计及构网型SVG的新能源并网系统暂态稳定性分析

王昭伟，王秀丽，张海涛，魏凤廷
（西安交通大学电气工程学院，710049，西安）

摘要：针对采用跟网型电压源型换流器(GFL-VSC)并网的新能源场站在弱电网下易发生失稳，以及传统静止无功发生器(SVG)难以满足系统暂态支撑需求等问题，建立构网型(GFM)SVG与GFL-VSC并网系统的全阶数学模型，揭示了GFM-SVG对系统暂态稳定性的影响规律。首先，考虑GFL-VSC与GFM-SVG各控制环节动态和线路电磁暂态，构建GFL-VSC与GFM-SVG并联系统的数学模型。其次，研究电压跌落时GFL-VSC单机并网系统的暂态失稳机理。然后，分析GFM-SVG对GFL-VSC并网系统的支撑机理，使用相平面法研究GFM-SVG各控制参数对系统稳定性的影响规律，采用极限切除时间和极限切除角等指标量化暂态支撑能力。最后，通过电磁暂态仿真验证了理论分析的正确性。研究结果表明：GFM-SVG通过构网控制形成局部相角与频率参考，且进一步结合无功支撑显著提高了并网系统的暂态稳定性；合理配置GFM-SVG，能够将暂态期间并网点电压及GFL-VSC电流幅值相对于额定值的偏差控制在10%以内。该研究可为计及GFM-SVG并网系统的参数整定提供参考。

关键词：跟网型控制；构网型控制；静止无功发生器；暂态稳定性
中图分类号：TM464 **文献标志码**：A
DOI：10.7652/xjtuxb202611004 **文章编号**：0253-987X(2026)11-0035-13

Transient Stability Analysis of Renewable Energy Grid-Connected Systems Considering Grid-Forming SVG

WANG Zhaowei, WANG Xiuli, ZHANG Haitao, WEI Fengting
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the instability of renewable energy stations integrated via grid-following voltage source converters (GFL-VSCs) in weak grids, as well as the inadequacy of traditional static VAR generators (SVGs) in providing system transient support, a full-order mathematical model of the grid-connected system comprising a grid-forming (GFM) SVG and GFL-VSCs is established to reveal the impact of the GFM-SVG on the system's transient stability. First, considering the dynamics of each control loop of the GFL-VSC and GFM-SVG, as well as the electromagnetic transients of the transmission lines, a mathematical model of the parallel system of the GFL-VSC and GFM-SVG is constructed. Second, the transient instability mechanism of a grid-connected single-GFL-VSC system during voltage sags is investigated. Then, the support mechanism of the GFM-SVG for the GFL-VSC grid-connected system is analyzed. The phase

收稿日期：2026-03-19。 作者简介：王昭伟(2002—)，男，硕士生；张海涛(通信作者)，男，副教授，硕士生导师。
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2021YFB2401100)；国网冀北电力有限公司科技项目(B3018K240064)。
网络出版时间：2026-06-18 网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260617.1432.005

plane method is utilized to study the influence of various control parameters of the GFM-SVG on system stability, and metrics such as the critical clearing time (CCT) and critical clearing angle (CCA) are employed to quantify the transient support capability. Finally, the correctness of the theoretical analysis is verified through electromagnetic transient simulations. The results indicate that the GFM-SVG establishes a local phase angle and frequency reference through grid-forming control, which, combined with reactive power support, significantly enhances the transient stability of the grid-connected system. With a properly configured GFM-SVG, the deviations of the point of common coupling (PCC) voltage and the GFL-VSC current amplitude from their rated values during transients can be maintained within 10%. This study provides a valuable reference for the parameter tuning of grid-connected systems incorporating GFM-SVGs.

Keywords: grid-following control; grid-forming control; static var generator; transient stability

能源是人类社会生存和发展的基础，构建以可再生能源为主体的现代能源体系已成为国际共识。我国积极推进能源转型，着力构建新型电力系统，并提出“双碳”战略目标。中国电力企业联合会发布的《2025—2026 年度全国电力供需形势分析预测报告》指出，截至 2025 年底，全国非化石能源发电装机达到 24.0 亿 kW，占总装机容量的 61.7%，其中风电和太阳能发电全年合计新增装机 4.4 亿 kW[1-2]。随着新能源占比不断提高，大量电力电子设备接入电网，电力系统逐步呈现高比例可再生能源和高比例电力电子设备的“双高”特征。由于电力电子化系统缺乏天然惯量和阻尼，且电压支撑能力较弱，因此电网安稳运行面临严峻挑战[3]。

新能源机组多采用电压源型换流器(VSC)接入电网，VSC 的控制模式可分为跟网型控制(GFL)和构网型控制(GFM)。现有的新能源机组换流器多采用跟网型控制策略[4-6]，通过锁相环(PLL)实现与电网的同步，能够在强电网条件下实现最大功率输出，但在弱电网情况下易发生失稳[7]。文献[8-10]建立锁相环数学模型，评估了 GFL-VSC 系统的暂态稳定性。文献[11-12]分析了不同参数和运行条件下，GFL-VSC 系统的暂态响应与失稳原因。文献[13]构造 GFL-VSC 的李雅普诺夫函数，用以判断系统的稳定性。然而，上述研究均未考虑换流器直流电压的动态过程。由于直流电压控制(DVC)通常具有与锁相环相似的时间尺度，因此构建的模型具有一定局限性。文献[14-15]计及了直流电压控制，但未明确揭示直流电压控制对暂态稳定性的具体影响。

长距离输电会导致新能源场站电压偏移，通常在新能源场站配置无功补偿装置以维持电压稳定，其中静止无功发生器(SVG)正逐步成为主流无功补偿装置[16]。针对跟网型静止无功发生器(GFL-SVG)接入，已有研究围绕虚拟同步发电机(VSG)与 GFL-SVG 并联系统的协调控制、非线性建模和稳定性分析等方面展开讨论[17-18]。然而，GFL-SVG 的电压响应速度受限，难以满足系统支撑需求[19]。为提高 SVG 的响应速度，增强其对并网系统的支撑能力，构网型静止无功发生器(GFM-SVG)成为研究热点。文献[19]建立了基于直流电容自同步的 GFM-SVG 与新能源联合输出系统等效模型，揭示了新能源动态对 GFM-SVG 的暂态影响机理。文献[20]将风电场出力简化等效为电流源，分析了影响 GFM-SVG 暂态稳定性的关键因素。文献[21]构建考虑 GFM-SVG 的系统电压多阶段分析模型，探究了 SVG 改善电压动态特性的内在机制。文献[22]建立 GFL-VSC 与 GFM-SVG 并联系统的数学模型，基于相平面法研究系统参数对暂态稳定性的影响。然而，在 GFL-VSC 与 GFM-SVG 并联系统的研究中，大多忽略 GFL-VSC 直流电压控制、锁相环、电流内环动态特性和 GFM-SVG 电压电流环的影响。现有研究表明，VSG 单机并网系统不考虑电压环动态，可能会造成暂态稳定性误判[23]，而跟网型与构网型换流器混联系统的暂态稳定问题更为复杂。因此，亟需建立更加精确的 GFL-VSC 与 GFM-SVG 并联系统数学模型。

针对上述问题，本文以 GFL-VSC 与 GFM-SVG 并网系统为研究对象，构建计及 GFL-VSC 直流电压控制、锁相环与电流内环、GFM-SVG 电压电流环的全阶非线性数学模型。首先，分析 GFL-VSC 单机并网系统在电压跌落下的暂态失稳机理，以及控制环节参数对稳定性的影响。然后，进一步研究 GFM-SVG 对并网系统暂态稳定性的影响机理，基于相平面法分析关键参数对系统暂态稳定性的影响

规律，采用极限切除时间与极限切除角量化 GFM-SVG 对并网系统的暂态支撑效果。最后，在 MATLAB/Simulink 软件中建立电磁暂态仿真模型，对理论分析结果进行验证。

1　GFM-SVG 与 GFL-VSC 并网系统的拓扑和控制策略

1.1　并网系统拓扑结构

GFL-VSC 与 GFM-SVG 并网系统的主电路结构拓扑如图 1 所示，主要包括 GFL-VSC、GFM-SVG、网侧线路和交流电网。其中，R_n、L_n 分别为 GFL-VSC 端口的等效电阻和等效电感，i_{nabc} 为流过 L_n 的三相电流；R_m、L_m 为 GFM-SVG 端口的等效电阻和等效电感，i_{mabc} 为流过 L_m 的三相电流。GFL-VSC 和 GFM-SVG 在公共耦合点（PCC）处接入交流电网，R_g、L_g 分别为网侧线路的等效电阻和等效电感，i_{gabc} 为流入交流电网的三相电流，u_{gabc} 为交流电网的三相电压，C_f 为等效电容。

