



面向高比例可再生能源系统的VSG型构网储能多短路比自适应控制技术 技术研究

宗思佳, 彭寅章, 李明, 兰承龙, 梁继业, 克帕依吐·吐尔逊, 阿拜·朱马别克
(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830063)

摘要: 针对高比例可再生能源系统中不同短路比(SCR)工况下, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)型构网储能采用固定阻尼系数D与虚拟惯量J时存在有功动态响应性能与并网稳定裕度难以兼顾的问题, 提出一种离线D-J可行域构建与在线自适应控制策略。首先基于VSG有功环小信号模型, 以最佳阻尼比为目标获得满足动态性能要求的D-J参数区域; 然后利用VSG型构网储能dq阻抗模型分析不同SCR下系统并网稳定裕度, 获得满足稳定裕度要求的D-J参数区域。综合上述动态和稳态区域, 离线建立不同SCR对应的D-J可行域。在线运行时, 控制器根据识别得到的SCR调用相应可行域, 搜索距离当前运行点最近的参数点, 并通过一阶惯性环节实现D、J的平滑过渡。仿真结果表明: 当SCR由10降至2时, 固定参数VSG的有功功率出现低频振荡并最终失稳, 而所提自适应策略避免了系统失稳。在有功阶跃指令下, 所提策略降低了响应超调并加快振荡衰减, 改善了系统动态性能。所提方法无需在线扫频判稳和复杂优化计算, 提高了VSG型构网储能对SCR变化的适应能力。

关键词: 高比例可再生能源; 虚拟同步发电机; SCR; 阻尼系数; 虚拟惯量; 自适应控制

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0600

中图分类号: TM 74

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-12

Adaptive Control of VSG-Based Grid-Forming Energy Storage Across Multiple Short-Circuit Ratios in Power Systems with High Renewable Energy Penetration

ZONG Sijia, PENG Yinzhang, LI Ming, LAN Chenglong, LIANG Jiye, KEPAYITU Tuerxun,
ABAI Zhumabieke

(State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Urumchi 830063,
Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: In systems with a high proportion of renewable energy, when a virtual synchronous generator (VSG) -type grid-forming energy storage system operates under different short-circuit ratios (SCR) with a fixed damping coefficient D and virtual inertia J, it is difficult to balance active power dynamic response performance and grid-connection stability margin. To address this issue, this paper proposes a method for constructing the D-J offline feasibility region and an online adaptive control strategy. First, based on the small-signal model of the

收稿日期: 2026-07-10; 修改稿日期: 2026-09-24。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (SGXJDK00XXJS2600047)。

第一作者: 宗思佳 (1995—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为新能源及储能技术, E-mail: 1904182683@qq.com; 通信作者: 宗思佳, 助理工程师, 研究方向为新能源及储能技术, E-mail: 1904182683@qq.com。

引用本文: 宗思佳, 彭寅章, 李明, 等. 面向高比例可再生能源系统的VSG型构网储能多短路比自适应控制技术研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-12.

Citation: ZONG Sijia, PENG Yinzhang, LI Ming, et al. Adaptive Control of VSG-Based Grid-Forming Energy Storage Across Multiple Short-Circuit Ratios in Power Systems with High Renewable Energy Penetration[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-12.

VSG active power loop, a region of D-J parameters that satisfies the dynamic performance requirements is obtained by optimizing the damping ratio. Then, using the dq impedance model of the VSG-type grid-forming energy storage, the system's grid-connection stability margin under different SCR conditions is analyzed to obtain a region of D-J parameters that meets the stability margin requirements. By integrating these dynamic and steady-state regions, the D-J feasibility domain corresponding to different SCRs is established offline. During online operation, the controller retrieves the corresponding feasible region based on the identified SCR value, searches for the parameter point closest to the current operating point, and achieves a smooth transition of D and J through a first-order inertia term. Simulation results show that when the SCR is reduced from 10 to 2, the active power of a VSG with fixed parameters exhibits low-frequency oscillations and eventually becomes unstable, whereas the proposed adaptive strategy prevents system instability. Under active-power step commands, the proposed strategy reduces response overshoot and accelerates oscillation decay, thereby improving the system's dynamic performance. The proposed method eliminates the need for online frequency-sweep stability analysis and complex optimization calculations, enhancing the adaptability of VSG-based grid-forming energy storage to SCR variations.

Keywords: high proportion of renewable energy; virtual synchronous generator; short-circuit ratio; damping coefficient; virtual inertia; adaptive control

随着“双碳”目标推进,风电、光伏等可再生能源装机及发电量占比持续提高,大量新能源及储能装置通过电力电子变流器接入电网,高比例可再生能源系统逐渐形成^[1]。受风光出力随机性、波动性以及传统同步机在线容量下降等因素影响,系统呈现低惯量、弱阻尼和强电力电子化特征^[2]。同时,新能源出力、负荷水平及网络运行方式的变化会引起局部短路容量和并网点SCR波动,使弱电网工况出现得更加频繁。

