic step response

附录 C VSG 特征根

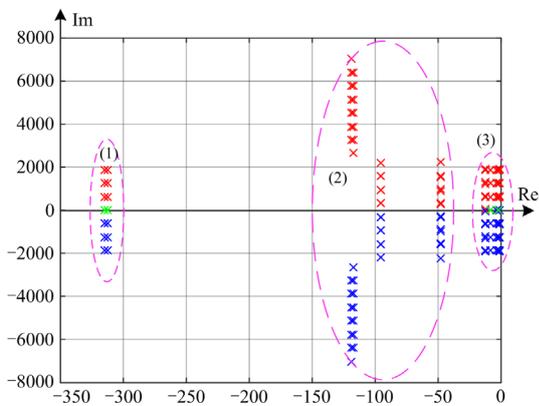


图 C1 VSG 特征根

Fig. C1 VSG eigenvalue root

表 C1 部分特征根

Table C1 Parts of VSG eigenvalue root

共轭特征根	值	共轭特征根	值
λ_1	$-3.79 \pm j0.52$	λ_8	$-8.61 \pm j1884.96$
λ_2	-5.74	λ_9	$-119.40 \pm j3253.60$
λ_3	-8.61	λ_{10}	$-117.75 \pm j3264.42$
λ_4	$-12.83 \pm j27.03$	λ_{11}	$-117.75 \pm j2636.10$
λ_5	$-1.04 \pm j11.21$	λ_{12}	$-44.50 \pm j352.66$
λ_6	$-8.61 \pm j628.32$	λ_{13}	$-44.50 \pm j275.66$
λ_7	$8.61 \pm j1256.64$	—	—

参考文献

[1] 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.

[2] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020,

40(22): 7185-7201.
 JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7201.

[3] 侯川川, 朱淼, 刘纯, 等. 并网逆变器的谐波放大机制与应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6398-6410.
 HOU Chuanchuan, ZHU Miao, LIU Chun, et al. Harmonic amplification mechanism and application of grid-tied VSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6398-6410.

[4] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71, 187.
 XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71, 187.

[5] 张思彤, 梁纪峰, 马燕峰, 等. 直驱风电场经柔性直流输电电网的宽频振荡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 33-42.
 ZHANG Sitong, LIANG Jifeng, MA Yanfeng, et al. Broadband oscillation characteristics analysis of a VSC-HVDC connected direct drive wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 33-42.

[6] WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6460-6472.

[7] 骆坚, 张瀚宇, 张松, 等. 不平衡负载下三相离网逆变器的序阻抗建模及特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 33-40.
 LUO Jian, ZHANG Hanyu, ZHANG Song, et al. Modeling and characteristic analysis of sequential impedance of three-phase off-grid inverter under unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 33-40.

[8] 马也, 史丽萍, 李衡, 等. 基于 VSG 控制的微网逆变器工频振荡现象研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 107-115.

- MA Ye, SHI Liping, LI Heng, et al. Power frequency oscillation of a microgrid inverter based on VSG control[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 107-115.
- [9] 韩应生, 孙海顺, 黄碧月, 等. 基于多类型电力元件统一形式离散模型的复杂系统状态空间生成方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6137-6148.
- HAN Yingsheng, SUN Haishun, HUANG Biyue, et al. A state space construction method for complex power systems based on the unified-form discrete-time models of multiple types of power components[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6137-6148.
- [10] LOVE G N, WOOD A R. Harmonic state space model of power electronics[C] // 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, September 28-October 1, 2008, Wollongong, Australia: 1-6.
- [11] YUE X, WANG X, BLAABJERG F. Review of small-signal modeling methods including frequency-coupling dynamics of power converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(4): 3313-3328.
- [12] KWON J, WANG X, BLAABJERG F, et al. Frequency-domain modeling and simulation of DC power electronic systems using harmonic state space method[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(2): 1044-1055.
- [13] MOLLERSTEDT E, BERNHARDSSON B. Out of control because of harmonics-an analysis of the harmonic response of an inverter locomotive[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2000, 20(4): 70-81.
- [14] XU Zigao, LI Binbin, HAN Linjie, et al. A complete HSS-based impedance model of MMC considering grid impedance coupling[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(12): 12929-12948.
- [15] KWON J, WANG X, BLAABJERG F, et al. Harmonic interaction analysis in a grid-connected converter using harmonic state-space (HSS) modeling[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(9): 6823-6835.
- [16] 张国荣, 徐晨林, 蔡智斌, 等. 基于谐波状态空间的变流器建模方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(11): 141-147.
- ZHANG Guorong, XU Chenlin, CAI Zhibin, et al. A modeling method for a converter based on harmonic state space[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(11): 141-147.
- [17] 林顺富, 戴焯敏, 颜昕昱, 等. 基于谐波状态空间理论的LCL型并网逆变器谐波交互及稳定性分析[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(6): 76-83.
- LIN Shunfu, DAI Yemin, YAN Xinyu, et al. Analysis on harmonic interaction and stability of LCL grid-connected inverter based on harmonic state space theory[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(6): 76-83.
- [18] CHEN Xudong, YU Siru, GE Xinglai. Modelling and stability analysis of virtual synchronous machine using harmonic state-space modelling method[J]. *The Journal of Engineering*, 2019: 2597-2603.
- [19] 郭贤珊, 李云丰, 谢欣涛, 等. 直驱风电场经柔直并网诱发的次同步振荡特性[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1149-1160.
- GUO Xianshan, LI Yunfeng, XIE Xintao, et al. Sub-synchronous oscillation characteristics caused by PMSG-based wind plant farm integrated via flexible HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1149-1160.
- [20] LI Yang, SHUANG Zhikang, PENG Yelun, et al. Eigenvalue sensitivity of stability analysis for a droop controlled inverter[C] // 10th IEEE Annual Energy Conversion Congress and Exposition, September 23-27, 2018, Portland, OR, USA: 4148-4154.
- [21] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. Small-signal modelling and parametric sensitivity of a virtual synchronous machine[C] // 2014 Power Systems Computation Conference, August 18-22, 2014, Wroclaw, Poland: 1-9.
- [22] 涂春鸣, 谢伟杰, 肖凡, 等. 控制延时对虚拟同步机全局稳定性的影响分析[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 3021-3029.
- TU Chunming, XIE Weijie, XIAO Fan, et al. Analysis of influence of control delay on stability of virtual synchronous machine[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 3021-3029.
- [23] SONAWANE A J, UMARIKAR A C. Small-signal stability analysis of PV-based synchronverter including PV operating modes and DC-link voltage controller[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(8): 8028-8039.
- [24] WERELEY N M, HALL S R. Linear time periodic systems: transfer functions, poles, transmission zeroes and directional properties[C] // Proceedings of the 1991 American Control Conference, June 26-28, 1991, Boston, USA: 1179-1184.
- [25] RICO J J, MADRIGAL M, ACHA E. Dynamic harmonic evolution using the extended harmonic domain[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, 18(2): 587-594.
- [26] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21(1): 263-272.
- [27] 王翰文, 曾成碧, 苗虹. 基于多谐振电网电压前馈的并网逆变器相位补偿算法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(18): 81-89.
- WANG Hanwen, ZENG Chengbi, MIAO Hong. A phase compensation algorithm of a grid-connected inverter based on a feedforward multi-resonant grid voltage[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(18): 81-89.
-
- 收稿日期: 2023-02-02; 修回日期: 2023-06-08
作者简介: 曾成碧(1969—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事微电网方面的研究。E-mail: 857606631@qq.com
(编辑 姜新丽)