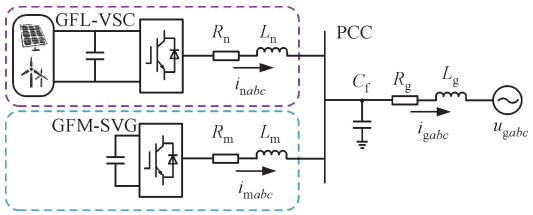


图 1　GFM-SVG 接入 GFL-VSC 并网系统拓扑

Fig. 1　Topology of GFM-SVG integrated into GFL-VSC

1.2　GFL-VSC 控制策略

GFL-VSC 的控制策略如图 2 所示。其中，u_{dcn}、C_{dcn} 分别为 GFL-VSC 直流侧的电压和电容，e_{nabc} 为换流器端口的三相电压，u_{abc} 为交流侧并网点处的三相电压，ω_0 为电网侧额定角频率，θ_n 为 GFL-VSC 锁相环生成的相位，u_{abc}、i_{nabc} 经过 Park 变换得到 u_{nd}、u_{nq}、i_{nd}、i_{nq}，分别为并网点电压和 GFL-VSC 输出电流的 d、q 轴分量。GFL-VSC 的控制策略为：依靠锁相环跟踪电网电压的频率和相位，实现与电网的同步。通过直流电压控制与无功功率控制，生成电流内环输入的参考值（用下标 ref 表示），再经过电流内环生成控制器 d、q 轴的调制信号 m_{nd} 和 m_{nq}。调制信号经过反 Park 变换后，通过脉冲宽度调制（PWM）环节产生 GFL-VSC 的触发信号。

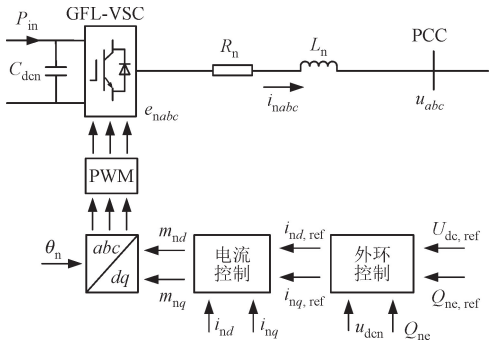


图 2　GFL-VSC 控制策略

Fig. 2　Control scheme of GFL-VSC

1.3　GFM-VSG 控制策略

GFM-SVG 的控制策略如图 3 所示，其中 u_{dcm}、C_{dcm} 分别为 GFM-SVG 换流器直流侧的电压和电容，e_{mabc} 为换流器端口的三相电压，θ_m 为虚拟同步机控制环节生成的相位，u_{abc}、i_{mabc} 经过 Park 变换得到 u_{md}、u_{mq}、i_{md}、i_{mq}，分别为并网点电压和 GFM-SVG 输出电流的 d、q 轴分量。GFM-SVG 自主构建频率，能将有功功率偏差经过控制器处理后，得到频率参考值，再通过积分环节生成 GFM-SVG 的相位 θ_m。无功-电压控制环节生成 d、q 轴的参考电压，通过电压环生成内环输入参考电流，由电流内环生成调制信号 m_{md} 和 m_{mq}。调制信号经过反 Park 变换和 PWM 环节，产生 GFM-SVG 的触发信号。

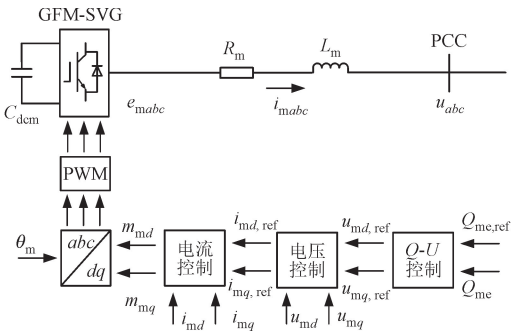


图 3　GFM-SVG 控制策略

Fig. 3　Control scheme of GFM-SVG

2　GFL-VSC 与 GFM-SVG 并网系统暂态特性建模

由于构网型换流器和跟网型换流器并联系统的动态关系复杂[7]，为深入研究 GFL-VSC 与 GFM-SVG 并联系统的暂态特性，建立计及 GFL-VSC 锁相环与电流内环、GFM-SVG 电压电流环和线路电磁暂态的动力学方程，分析其暂态响应特性。

2.1　GFL-VSC 数学模型

考虑到 GFL-VSC 直流侧电压的动态变化，需加入直流电压控制环节。其控制方程可表示为

$$\frac{\mathrm{d}i_{nd,ref}}{\mathrm{d}t}-k_{zp}\frac{\mathrm{d}u_{dcn}}{\mathrm{d}t}=k_{zi}(u_{dcn}-U_{dc,ref}) \tag{1}$$

式中：$i_{nd,\mathrm{ref}}$ 为电流内环输入的 d 轴参考值；k_{zp}、k_{zi} 分别为直流电压控制的比例系数和积分系数；$U_{\mathrm{dc,ref}}$ 为直流侧参考电压。

假设直流侧新能源输入的有功功率 P_{in} 恒定，根据能量守恒，可得

$$C_{\mathrm{dcn}}u_{\mathrm{dcn}}\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{dcn}}}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{in}}-P_{\mathrm{n}} \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{n}}=1.5(e_{nd}i_{nd}+e_{nq}i_{nq}) \tag{3}$$

式中：P_{n} 为 GFL-VSC 机端输出的有功功率；e_{nd} 和 e_{nq} 分别为 e_{nabc} 的 d、q 轴分量。

基于同步旋转坐标系锁相环，GFL-VSC 可获取电网的电压信息，实现与电网同步。以电网电压相位 θ_{g} 为参考，定义 GFL-VSC 输出功角 δ_{n} 为锁相环输出相位与电网电压相位之差，则锁相环的数学模型为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\delta_{\mathrm{n}}}{\mathrm{d}t}=\Delta\omega_{\mathrm{n}}\\ \dfrac{\mathrm{d}\Delta\omega_{\mathrm{n}}}{\mathrm{d}t}-k_{\mathrm{pllp}}\dfrac{\mathrm{d}u_{nq}}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{plli}}u_{nq}\end{cases} \tag{4}$$

式中：$\Delta\omega_{\mathrm{n}}$ 为锁相环输出角频率与电网角频率之差；k_{pllp}、k_{plli} 分别为锁相环的比例系数和积分系数。

GFL-VSC 无功控制环节的方程为

$$\frac{\mathrm{d}i_{nq,\mathrm{ref}}}{\mathrm{d}t}-k_{\mathrm{qp}}\frac{\mathrm{d}Q_{\mathrm{ne}}}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{qi}}(Q_{\mathrm{ne}}-Q_{\mathrm{ne,ref}}) \tag{5}$$

$$Q_{\mathrm{ne}}=1.5(-u_{nd}i_{nq}+u_{nq}i_{nd}) \tag{6}$$

式中：$i_{nq,\mathrm{ref}}$ 为电流内环输入的 q 轴参考值；k_{qp}、k_{qi} 分别为无功控制的比例系数和积分系数；Q_{ne}、$Q_{\mathrm{ne,ref}}$ 分别为 GFL-VSC 注入并网点无功功率的实际值和参考值。为方便分析，设置无功功率参考值为 0[22]。

电流内环控制可有效提高电流响应能力，并限制故障电流。GFL-VSC 电流内环控制方程为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}e_{nd}}{\mathrm{d}t}-k_{\mathrm{nip}}\dfrac{\mathrm{d}x_{nd}}{\mathrm{d}t}+L_{\mathrm{n}}\dfrac{\mathrm{d}(\omega_{\mathrm{n}}i_{nq})}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{nii}}x_{nd}\\ \dfrac{\mathrm{d}e_{nq}}{\mathrm{d}t}-k_{\mathrm{nip}}\dfrac{\mathrm{d}x_{nq}}{\mathrm{d}t}-L_{\mathrm{n}}\dfrac{\mathrm{d}(\omega_{\mathrm{n}}i_{nd})}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{nii}}x_{nq}\end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases}x_{nd}=i_{nd,\mathrm{ref}}-i_{nd}\\ x_{nq}=i_{nq,\mathrm{ref}}-i_{nq}\end{cases} \tag{8}$$

式中：k_{nip}、k_{nii} 分别为电流内环的比例系数和积分系数；ω_{n} 为锁相环生成角频率，$\omega_{\mathrm{n}}=\omega_0+\Delta\omega_{\mathrm{n}}$。

2.2 GFM-SVG 数学模型

GFM-SVG 采用转子运动二阶方程模拟同步机的运行特性。以电网电压相位 θ_{g} 为参考，定义 GFM-SVG 输出功角 δ_{m} 为虚拟同步机输出相位与电网电压相位之差，构建功率外环控制方程如下

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\delta_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}=\Delta\omega_{\mathrm{m}}\\ J\dfrac{\mathrm{d}\Delta\omega_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}=-D\Delta\omega_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{me}}+k_{\mathrm{dc}}(u_{\mathrm{dcm}}-U_{\mathrm{dc,ref}})\end{cases} \tag{9}$$

$$P_{\mathrm{me}}=1.5(u_{md}i_{md}+u_{mq}i_{mq}) \tag{10}$$

式中：$\Delta\omega_{\mathrm{m}}$ 为虚拟同步环节输出角频率与电网角频率之差；J、D 分别为 SVG 虚拟惯量和阻尼系数的标幺值；P_{me} 为 SVG 注入并网点的有功功率；k_{dc} 为直流电压增益系数。