构网型变流器具有电压源外特性,能够主动建立电压和频率,为弱电网和高比例新能源系统提供惯量、阻尼和电压支撑^[3-5]。而虚拟同步发电机(VSG)控制是构网型储能变流器的典型控制方式之一^[6-7],其通过模拟同步发电机转子运动方程,在控制结构中引入虚拟惯量J和阻尼系数D,使储能变流器具备类似同步机的频率支撑和功率调节能力^[6,8]。文献[9]建立了VSG功率环模型,表明J和D会直接影响有功动态响应、频率变化率、超调量及振荡衰减过程;文献[10]建立了考虑多控制环路影响的VSG型构网储能dq阻抗模型,指出弱电网条件下功率环参数变化可能诱发低频振荡;由此可见,VSG型构网储能的动态响应特性和并网稳定

裕度均与D、J参数密切相关。

针对固定参数VSG难以适应不同扰动工况的问题,已有研究提出了多种参数自适应控制方法^[11]。文献[12]根据频率动态状态调整虚拟惯量,可改善暂态频率响应,但主要关注J的调节,对阻尼参数协同作用考虑不足。文献[13]根据角速度变化率及偏差量对J和D进行自调节,能够兼顾频率波动和有功振荡抑制,但参数边界多依赖经验设定,未考虑电网强度变化对参数稳定范围的影响。文献[14]提出一种电网强度在线感知的自适应策略,通过检测电网阻抗并自适应优化虚拟阻尼,但该方法主要围绕动态性能优化展开,未进一步考虑D、J参数在不同SCR下的稳定可行范围。文献[15]基于VSG输出阻抗与电网阻抗比相角裕量进行自适应参数设计,提高了VSG对弱电网的适应能力,但其重点仍在参数优化与暂态性能改善,未形成面向不同SCR的D-J可行域及在线调用机制。总体来看,现有VSG自适应控制多以改善频率响应和有功暂态性能为目标,对SCR变化引起的稳定裕度变化考虑仍不充分,参数调整过程缺少面向不同SCR的稳定可行域约束^[16-17]。

针对上述问题,提出一种不同SCR下VSG型

构网储能离线 D - J 可行域构建与在线自适应控制方法。该方法基于有功环动态约束和阻抗稳定裕度约束，离线获得不同 SCR 下满足动态性能与稳定性要求的 D - J 可行域；在线运行时，根据电网强度变化调用目标可行域并调整 D 、 J 参数，以提高 VSG 型构网储能在不同电网强度下的适应能力。

本工作首先建立 VSG 型构网储能有功环小信号模型和 dq 输出阻抗模型，分析不同 SCR 工况下 D 、 J 参数对有功动态性能及并网稳定裕度的影响；随后提出基于 D - J 离线可行域构建的在线自适应控制策略；最后通过仿真验证所提方法的有效性。

1 VSG 型构网储能建模及 D - J 参数稳定性分析

1.1 VSG 有功闭环小信号模型

典型的 VSG 构网储能的结构框图如图 1 所示。

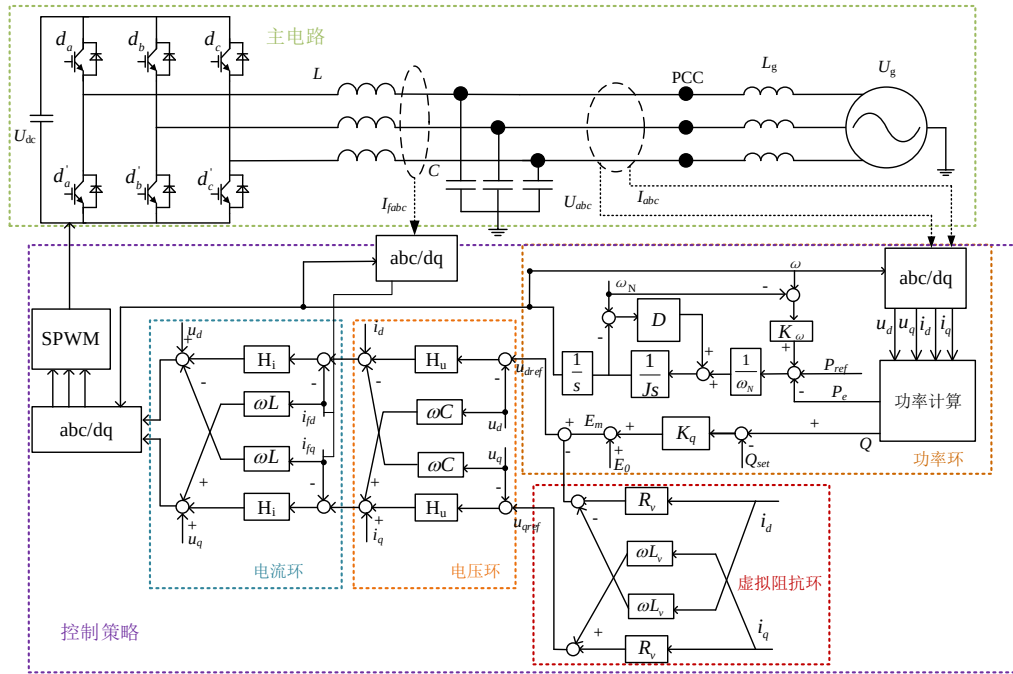


图 1 VSG 型构网储能的结构框图

Fig. 1 Block Diagram of the VSG-Type Grid-Connected Energy Storage System

首先建立 VSG 有功环闭环小信号模型。该模型用于描述有功功率参考扰动下有功输出的动态响应，并为后续 D - J 可行域构建提供有功动态约束。VSG 有功环主要由有功下垂环节和虚拟转子运动方程组成。其中下垂环节描述虚拟机械功率与输出角频率偏差之间的关系，如式 (1) 所示^[9]。