GFM-SVG 无功-电压控制[24]方程为

$$\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{svg,ref}}}{\mathrm{d}t}=Q_{\mathrm{svg,ref}}-Q_{\mathrm{me}}+K_{\mathrm{u}}(U_{\mathrm{n}}-u_{\mathrm{pcc}}) \tag{11}$$

$$Q_{\mathrm{me}}=1.5(-u_{md}i_{mq}+u_{mq}i_{md}) \tag{12}$$

式中：$U_{\mathrm{svg,ref}}$、U_{n} 和 u_{pcc} 分别为交流母线电压幅值的参考值、额定值和实际值；K_{u} 为无功-电压控制环节的电压增益系数；$Q_{\mathrm{me,ref}}$ 为 SVG 无功功率参考值；Q_{me} 为 SVG 输出的无功功率。

GFM-SVG 的无功-电压控制环节生成 $u_{md,\mathrm{ref}}$ 和 $u_{mq,\mathrm{ref}}$，两者需满足

$$\sqrt{(u_{md,\mathrm{ref}})^2+(u_{mq,\mathrm{ref}})^2}=U_{\mathrm{svg,ref}} \tag{13}$$

为简化分析，令 $u_{\mathrm{pcc}}=u_{md}$，$u_{mq,\mathrm{ref}}=0$[23]，则式(11)可改写为

$$\frac{\mathrm{d}u_{md,\mathrm{ref}}}{\mathrm{d}t}=Q_{\mathrm{me,ref}}-Q_{\mathrm{me}}+K_{\mathrm{u}}(U_{\mathrm{n}}-u_{md}) \tag{14}$$

根据能量守恒定律，可得 SVG 直流侧方程为

$$C_{\mathrm{dcm}}u_{\mathrm{dcm}}\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{dcm}}}{\mathrm{d}t}=-P_{\mathrm{m}} \tag{15}$$

$$P_{\mathrm{m}}=1.5(e_{md}i_{md}+e_{mq}i_{mq}) \tag{16}$$

式中：P_{m} 为 SVG 机端输出的有功功率。

GFM-SVG 电压电流内环控制方程[19]可写为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_{md,\mathrm{ref}}}{\mathrm{d}t}-k_{\mathrm{vp}}\dfrac{\mathrm{d}(u_{md,\mathrm{ref}}-u_{md})}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{vi}}(u_{md,\mathrm{ref}}-u_{md})\\ \dfrac{\mathrm{d}i_{mq,\mathrm{ref}}}{\mathrm{d}t}+k_{\mathrm{vp}}\dfrac{\mathrm{d}u_{mq}}{\mathrm{d}t}=-k_{\mathrm{vi}}u_{mq}\end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}e_{md}}{\mathrm{d}t}-k_{\mathrm{mip}}\dfrac{\mathrm{d}x_{md}}{\mathrm{d}t}+L_{\mathrm{m}}\dfrac{\mathrm{d}(\omega_{\mathrm{m}}i_{mq})}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{mii}}x_{md}\\ \dfrac{\mathrm{d}e_{mq}}{\mathrm{d}t}-k_{\mathrm{mip}}\dfrac{\mathrm{d}x_{mq}}{\mathrm{d}t}-L_{\mathrm{m}}\dfrac{\mathrm{d}(\omega_{\mathrm{m}}i_{md})}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{mii}}x_{mq}\end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases}x_{md}=i_{md,\mathrm{ref}}-i_{md}\\ x_{mq}=i_{mq,\mathrm{ref}}-i_{mq}\end{cases} \tag{19}$$

式中：k_{vp}、k_{vi} 分别为 SVG 电压环比例系数和积分系数；k_{mip}、k_{mii} 分别为 SVG 电流内环比例系数和积分系数；ω_{m} 为虚拟同步机环节产生的角频率，$\omega_{\mathrm{m}}=\omega_0+\Delta\omega_{\mathrm{m}}$。

2.3　主电路数学模型

GFL-VSC 通过锁相环产生角频率，GFM-SVG 通过虚拟同步发电机控制策略产生角频率，两者的角频率不同。由于 GFM-SVG 能够自主构建频率与电压，因此认为 GFM-SVG 所在支路与网侧支路的角频率都为 ω_{m}，GFL-VSC 所在支路的角频率为 ω_{n}。在不同参考系下，对公共耦合点处电压进行分解，得到两组电压分量。为了降低模型阶数并提高求解效率，保留 u_{md} 和 u_{mq}，并通过坐标变换得到 u_{nd} 和 u_{nq} 的表达式

$$\begin{cases} u_{nd} = u_{md}\cos\theta_{\mathrm{t}} + u_{mq}\sin\theta_{\mathrm{t}} \\ u_{nq} = -u_{md}\sin\theta_{\mathrm{t}} + u_{mq}\cos\theta_{\mathrm{t}} \end{cases} \tag{20}$$

式中：θ_{t} 为锁相环相位与虚拟同步机控制相位之差。

由于 i_{nd} 和 i_{nq} 是 i_{nabc} 基于锁相环相位进行 d、q 分解得到的，因此需要对其进行处理，表达式如下

$$\begin{cases} i_{ndm} = i_{nd}\cos(-\theta_{\mathrm{t}}) + i_{nq}\sin(-\theta_{\mathrm{t}}) \\ i_{nqm} = -i_{nd}\sin(-\theta_{\mathrm{t}}) + i_{nq}\cos(-\theta_{\mathrm{t}}) \end{cases} \tag{21}$$

并网系统主电路的暂态方程如下

$$\begin{cases} L_{\mathrm{m}}\dfrac{\mathrm{d}i_{md}}{\mathrm{d}t} = e_{md} - u_{md} - R_{\mathrm{m}}i_{md} + \omega_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{m}}i_{mq} \\ L_{\mathrm{m}}\dfrac{\mathrm{d}i_{mq}}{\mathrm{d}t} = e_{mq} - u_{mq} - \omega_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{m}}i_{md} - R_{\mathrm{m}}i_{mq} \end{cases} \tag{22}$$

$$\begin{cases} L_{\mathrm{n}}\dfrac{\mathrm{d}i_{nd}}{\mathrm{d}t} = e_{nd} - u_{nd} - R_{\mathrm{n}}i_{nd} + \omega_{\mathrm{n}}L_{\mathrm{n}}i_{nq} \\ L_{\mathrm{n}}\dfrac{\mathrm{d}i_{nq}}{\mathrm{d}t} = e_{nq} - u_{nq} - \omega_{\mathrm{n}}L_{\mathrm{n}}i_{nd} - R_{\mathrm{n}}i_{nq} \end{cases} \tag{23}$$

$$\begin{cases} L_{\mathrm{g}}\dfrac{\mathrm{d}i_{gd}}{\mathrm{d}t} = u_{md} - u_{gd} - R_{\mathrm{g}}i_{gd} + \omega_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{g}}i_{gq} \\ L_{\mathrm{g}}\dfrac{\mathrm{d}i_{gq}}{\mathrm{d}t} = u_{mq} - u_{gq} - \omega_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{g}}i_{gd} - R_{\mathrm{g}}i_{gq} \end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} C_{\mathrm{f}}\dfrac{\mathrm{d}u_{md}}{\mathrm{d}t} = i_{md} + i_{ndm} - i_{gd} + \omega_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{f}}u_{mq} \\ C_{\mathrm{f}}\dfrac{\mathrm{d}u_{mq}}{\mathrm{d}t} = i_{mq} + i_{nqm} - i_{gq} - \omega_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{f}}u_{md} \end{cases} \tag{25}$$

联立式(1)～式(25)，即可得到 GFL-VSC 和 GFM-SVG 并网系统的全阶非线性数学模型，能够精确刻画并网系统的完整暂态行为。结合控制策略可知，GFM-SVG 一方面可自主生成电压相角与频率参考，维持较为稳定的局部电压相位特性，另一方面可通过迅速补偿系统无功功率，维持并网点电压稳定，最后共同提升了并网系统的暂态稳定水平。

3　并网系统暂态稳定性分析

3.1　GFL-VSC 单机并网系统

相较于仅考虑直流电压控制的 GFL-VSC 暂态模型[25]，本文提出的暂态模型计及锁相环与电流内环的动态特性，能更加精准地刻画 GFL-VSC 受扰后的暂态行为。本小节通过相平面法分析了 GFL-VSC 主要控制参数对其暂态稳定性的影响。暂态期间，GFL-VSC 功角最大值记为 $\delta_{\max}$。网侧电压额定值 U_{gn} 为 10 kV，GFL-VSC 额定有功功率参考值 P_{in} 为 1 MW。PI 控制器其他主要参数的标幺值如表 1 所示，后文的参数变化均以表中数值为基准。