$$P_m - P_{ref} = -K_\omega(\omega - \omega_{ref}) \quad (1)$$

式中， P_{ref} 为有功功率参考值， K_ω 为有功下垂系数， ω_{ref} 为额定角频率。

虚拟转子方程描述有功功率不平衡对输出角频率的影响，其控制方程如式 (2) 所示^[18]。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_{ref}} - D(\omega - \omega_g) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_g \end{cases} \quad (2)$$

式中， P_m 为虚拟机械功率， P_e 为 VSG 输出有功功率， ω 和 ω_g 分别为 VSG 输出角频率和电网角频率， D 为阻尼系数， J 为虚拟惯量。

VSG 输出复功率如式 (3) 所示。

$$S = 3U_0 I_g^* = 3U_0 \frac{U_0 - U_g}{r - jX_s} \quad (3)$$

式中， I_g 为并网电流， U_0 为 VSG 输出端电压幅值， U_g 为电网电压幅值， r 为线路等效电阻， X_s 为线路等效电抗。实际中线路阻抗通常以感性成分为主，且可通过虚拟阻抗环节进一步增强等效感性特征，因此一般满足 $X_s \gg r$ 。在忽略线路电阻影响的条件下，对式 (3) 取其实部，可得到 VSG 输出有功功率 P_e 与功角 δ 之间的近似关系如式 (4) 所示。

$$P_e = \frac{3U_0U_g}{X_s} \sin \delta \quad (4)$$

为建立有功环闭环小信号模型,联立式(1)、式(2)式(4),将系统中各变量表示为稳态工作点与小扰动量叠加的形式。在小扰动条件下,忽略二阶及以上高阶小量,并消去稳态分量,可得到各环节的小信号关系^[9]。最终可得到如图2所示的VSG有功环闭环小信号模型。

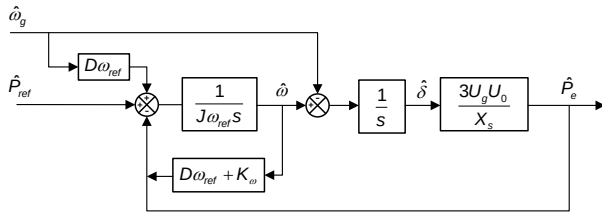


图2 VSG有功环闭环小信号模型图

Fig. 2 Closed-loop small-signal model of the VSG active-power loop

由图2所示有功闭环小信号模型可得,有功功率参考扰动 \$\hat{P}_{ref}\$ 到VSG输出有功功率 \$\hat{P}_e\$ 的闭环传递函数如式(5)所示。

$$G(s) = \frac{\hat{P}_e}{\hat{P}_{ref}} = \frac{3U_gU_0/J\omega_{ref}X_s}{s^2 + ((D\omega_{ref} + K_w)/J\omega_{ref})s + 3U_gU_0/J\omega_{ref}X_s} \quad (5)$$

将式(5)和标准二阶系统分母对比,可得VSG有功环闭环系统的阻尼比 \$\zeta\$ 和无阻尼自然振荡角频率 \$\omega_n\$ 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \zeta = \frac{D\omega_{ref} + K_w}{2\sqrt{J\omega_{ref} \cdot 3U_gU_0/X_s}} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{3U_gU_0}{J\omega_{ref}X_s}} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,在 \$U_g\$、\$U_0\$ 和 \$X_s\$ 一定时,阻尼系数 \$D\$ 增大提高系统阻尼比,有利于抑制有功功率振荡并减小动态超调;虚拟惯量 \$J\$ 增大则会降低系统阻尼比和无阻尼自然振荡角频率,使系统振荡倾向增强,且有功功率响应速度变慢。由此可见, \$D\$ 和 \$J\$ 对有功动态响应具有相互制约关系。选取二阶系统常用的阻尼比 \$\zeta=0.707\$ 作为有功环动态性能约束,在该约束下可进一步得到 \$D\$ 与 \$J\$ 的对应关系,如式(7)所示。

$$D = \frac{2\zeta \sqrt{J\omega_{ref} \cdot 3U_gU_0/X_s} - K_w}{\omega_{ref}} \quad (7)$$

由于 SCR 变化会改变电网等效电抗 \$X_s\$, 因此

不同 SCR 下满足 \$\zeta=0.707\$ 的 \$D\$-\$J\$ 曲线也会发生变化,如图3所示。

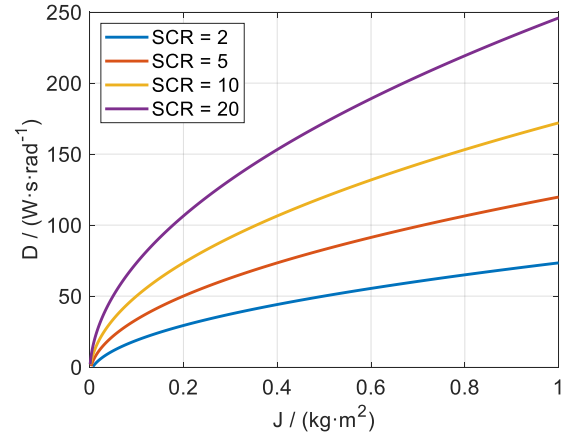


图3 最佳阻尼比下不同SCR的D-J对应关系

Fig. 3 D-J Relationships for Different SCRs at the Optimal Damping Ratio

1.2 VSG 型构网储能 dq 阻抗模型

为确保不同 SCR 工况下 \$D\$、\$J\$ 参数调整后系统仍处于稳定运行范围内,进一步引入 VSG 型构网储能 dq 输出阻抗模型,并结合 Nyquist 稳定判据^[19],为后续离线 \$D\$-\$J\$ 可行域构建提供判稳依据。

在 dq 坐标系下,VSG 型构网储能端口电压扰动量与并网电流扰动量之间的关系定义见式(8)。

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_d(s) \\ \hat{u}_q(s) \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{out}(s) \begin{bmatrix} \hat{i}_d(s) \\ \hat{i}_q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{dd}(s) & Z_{dq}(s) \\ Z_{qd}(s) & Z_{qq}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d(s) \\ \hat{i}_q(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, \$\mathbf{Z}_{out}(s)\$ 为 VSG 型构网储能的 dq 等效输出阻抗矩阵, \$Z_{dd}(s)\$ 和 \$Z_{qq}(s)\$ 分别为 d 轴、q 轴自阻抗, \$Z_{dq}(s)\$ 和 \$Z_{qd}(s)\$ 为 dq 轴之间的耦合阻抗。

其中, \$\mathbf{Z}_{out}(s)\$ 的建立综合考虑了 VSG 型构网储能系统中功率控制环、电压控制环、电流控制环以及虚拟阻抗环之间的耦合作用。采用文献[10]提出的多控制环路阻抗建模方法,通过控制环节传递矩阵描述各控制环对端口阻抗特性的影响,得到 VSG 型构网储能的 dq 输出阻抗矩阵如式(9)所示。

$$\mathbf{Z}_{out}(s) = [\mathbf{G}_2(s) + \mathbf{G}_3(s)\mathbf{G}_{10}(s)]^{-1}[\mathbf{I} - \mathbf{G}_3(s)\mathbf{G}_{11}(s)] \quad (9)$$

各个矩阵的含义见附录。阻尼系数 \$D\$ 和虚拟惯量 \$J\$ 通过功率环进入控制传递矩阵。由于功率环主要影响低频段阻抗特性,故 \$D\$、\$J\$ 参数变化会直接影响弱电网条件下的低频稳定裕度^[10,20]。

将电网等效阻抗写为 dq 坐标系下的矩阵形式

如式 (10) 所示。

$$\mathbf{Z}_g(s) = \begin{bmatrix} sL_g + R_g & -\omega_0 L_g \\ \omega_0 L_g & sL_g + R_g \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, L_g 和 R_g 分别为电网等效电感和等效电阻, ω_0 为额定角频率。SCR 变化会改变电网等效阻抗, 进而改变 $\mathbf{Z}_g(s)$ 与 $\mathbf{Z}_{out}(s)$ 之间的交互关系。构造阻抗比矩阵如式 (11) 所示。

$$\mathbf{L}(s) = \mathbf{Z}_g(s) \mathbf{Z}_{out}^{-1}(s) \quad (11)$$

并根据式 (12) 计算其特征根轨迹。

$$\lambda_i(s) = \text{eig}[\mathbf{Z}_g(s) \mathbf{Z}_{out}^{-1}(s)], \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

假设 VSG 型构网储能和电网单独运行时均处于小信号稳定状态, 且阻抗比矩阵 $\mathbf{L}(s)$ 不存在开环右半平面极点。Nyquist 稳定判据可简化为: 通过判断特征根轨迹相对于 $(-1, j0)$ 点的位置关系, 分析不同 SCR 及不同 D 、 J 参数下系统的小信号稳定性^[21-22]。可根据阻抗稳定性分析结果得到不同 SCR 下的 D - J 稳定区域, 为后续离线稳态可行域构建提供依据。

1.3 VSG 型构网储能稳定性分析

基于表 1 所示主电路及控制参数, 利用式 (12) 计算不同 SCR 工况及 D 、 J 参数组合下的阻抗比特征根轨迹, 以分析对并网稳定性的影响。

表 1 VSG 型构网储能控制与主电路参数

Table 1 VSG Grid-Connected Energy Storage Control and Main Circuit Parameter

变量	取值
有功功率参考值 P_{ref} / kW	500
无功功率参考值 Q_{ref} / kvar	0
滤波电感 L_f / μH	150
滤波电感等效串联电阻 R_f / Ω	0.005
滤波电容 C_f / μF	2250
直流母线电压 U_{dc} / V	700
额定角频率 ω_n / (rad/s)	100 π
电网相电压有效值 U_g / V	220
电压环比例增益 K_{pu}	9
电压环积分增益 K_{iu}	300
电流环比例增益 K_{pi}	0.5
电流环积分增益 K_{ii}	50