表 1　GFL-VSC 与 GFM-SVG 并网系统电磁暂态仿真模型主要参数

Table 1　Main parameters of electromagnetic transient simulation model for GFL-VSC and GFM-SVG grid connected system

参数	数值
GFL-VSC 锁相环比例、积分系数 k_{pllp}，k_{plli}	0.1，5.0
GFL-VSC 直流电压环比例、积分系数 k_{zp}，k_{zi}	0.3，3.0
GFL-VSC 无功环比例、积分系数 k_{qp}，k_{qi}	0.1，20.0
GFL-VSC 电流环比例、积分系数 k_{nip}，k_{nii}	10，100
GFM-SVG 虚拟惯量 J	1
GFM-SVG 阻尼系数 D	20
GFM-SVG 直流电压增益系数 k_{dc}	10
GFM-SVG 无功-电压环增益系数 K_{u}	60
GFM-SVG 电压环比例、积分系数 k_{vp}，k_{vi}	15，25
GFM-SVG 电流环比例、积分系数 k_{mip}，k_{mii}	15，50

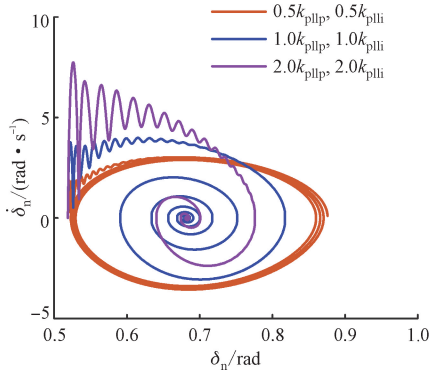
并网系统电网侧三相电压跌落为额定值的 0.91 倍后，GFL-VSC 锁相环比例系数和积分系数从额定值的 0.5 倍增至 2.0 倍时的相轨迹如图 4(a)所示。由图可知：当 k_{pllp} 和 k_{plli} 较小时，系统等效阻尼不足，网侧电压跌落引发的相位振荡无法被有效抑制，振荡幅值持续增大，最终引发系统失稳；随着 k_{pllp} 和 k_{plli} 成比例增加，锁相环的动作速度增快，可快速跟踪电网相位，系统维持暂态稳定。

并网系统电网侧三相电压跌落为额定值的 0.91 倍后，GFL-VSC 直流电压控制比例系数和积分系数从 0.2 倍增至 5.0 倍时的相轨迹如图 4(b)所示。由图可见，当 k_{zp} 和 k_{zi} 较大时，电网电压瞬间跌落引起的直流侧电压波动迅速导致有功电流的剧烈变化，进而使得换流器输出的有功功率快速振荡，GFL-VSC 功角振荡增大，不利于维持系统稳定。

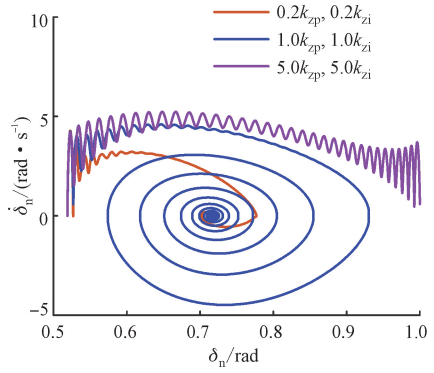
并网系统电网侧三相电压跌落为额定值的 0.91 倍后，GFL-VSC 无功控制比例系数和积分系

数从 0.8 倍增至 1.5 倍时的相轨迹如图 4(c)所示。由图可见:当无功环参数较大时,电压跌落引起的 $i_{nq,ref}$ 波动增大,换流器输出的无功功率随之振荡,并网点电压难以稳定;而锁相环依靠 u_{nq} 实现与电网的同步,u_{nq} 不稳定时,其对系统角频率的约束能力大幅削弱,降低了系统稳定能力。

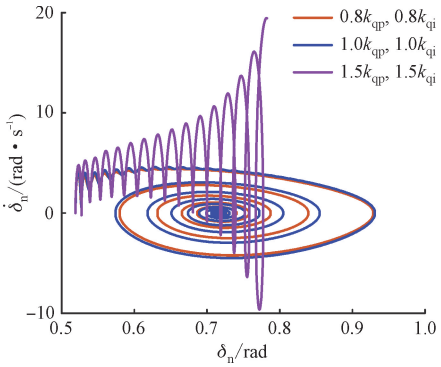
并网系统电网侧三相电压跌落为额定值的 0.91 倍后,GFL-VSC 电流内环比例系数和积分系数从 0.8 倍增至 1.5 倍时的相轨迹如图 4(d)所示。可以看出:k_{nip} 和 k_{nii} 取值较小时,面对相同的故障工况,对应的相平面轨迹基本不变;k_{nip} 和 k_{nii} 取值较大时,电网电压跌落引起机端电压快速变化,进而导致并网点电压难以稳定,系统等效阻尼不足,最终发生失稳。



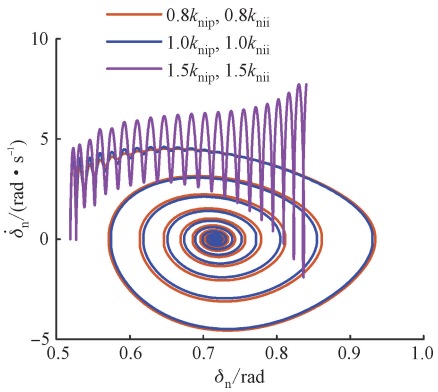
(a)不同锁相环比例与积分系数



(b)不同直流电压环比例与积分系数



(c)不同无功环比例与积分系数



(d)不同电流环比例与积分系数

图 4 不同控制参数下 GFL-VSC 的相轨迹

Fig. 4 Phase portrait of a GFL-VSC under different control parameters

综上,考虑直流电压动态过程的 GFL-VSC 在弱电网下维持暂态稳定的能力较弱。即使网侧电压发生较小的电压跌落,并网系统仍可能发生失稳。每个控制环节都显著影响着 GFL-VSC 系统的等效阻尼,为实现系统安全稳定运行,需要合理配置 GFM-SVG,以提高并网系统的暂态稳定性。

3.2 参数改变对并网系统稳定性的影响

GFM-SVG 输出电压的相角与频率由内部控制决定,暂态期间可为 VSC 提供相位和频率信息,重塑其功角与角频率动态。同时,GFM-SVG 能在暂态期间为新能源并网系统提供电压支撑,提高了并网系统的暂态稳定性。GFM-SVG 的控制参数深刻影响其暂态行为,并进一步影响着 GFL-VSC 的动态过程。为此,本小节研究了 GFM-SVG 接入后各控制参数对并网系统暂态稳定性的影响规律,以期为参数选择提供参考。目前,电力电子设备已具备 2~3 倍的短时过流能力[19],因此假设在各实验工况下,GFM-SVG 均不考虑限幅的影响,暂态期间可维持其控制策略,并网系统电网侧三相电压均设置为跌落至额定值的 0.65 倍。

电压跌落后,VSC 在不同虚拟惯量 J 下的相平面轨迹如图 5(a)所示。由图可知,随着 J 增大,系统暂态期间的 δ_{max} 显著增大,逐渐由暂态稳定变为暂态失稳。尽管较大的 J 能够减小暂态初期的功角变化率,但对功角的约束能力较弱。故障发生后,在相同角频率下,虚拟惯量越大,其相轨迹所对应的功角越大,使得系统在 $\dot{\delta}_n$ 符号由正变负前难以取得稳定的功角值,降低了系统的暂态稳定性。

图 5(b)展示了电压跌落后 VSC 在不同阻尼系数 D 下的相平面轨迹。可以看出,随着 D 增大,系

统暂态期间角频率变化和 δ_{max} 显著减小，逐渐由暂态失稳变为暂态稳定。由式(9)可知，暂态期间阻尼项的存在等效降低了 GFM-SVG 有功功率的参考值，系统留有更多的裕度，增强了系统抗扰动的能力，稳定性能显著提升。