电网 SCR 的变化本质上对应电网等效阻抗的变化^[23]。考虑到中高压电网等效阻抗通常以感性分量为主, 故在阻抗比分析中采用电网等效电感 L_g 表征不同 SCR 下的电网强度变化, 其计算式如式 (13) 所示^[24]。

$$L_g = \frac{3U_g^2}{\text{SCR} \cdot S_{base} \cdot \omega_0} \quad (13)$$

为进一步量化系统稳定裕度, 定义特征根轨迹到临界点 $(-1, j0)$ 的最小距离如式 (14) 所示。

$$d_{\min} = \min |\lambda_i(j\omega) - (-1 + j0)| \quad (14)$$

后续用 $d_{\min}$ 表征系统的稳定裕度大小。

1.3.1 电网强度对系统稳定性的影响

保持 VSG 控制参数 D 和 J 不变, 分别选取不同 SCR, 绘制阻抗比矩阵 $\mathbf{Z}_g(s) / \mathbf{Z}_{out}(s)$ 的特征根轨迹, 结果如图 4 所示。

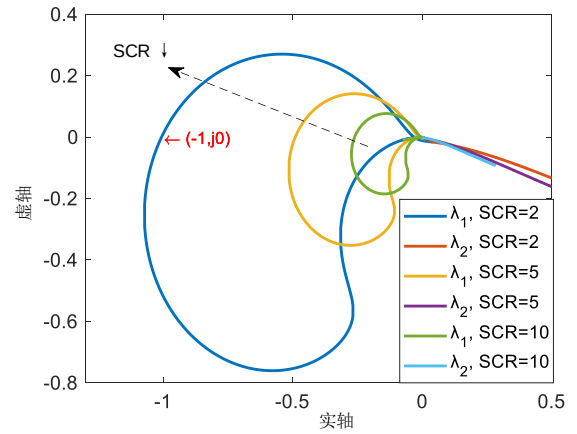


图 4 不同 SCR 下 $\mathbf{Z}_g(s)/\mathbf{Z}_{out}(s)$ 特征根轨迹

Fig. 4 Root locus of $\mathbf{Z}_g(s)/\mathbf{Z}_{out}(s)$ for different short-circuit ratios

图 4 表明随着 SCR 降低, 特征根轨迹逐渐向临界点 $(-1, j0)$ 靠近, 系统稳定裕度减小。在弱电网条件下, VSG 输出阻抗与电网阻抗之间的耦合增强, 使得系统更容易出现低频振荡或临界稳定问题。因此, 固定 D 、 J 参数难以适应不同电网强度下的稳定性要求。

1.3.2 阻尼系数与虚拟惯量对系统稳定性的影响

一定的电网强度下, 阻尼系数 D 和虚拟惯量 J 是影响 VSG 输出阻抗低频特性的关键参数^[10]。保持 J 不变, 分析不同 D 对系统稳定性的影响, 得到阻抗比特征根轨迹如图 5 所示。图 5 表明, 适当增大 D 能够提高有功环阻尼, 抑制低频振荡, 使特征根轨迹远离临界点, 提高系统稳定裕度。

为分析不同虚拟惯量 J 对系统稳定性的影响, 保持阻尼系数 D 不变, 得到阻抗比特征根轨迹如图 6 所示。图 6 表明, 特征根轨迹随 J 增大逐渐向临界点靠近。当 J 过大时, 特征根轨迹接近甚至包围 $(-1, j0)$ 点, 系统失稳。同时结合式 (6) 可知, 在其

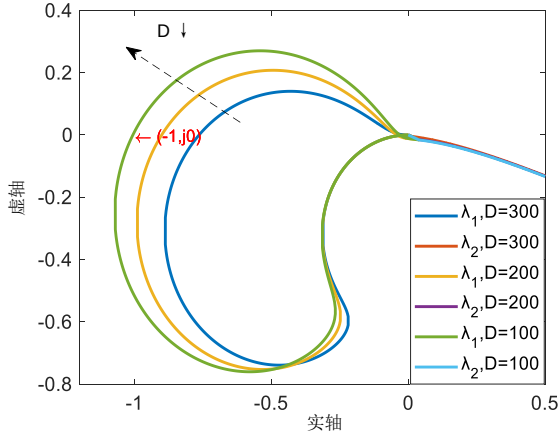


图5 不同 D 下 $Z_g(s)/Z_{out}(s)$ 特征根轨迹
Fig. 5 Characteristic root trajectories of $Z_g(s)/Z_{out}(s)$ for different values of D