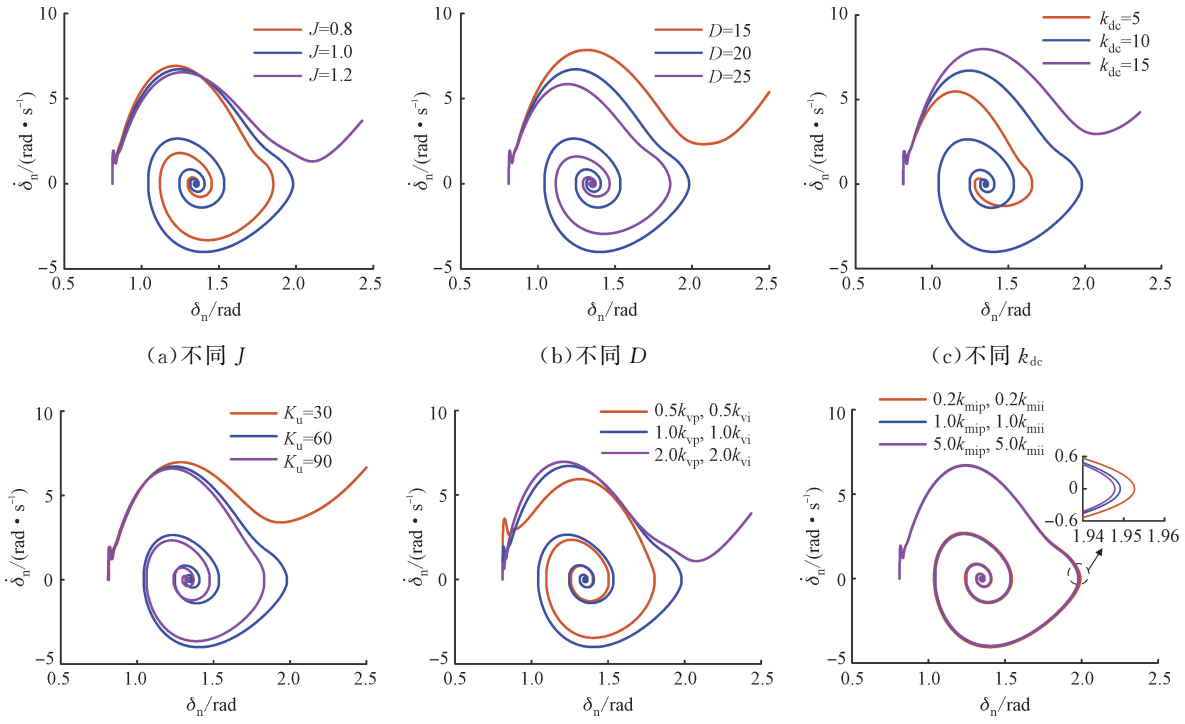
电压跌落后，VSC 在不同直流电压增益系数 k_{dc} 下的相平面轨迹如图 5(c)所示。由图可见，随着 k_{dc} 增大，SVG 在暂态期间对 VSC 频率和功角的调节能力降低，由暂态稳定变为暂态失稳。k_{dc} 增大可等效为在暂态期间提高了 SVG 有功功率参考值，加剧了系统功率不平衡程度，降低了系统稳定性。

图 5(d)展示了电压跌落后 VSC 在不同无功-电压环增益系数 K_u 下的相平面轨迹。K_u 体现了 SVG 对交流母线电压支撑的强弱，取值较小时，SVG 难以快速稳定并网点电压，系统失稳。由图 5(d)可见，随着 K_u 增大，抗扰动能力增强，由失稳转为稳定。由式(14)可知，在故障发生后，不同 K_u 对应不同的稳态平衡点，因此系统分别收敛至两个不同的平衡点。

电压跌落后，SVG 电压环比例系数和积分系数从 0.5 倍增至 2.0 倍时，VSC 的相平面轨迹如图 5(e)所示。由图可见，随着 k_{vp} 和 k_{vi} 成比例增加，系统由暂态稳定变为暂态失稳。尽管在故障发生瞬间，较小的 k_{vp} 和 k_{vi} 所对应的功角变化率更大，但在暂态期间却能够有效限制其功角变化。较大的 k_{vp} 和 k_{vi} 所对应的电压环动作速度增快，并网点的电压变化剧烈，降低了系统的暂态稳定性。

电压跌落后，SVG 电流内环比例系数和积分系数从 0.2 倍增至 5.0 倍时，VSC 的相平面轨迹如图 5(f) 所示。可以看出，尽管电流内环参数跨越较大，但 3 种工况下的相平面轨迹几乎重合。这表明，电流内环响应的时间尺度远小于主导系统暂态稳定性环节的时间尺度，在暂态过程中可快速跟踪电流指令。因此，电流内环对系统暂态稳定性的影响较小。

综上，在 GFL-VSC 与 GFM-SVG 并网系统中，SVG 功率外环、电压环的各个控制参数均显著影响着系统暂态期间的动态过程，电流内环的影响较小，需要选择合理的参数来提高系统的暂态稳定性。



(a)不同 J　(b)不同 D　(c)不同 k_{dc}

(d)不同 K_u　(e)不同电压环比例与积分系数　(f)不同电流环比例与积分系数

图 5　不同控制参数下 GFM-VSC 的相轨迹

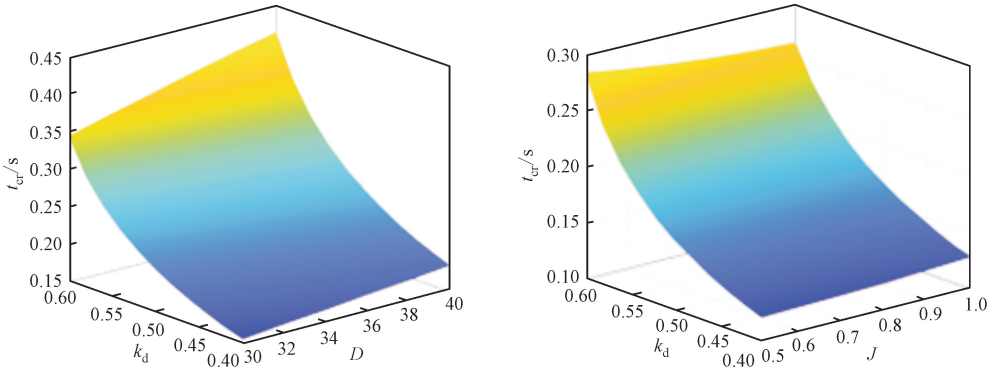
Fig. 5　Phase portrait of GFM-VSC under different control parameters

3.3　暂态稳定裕度量化分析

极限切除时间(CCT)和极限切除角(CCA)定量反映了系统的暂态稳定裕度[26]，在虚拟同步机控制中，J 与 D 显著影响着系统的暂态稳定水平[23]。本小节给出不同控制参数和不同电压跌落深度下的 CCT 与 CCA，实现了对系统暂态稳定裕度的量化

分析。定义电网电压跌落后的标幺值为 k_d，极限切除角为 δ_{cr}，极限切除时间为 t_{cr}。

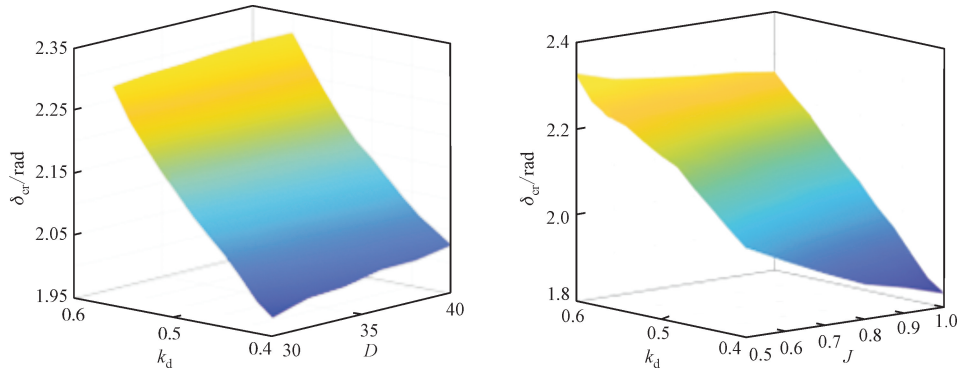
不同控制参数和故障工况下，并网系统的 CCT 及 CCA 如图 6、图 7 所示。可见，当系统其他参数固定时，随着 k_d 减小，整体上 t_{cr} 和 δ_{cr} 均明显降低。k_d 反映了故障的强度，发生故障后，k_d 越小，暂态期间系统能量波动越剧烈，系统更易失稳。



(a)不同 D 和 k_d　　(b)不同 J 和 k_d

图 6　不同参数下的极限切除时间

Fig. 6　Critical clearing time under different parameters



(a)不同 D 和 k_d　　(b)不同 J 和 k_d

图 7　不同参数下的极限切除角

Fig. 7　Critical clearing angle under different parameters

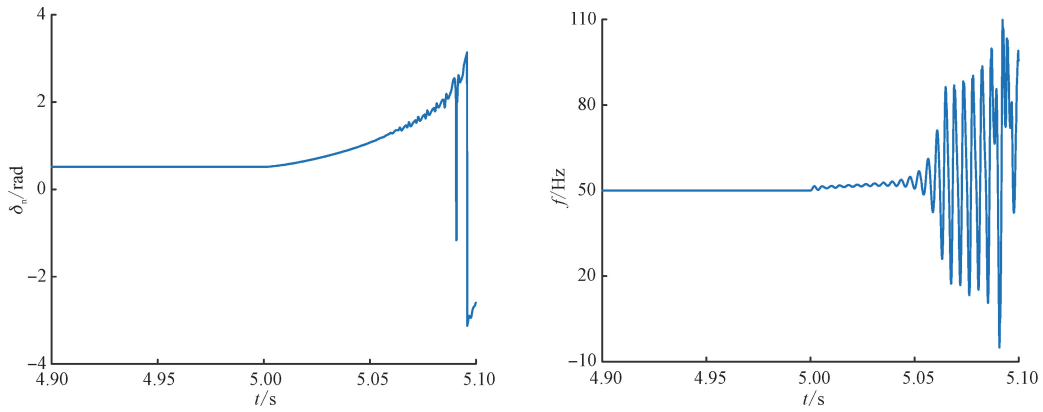
从图 6(a)和图 7(a)可以看出，随着 D 增加，系统的 t_{cr} 和 δ_{cr} 均有较大提升。暂态期间，阻尼项的存在同时对频率和功角变化进行约束，增加 D 可提高系统的抗干扰能力，使得 t_{cr} 和 δ_{cr} 增大。由图 6(b)和图 7(b)可知，随着 J 增加，系统的 t_{cr} 增大，而 δ_{cr} 明显降低。这表明，J 显著影响着系统角频率的动态变化，更大的 J 能减少故障期间的频率变化，从而降低功角的增大速率，使得 t_{cr} 增大；但由于其减弱了阻尼项的作用，导致系统的 δ_{cr} 明显降低。