他参数一定时, J 增大会降低有功环阻尼比, 使系统振荡倾向增强。因此, 虚拟惯量 J 虽然能够增强频率支撑能力、降低频率变化率, 但其取值必须受到稳定性约束。

1.3.3 不同SCR下 D - J 稳定区域

为进一步获得不同SCR下 D 、 J 参数的稳定可

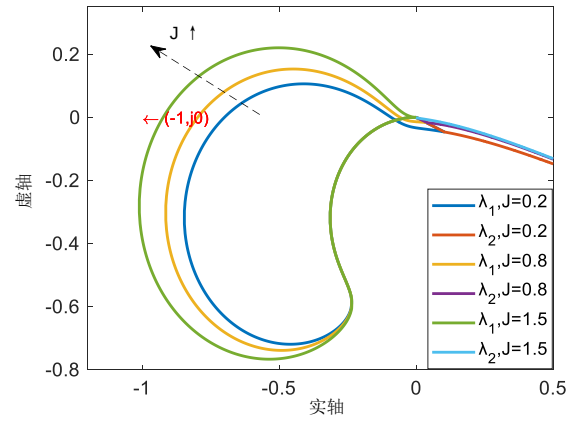


图6 不同 J 下 $Z_g(s)/Z_{out}(s)$ 特征根轨迹
Fig. 6 Characteristic root trajectories of $Z_g(s)/Z_{out}(s)$ under different J conditions

行范围, 在给定SCR条件下对 D 、 J 进行二维扫描。对于每一组 D 、 J 参数, 首先计算当前SCR下的稳态工作点, 然后利用阻抗比矩阵 $Z_g(s)/Z_{out}(s)$ 的特征根轨迹判稳, 最后利用 d_{min} 表征其稳定裕度。不同SCR下的 D 、 J 参数稳定区域如图7所示。随着SCR降低, 稳定区域整体呈现收缩趋势。这说明弱电网条件下VSG对 D 、 J 参数变化更加敏感。

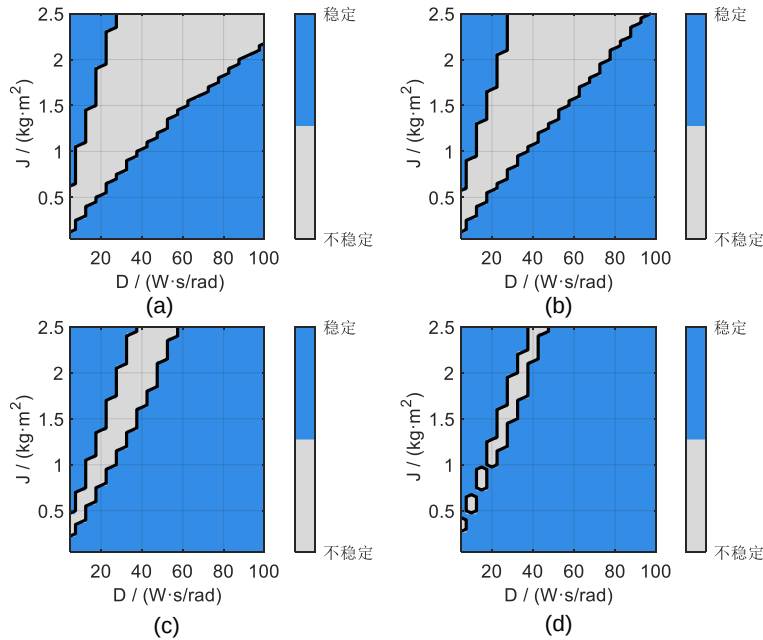


图7 不同SCR下的 D 、 J 参数稳定域: (a) SCR = 1.5 (b) SCR = 2 (c) SCR = 5 (d) SCR = 10
Fig. 7 Stability regions of the D and J parameters at different short-circuit ratios: (a) SCR = 1.5 (b) SCR = 2 (c) SCR = 5 (d) SCR = 10

不同SCR下稳定区域内的稳定裕度大小 d_{min} 分布如图8所示。由图8可以看出, 在同一稳定区域

内, 不同参数点的 d_{min} 存在明显差异。部分参数点虽然满足不包围 $(-1, j0)$ 的稳定判据, 但其 d_{min} 较小,

受电网阻抗误差、运行点变化或控制延时影响时更容易出现稳定性下降。因此，在构建 D - J 可行域

时，不仅以“是否稳定”作为唯一筛选条件，还引入了稳定裕度约束。

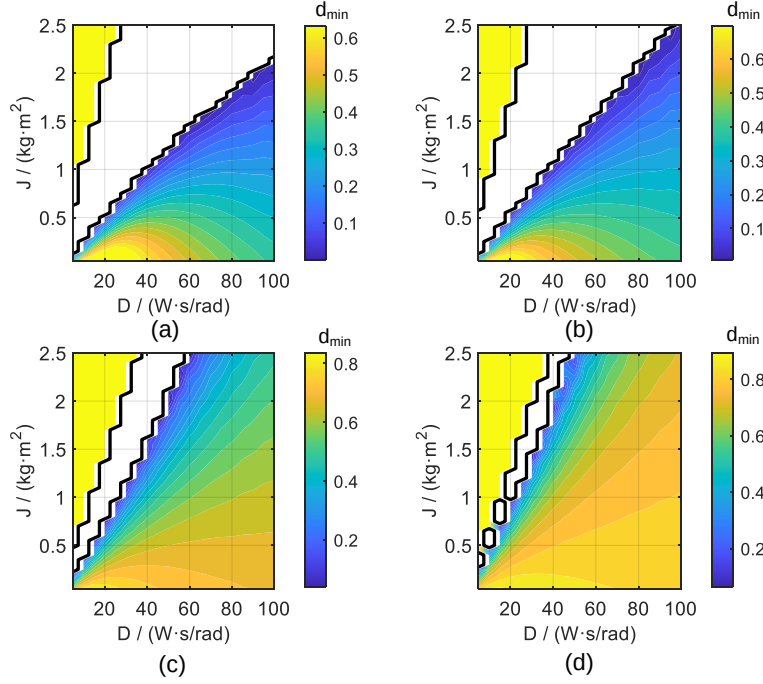


图8 不同SCR下的 D 、 J 参数对应的稳定裕度 d_{min} : (a) SCR =1.5 (b) SCR =2 (c) SCR =5 (d) SCR =10

Fig. 8 Stability margins d_{min} corresponding to the D and J parameters at different short-circuit ratios: (a) SCR = 1.5 (b) SCR =2 (c) SCR =5 (d) SCR =10

2 不同 SCR 下自适应控制策略

由第1节分析可知，同一组阻尼系数 D 和虚拟惯量 J 在不同 SCR 下可能表现出不同的稳定裕度和动态响应特性。因此，若仍采用固定 D 、 J 参数，难以同时兼顾强电网与弱电网工况下的有功动态性能和并网稳定裕度。

针对该问题，本工作提出一种不同 SCR 下 VSG 型构网储能阻尼—惯量自适应控制策略，其基本思想是：离线阶段综合有功环动态约束、阻抗稳定裕度约束和工程约束，构建不同 SCR 对应的 D - J 可行域；在线阶段根据 SCR 变化调用目标工况下的离线可行域，并将当前参数点平滑迁移至目标可行域内。

2.1 离线构建 D - J 可行域

离线阶段的目标是在控制器运行前获得不同 SCR 条件下满足动态性能、稳定裕度和工程约束的 D - J 可行域。思路如图9所示。

对于给定 SCR，分别构建三个候选集合。基

于 VSG 有功闭环小信号模型，以阻尼比 0.707 作为动态性能约束，得到满足有功响应要求的参数集合： $\Omega_1(SCR) = (D, J) | \zeta(D, J, SCR) = 0.707$ 。选取 $d_{min} > 0.5$ 作为稳定裕度约束，得到稳定约束下的参数集合： $\Omega_2(SCR) = (D, J) | d_{min} > 0.5$ 。最后，为避免虚拟惯量 J 过小导致 VSG 惯量支撑能力不足，引入工程约束： $\Omega_3(SCR) = (D, J) | J > 0.1$ 。综合上述三个约束，不同 SCR 下的最终可行域定义为： $\Omega^*(SCR) = \Omega_1(SCR) \cap \Omega_2(SCR) \cap \Omega_3(SCR)$ 。将 SCR 取整数作为离散节点，按照上述方法分别构建各整数 SCR 对应的 D - J 可行域。

2.2 在线自适应参数调用

在线运行过程中，SCR 需要根据电网状态实时获取。可采用文献[14]提出的基于谐波注入的电网阻抗辨识方法，为降低电网背景谐波影响，每次辨识仅在短时窗口内向电压指令注入小幅值 75 Hz 非特征频率电压扰动，采用 25 Hz 作为傅里叶分析基频，利用对应频率下的电压、电流响应计算电网阻抗，并进一步换算得到工频阻抗。SCR 辨识触

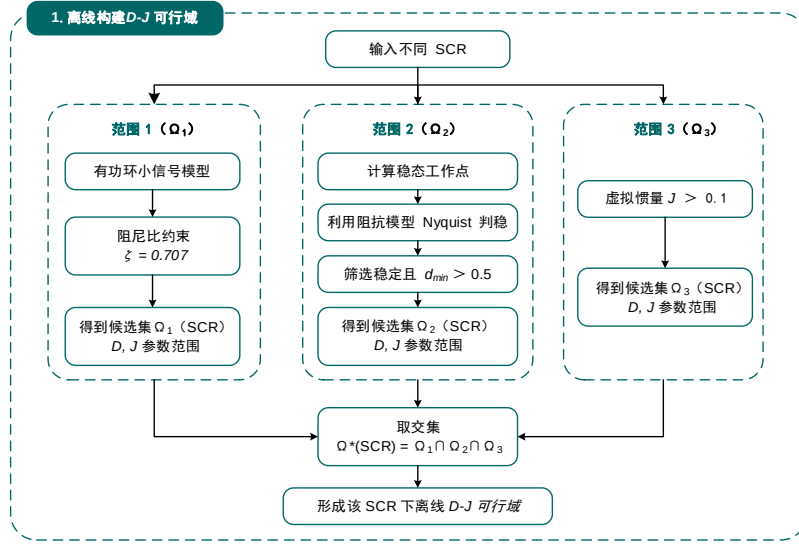


图 9 不同SCR下离线D-J可行域构建流程图

Fig. 9 Flowchart for constructing the offline D-J feasibility region under different short-circuit ratios