4　仿真验证

为验证本文所建数学模型和控制策略的正确性，在 MATLAB/Simulink 软件中搭建 GFL-VSC 与 GFM-SVG 并网系统电磁暂态仿真模型，主要参数如表 1 所示，并网系统的短路比为 2。

4.1　GFM-SVG 对并网系统暂态稳定性的影响验证

为验证 GFM-SVG 对并网系统暂态稳定性的影响，搭建 GFL-VSC 单机并网仿真模型，在第 5 s 时设置电网电压跌落为额定值的 0.80 倍。图 8 展示了故障发生后，GFL-VSC 的功角和频率变化曲线。可以看出，该工况下 GFL-VSC 难以维持暂态稳定。弱电网下，锁相环同步能力较弱，同时考虑到直流电压动态，VSC 多个控制环节的相互作用使得并网系统的等效阻尼不足，发生故障后系统容易暂态失稳。

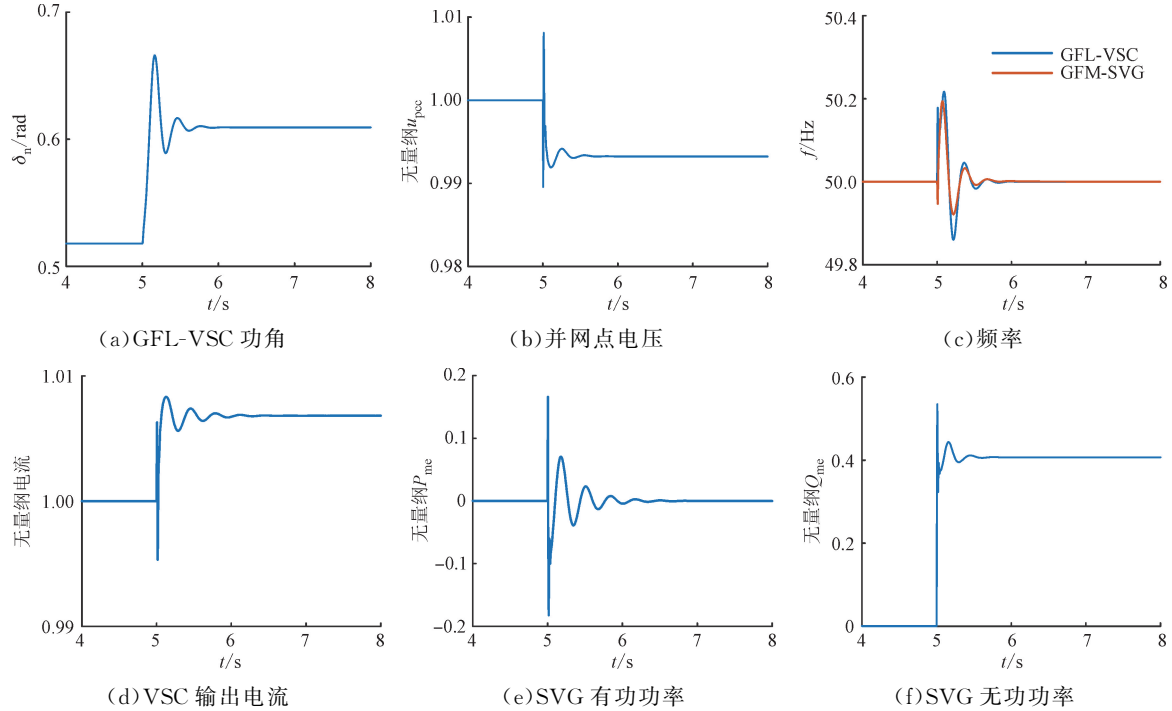


(a)功角　　(b)频率

图 8　GFL-VSC 并网系统的功角和频率变化曲线

Fig. 8　Power angle and frequency variation curves of GFL-VSC grid connected system

图 9 给出了 GFM-SVG 接入后的暂态响应波形。各子图均表明：配置 SVG 后，系统能维持暂态稳定，故障期间 VSC 功角和输出电流波动较小，所受暂态冲击得到有效缓解。图 9(c)为 VSC 和 SVG 的频率曲线，可以看出，两者暂态期间的频率曲线相近，SVG 变化更加平缓。这是因为，GFM-SVG 输出电压的相角与频率由内部控制决定，在故障期间可维持较为稳定的局部电压相位特性。由图 9(f)可知，GFM-SVG 在故障发生后可快速输出无功功率，维持并网点电压的稳定。这是因为，稳定的电压相位参考与迅速的无功支撑共同提高了暂态期间并网点电压水平，增强了系统的等效同步刚度，改善了 VSC 的锁相同步条件，减小了锁相过程中的相位和频率偏差，有效维持系统稳定运行。



(a)GFL-VSC 功角　(b)并网点电压　(c)频率

(d)VSC 输出电流　(e)SVG 有功功率　(f)SVG 无功功率

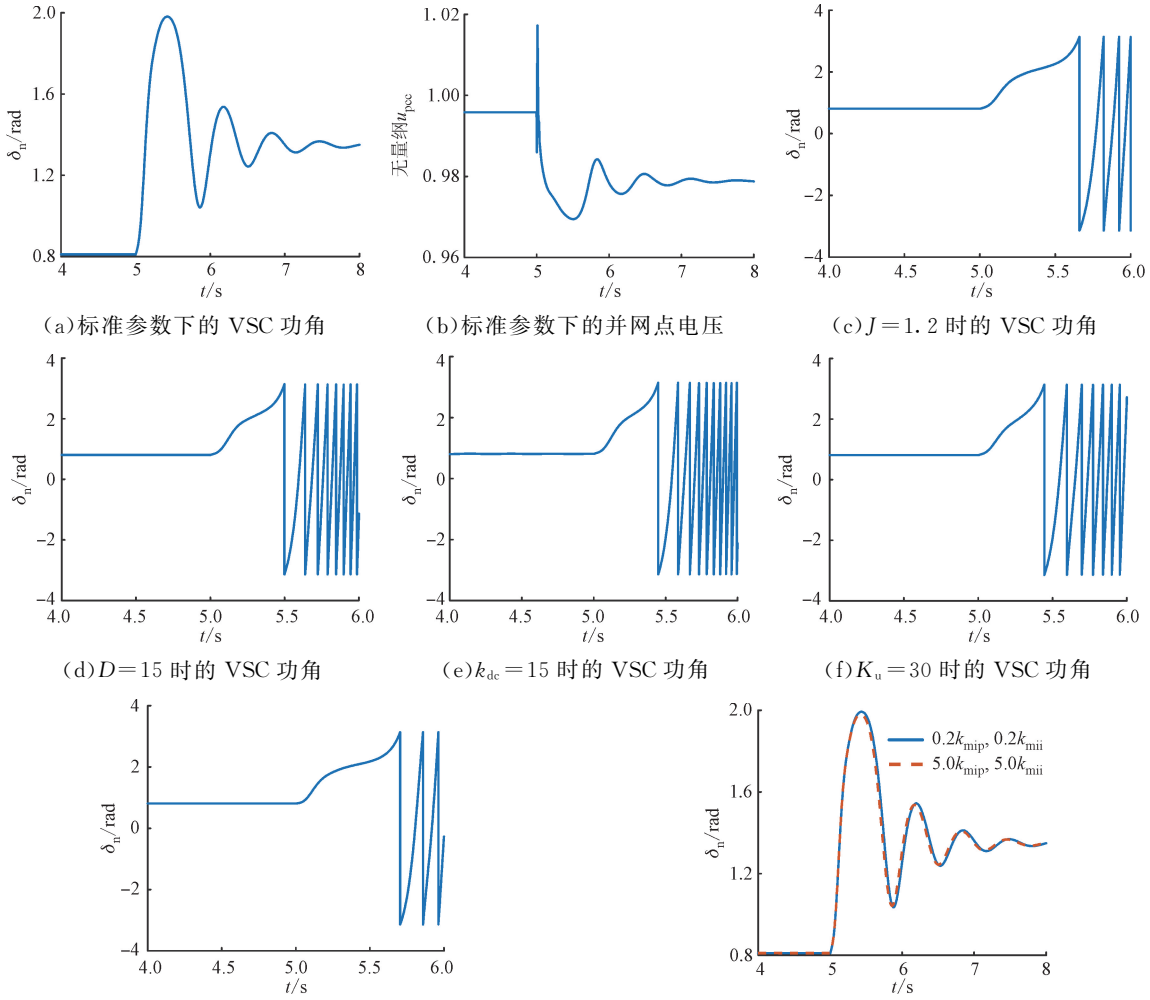
图 9　接入 GFM-SVG 后并网系统的暂态响应

Fig. 9　Transient response of grid connected system with GFM-SVG integrated

4.2　暂态稳定性影响因素验证

本节验证了并联系统中各控制参数对系统暂态稳定性的影响。将 VSC 直流侧输入功率增大为额定功率的 1.5 倍，在第 5 s 时设置并网系统电网侧三相电压跌落至额定值的 0.65 倍，通过改变 SVG 各控制参数进行对比仿真。除 VSC 出力改变外，其他控制参数均按表 1 选取。暂态期间 GFL-VSC 功角与并网点电压的波形分别如图 10(a)、

10(b)所示。由图可见,在该工况下并网系统能够维持暂态稳定。分别改变 SVG 各控制参数,得到的仿真结果如图 10(c)～10(h)所示。可以看出,在相同的故障工况下,除调整电流环的情况外,其余情况下的并网系统均失稳。对比暂态期间各功角曲线可知,不同控制参数下功角的变化速率、振荡特性等均不相同,说明各参数对暂态期间系统动态过程的调控作用具有明显差异。改变电流内环控制参数后 VSC 输出的功角曲线非常相近,表明其对系统暂态稳定性的影响较小。



(a)标准参数下的 VSC 功角 (b)标准参数下的并网点电压 (c)$J=1.2$ 时的 VSC 功角

(d)$D=15$ 时的 VSC 功角 (e)$k_{dc}=15$ 时的 VSC 功角 (f)$K_u=30$ 时的 VSC 功角

(g)电压环比例和积分系数均增至 2 倍时的 VSC 功角 (h)不同电流环比例和积分系数下的 VSC 功角

图 10 不同控制参数下 GFL-VSC 的暂态响应

Fig. 10 Transient response of GFL-VSC under different control parameters

对比图 9 和图 10 可知,不同运行点会改变系统初始潮流分布和各状态变量的平衡点位置,对并网系统暂态分析的定量结果产生影响,但却并不会改变 GFM-SVG 对并网系统暂态稳定性的影响机理。GFM-SVG 通过构网控制形成局部相角和频率参考,并结合快速无功支撑,共同提高了并网系统的暂态稳定性。

4.3 精确模型与简化模型的对比

忽略 GFL-VSC 锁相环与电流内环、GFM-SVG 电压电流环以及线路的电磁暂态过程,可将本文建立的精确全阶模型,降阶为外环状态方程和网络代数约束共同构成的低阶非线性模型,即并网系统的简化模型,描述如下

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}x_d & x_q & u_{\mathrm{dcn}} & \delta_{\mathrm{m}} & \Delta\omega_{\mathrm{m}} & u_{\mathrm{dcm}} & u_{md}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{26}$$

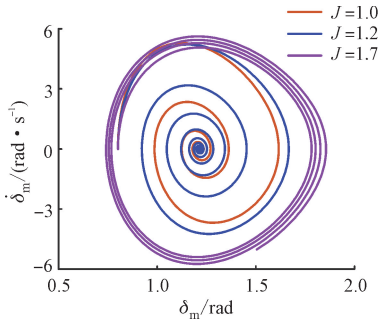
式中:x_d 和 x_q 的状态方程为

$$\frac{\mathrm{d}x_d}{\mathrm{d}t}=u_{\mathrm{dcn}}-U_{\mathrm{dc,ref}} \tag{27}$$

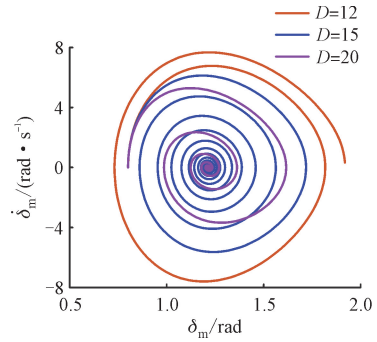
$$\frac{\mathrm{d}x_q}{\mathrm{d}t}=Q_{\mathrm{ne}}-Q_{\mathrm{ne,ref}} \tag{28}$$

对比两种模型在暂态稳定性分析中的差异,简化模型选择与 4.2 小节相同的仿真工况,图 11 展示了不同虚拟惯量和阻尼系数下简化模型的相平面轨迹。

对比图 5 和图 11 可知，两种模型在接入 GFM-SVG 后均能改善 GFL-VSC 并网系统的暂态稳定性，主要控制参数变化对系统稳定性的影响在趋势上也保持一致，但在暂态过程的定量描述上存在明显差异。



(a)不同 J



(b)不同 D

图 11　接入 GFM-SVG 后不同控制参数下的相轨迹

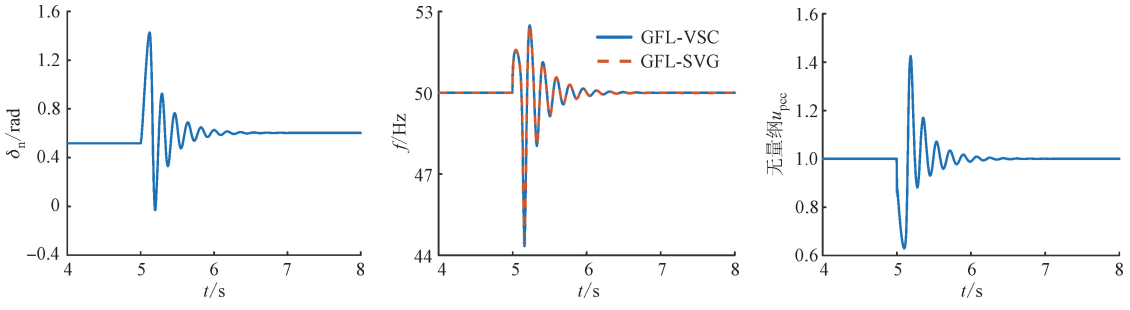
Fig. 11　Phase portrait under different control parameters with GFM-SVG integrated

发生故障后，并网点电压的幅值和相角快速变化，锁相环难以实现准确跟踪，进而影响频率与功角动态。GFM-SVG 对系统的支撑受其电压电流环动态约束，线路电磁暂态则直接影响暂态期间电压、电流和功率的实际变化过程。简化模型将上述动态过程等效为代数约束，对系统暂态过程的刻画能力相对有限，因此在接近失稳边界时可能会出现稳定性误判。相比之下，精确模型能够更完整地表征多控制环节与线路暂态的非线性作用，更适用于大扰动下暂态稳定性的准确分析。

4.4　GFM-SVG 与 GFL-SVG 的效果对比

进一步比较 GFL-SVG 与 GFM-SVG 对并网系统的支撑效果，GFL-SVG 选取文献[17]中的数学模型。由于 GFL-VSC 和 GFL-SVG 均为跟网型控制，故选择相同的锁相环参数，仿真工况同 4.1 小节。

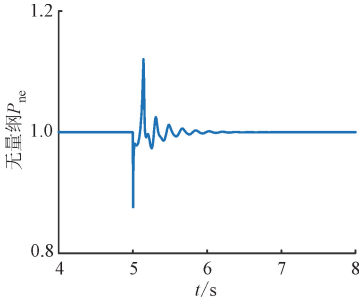
图 12 展示了 GFL-SVG 系统的暂态响应曲线。由图可见，故障发生后，系统经历剧烈振荡后逐渐稳定，暂态冲击并未得到充分抑制。对比图 9 和图 12 可知，GFL-VSC 和 GFL-SVG 暂态期间都依赖锁相环进行同步跟踪，无法形成独立稳定的频率与相角参考。相比之下，GFM-SVG 在故障初期就能通过短时能量交换与频率调整，维持其内部形成的相位和频率特性，改善了 GFL-VSC 的锁相同步条件，从而提供更强的频率支撑。虽然 GFL-SVG 在发生故障后输出无功功率的峰值更高，但系统经历更剧烈的暂态变化，表明在相同扰动条件下，GFM-SVG 对系统的暂态支撑更加稳定有效。



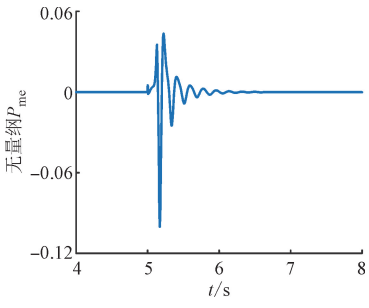
(a)GFL-VSC 功角

(b)频率

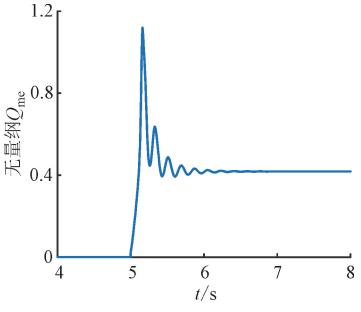
(c)并网点电压



(d)VSC 有功功率



(e)SVG 有功功率



(f)SVG 无功功率

图 12　接入 GFL-SVG 后并网系统的暂态响应

Fig. 12　Transient response of grid connected system with GFL-SVG integrated

5 结 论

本文考虑 GFL-VSC 直流电压和 GFM-SVG 电压电流环的影响，研究了 GFM-SVG 与 GFL-VSC 并网系统的暂态稳定性问题，得到如下主要结论。

(1)考虑直流电压波动的 GFL-VSC 并网系统暂态稳定能力较弱，锁相环、直流电压环、无功环与电流内环等控制参数均显著影响其暂态稳定性能。

(2)在新能源场站合理配置 GFM-SVG 后，可将暂态期间并网点电压及 GFL-VSC 电流幅值相对于额定值的偏差控制在 10%以内，显著增强了并网系统的暂态稳定能力。

(3)基于所建模型分析了并联系统各控制参数对暂态稳定性的影响，结果表明：适当增大阻尼系数 D 和无功-电压增益系数 K_u，减小虚拟惯量 J、直流电压增益系数 k_{dc} 与电压环 PI 控制参数，均可改善并网系统暂态稳定性；电流内环 PI 控制参数的影响较小。

综上，相较于不考虑 GFL-VSC 锁相环与电流内环、GFM-SVG 电压电流环、线路电磁暂态的简化模型，本文所建模型精度更高，能够更精准地刻画并网系统的暂态特性。

参考文献：

[1] 周孝信，赵强，张玉琼，等. “双碳”目标下我国能源电力系统发展趋势分析：绿电替代与绿氢替代 [J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：6707-6720.
Zhou Xiaoxin，Zhao Qiang，Zhang Yuqiong，et al. Analysis of the development trend of China’s energy and power system under the dual carbon target：green electricity substitution and green hydrogen substitution [J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(17)：6707-6720.

[2] 中国电力企业联合会. 中电联发布 2025-2026 年度全国电力供需形势分析预测报告 [EB/OL]. (2026-02-03) [2026-03-18]. http://www.cepca.org.cn/news/show-34386.html.

[3] Li Chuanyue，Wang Sheng，Liang Jun. Tuning method of a grid-following converter for the extremely-weak-grid connection [J]. IEEE Transactions on Power Systems，2022，37(4)：3169-3172.

[4] Xing Guangzheng，Chen Lei，Min Yong，et al. Effects of PLL frequency limiters on synchronization stability of grid connected VSC and strategy to realize global stability [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2023，38(3)：2096-2107.

[5] 许诘翊，刘威，刘树，等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势 [J]. 电网技术，2022，46(9)：3586-3594.
Xu Jieyi，Liu Wei，Liu Shu，et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power System Technology，2022，46(9)：3586-3594.

[6] 迟永宁，江炳蔚，胡家兵，等. 构网型变流器：物理本质与特征 [J]. 高电压技术，2024，50(2)：592-606.
Chi Yongning，Jiang Bingwei，Hu Jiabing，et al. Grid-forming converters：physical mechanism and characteristics [J]. High Voltage Engineering，2024，50(2)：592-606.

[7] 王冠淇，裴玮，熊佳旺，等. 新能源场站跟网/构网变流器协同控制策略综述 [J]. 高电压技术，2025，51(2)：793-805.
Wang Guanqi，Pei Wei，Xiong Jiawang，et al. Review of coordinated control strategies for renewable energy station with grid-following and grid-forming inverters [J]. High Voltage Engineering，2025，51(2)：793-805.

[8] Gong Hong，Wang Xiongfei，Harnefors L. Rethinking current controller design for PLL-synchronized VSCs in weak grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2022，37(2)：1369-1381.

[9] He Xiuqiang，Geng Hua，Li Ruiqi，et al. Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy，2020，11(3)：1612-1623.

[10] Zhao Jiantao，Huang Meng，Yan Han，et al. Nonlinear and transient stability analysis of phase-locked loops in grid-connected converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2021，36(1)：1018-1029.

[11] Wu Heng，Wang Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2020，35(4)：3573-3589.

[12] Fu Xikun，Sun Jianjun，Huang Meng，et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter：a comparative study [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2021，36(7)：7832-7840.

[13] Ma Rui，Li Jinxin，Kurths J，et al. Generalized swing equation and transient synchronous stability with PLL-based VSC [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2022，37(2)：1428-1441.

[14] Zhou Pian，Yuan Xiaoming，Hu Jiabing，et al. Stability of DC-link voltage as affected by phase locked loop in VSC when attached to weak grid [C]//2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. Pis-

cataway，NJ，USA：IEEE，2014：1-5.

[15] Yang Ziqian，Ma Rui，Cheng Shijie，et al. Nonlinear modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters under voltage dips [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2020，8(4)：3281-3292.

[16] 韩民晓，赵正奎，郑竞宏，等. 新能源场站电网暂态电压支撑技术发展动态 [J]. 电网技术，2023，47(4)：1309-1322.
Han Minxiao，Zhao Zhengkui，Zheng Jinghong，et al. Development of dynamic voltage support for power grid with large-scale renewable energy generation [J]. Power System Technology，2023，47(4)：1309-1322.

[17] 肖泽坤，涂春鸣，肖凡，等. 基于 SVG 主动调控的弱电网下 VSG 并网系统稳定性提升方法 [J]. 供用电，2023，40(5)：25-33.
Xiao Zekun，Tu Chunming，Xiao Fan，et al. Stability improvement method of VSG grid-connected system under weak current network based on SVG active regulation [J]. Distribution & Utilization，2023，40(5)：25-33.

[18] 唐英杰，查晓明，田震，等. 弱电网条件下虚拟同步机与 SVG 并联系统的暂态稳定性分析 [J]. 电网技术，2022，46(10)：4020-4034.
Tang Yingjie，Zha Xiaoming，Tian Zhen，et al. Transient stability analysis of virtual synchronous generator and SVG parallel system under weak grid conditions [J]. Power System Technology，2022，46(10)：4020-4034.

[19] 邱硕，庄可好，汤波，等. 基于直流电容自同步的构网型 SVG 暂态同步稳定分析与提升策略 [J]. 电网技术，2025，49(9)：3633-3642.
Qiu Shuo，Zhuang Kehao，Tang Bo，et al. Transient synchronous stability analysis and enhancement strategy for DC capacitor self-synchronisation-based constructed grid type SVGs [J]. Power System Technology，2025，49(9)：3633-3642.

[20] 刘辉，张少聪，刘京波，等. 风电场站构网型 SVG 暂态同步稳定性分析与提升 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2025，52(5)：30-42.
Liu Hui，Zhang Shaocong，Liu Jingbo，et al. Analysis and improvement of transient synchronous stability of grid-forming SVG in wind farm stations [J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition)，2025，52(5)：30-42.

[21] 尚磊，唐王倩云，苏适，等. 构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压 [J]. 电力工程技术，2024，43(2)：83-93.
Shang Lei，Tang Wangqianyun，Su Shi，et al. Suppression of transient overvoltage in renewable energy transmission terminal by grid-forming based reactive power compensation [J]. Electric Power Engineering Technology，2024，43(2)：83-93.

[22] 陈永平，陈俊儒，刘牧阳. 弱电网下虚拟同步补偿器对新能源暂态同步稳定性的影响机理 [J]. 电网技术，2025，49(4)：1347-1357.
Chen Yongping，Chen Junru，Liu Muyang. Study on the influence mechanism of virtual synchronous compensator on the transient synchronous stability of new energy in weak power grids [J]. Power System Technology，2025，49(4)：1347-1357.

[23] 魏凤廷，张海涛，王秀丽，等. 计及电压动态特性的虚拟同步机暂态稳定性分析 [J]. 电网技术，2024，48(7)：2910-2918.
Wei Fengting，Zhang Haitao，Wang Xiuli，et al. Transient stability analysis of virtual synchronous generator considering voltage dynamic characteristics [J]. Power System Technology，2024，48(7)：2910-2918.

[24] 郭越. 基于虚拟同步发电机的并网逆变器构网型控制策略研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2023.

[25] 刘昕宇，单永鹏，辛焕海，等. 基于直流电压控制的新能源并网系统暂态电压稳定性分析 [J]. 电工技术学报，2026，41(9)：2978-2990.
Liu Xinyu，Shan Yongpeng，Xin Huanhai，et al. Transient voltage stability analysis of voltage source converters integrated system under dc voltage control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2026，41(9)：2978-2990.

[26] Ge Pingjuan，Tu Chunming，Xiao Fan，et al. Design-oriented analysis and transient stability enhancement control for a virtual synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2023，70(3)：2675-2684.

（编辑　李慧敏）