发周期设为 1 s，辨识完成后立即撤除扰动。辨识得到的SCR按照四舍五入原则映射至最近的整数SCR节点，并调用该节点对应的D-J可行域进行参数选择。D、J参数仅在辨识结果映射后对应的SCR离散节点发生变化时更新，更新频率不超过1

次/s；若辨识误差未引起映射节点变化，则不影响D、J参数的选择。

在线运行时，自适应参数调用流程见图 10 所示。

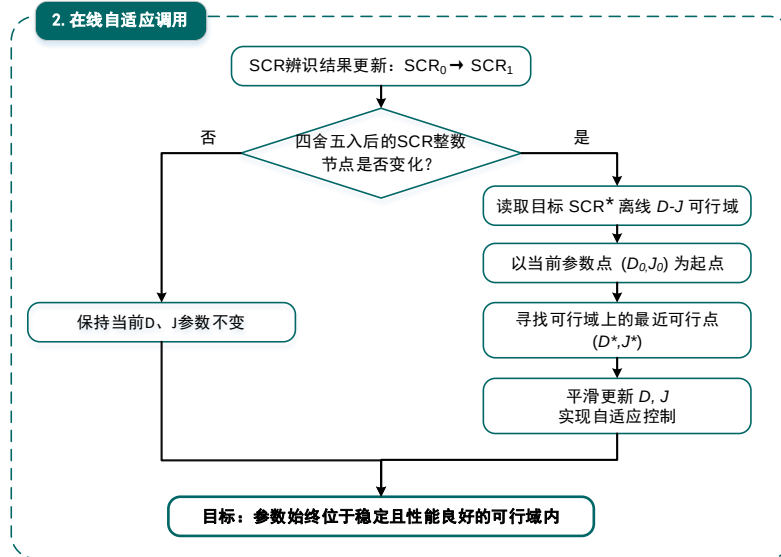


图 10 不同SCR下在线自适应参数调用流程图

Fig. 10 Flowchart of the Online Adaptive Parameter Retrieval Process for Different Short-Circuit Ratios

设系统原短路比为 SCR_0 ，原运行参数为 (D_0, J_0) 。当检测到四舍五入后的SCR整数节点发生变化后，控制器读取目标短路比 SCR^* 对应的离线可行域 $\Omega^*(SCR^*)$ 。为避免D、J大幅跳变，降低参数切换对系统动态过程的影响，以当前参数点 (D_0, J_0)

为起点，在目标可行域内寻找距离 (D_0, J_0) 最近的点作为目标可行点，记为 (D^*, J^*) 。其选取方式见式 (15)。

$$(D^*, J^*) = \arg \min_{(D, J) \in \Omega^*(SCR_1)} \left[\left(\frac{D - D_0}{D_N} \right)^2 + \left(\frac{J - J_0}{J_N} \right)^2 \right] \quad (15)$$

式中, D_N 和 J_N 分别为阻尼系数和虚拟惯量的归一化基准值, 用于消除两类参数量纲和数值尺度差异对距离计算的影响。系统中 D 和 J 取值与变流器额定容量密切相关, 对于500 kW等级VSG型构网储能系统, 以系统运行于SCR=10工况参数为基准, 取 $D_N=50$ 、 $J_N=1.5$ 。

由于阻尼系数 D 和虚拟惯量 J 直接作用于VSG有功环, 若参数在短时间内突变, 可能引起有功功率和输出频率的暂态冲击^[25-26]。因此, 在得到目标可行点(D^* , J^*)后, 采用一阶惯性环节对参数进行平滑更新, 如式(16)所示。

$$\begin{cases} \dot{D} = \frac{D^* - D}{T_D} \\ \dot{J} = \frac{J^* - J}{T_J} \end{cases} \quad (16)$$

式中, T_D 和 T_J 分别为阻尼系数和虚拟惯量的平滑时间常数。

在线自适应调用过程不需要在线实时扫频判稳, 也不需要进行复杂参数优化, 只需基于离线建立的 D - J 可行域完成查表和参数迁移。由此可保证 D 、 J 始终位于目标SCR下稳定且动态性能较好的可行域内, 提高VSG型构网储能对不同电网强度的适应能力。

3 仿真分析

为验证所提不同SCR下VSG型构网储能阻尼-惯量自适应控制策略的有效性, 在MATLAB/Simulink中搭建VSG并网仿真模型。系统主电路参数和控制参数与表1保持一致。仿真中设置固定参数VSG和自适应参数VSG两种控制方式进行对比。

设置系统初始运行在SCR=10条件下, 初始参数为 $D=50$ 、 $J=1.5$ 。在1.5s时, SCR由10切换为2。图11给出了该工况下的有功功率 P_e 响应。可以看出, SCR降低后, 固定参数VSG的有功输出出现明显振荡, 说明原强网参数在弱网下适应性不足; 而自适应VSG根据SCR=2对应的可行域, 将参数平滑调整至 $D=106.45$ 、 $J=0.4$, 改善了有功功率响应, 保证了系统稳定。

图12给出了 D 、 J 的自适应变化过程。SCR变化后, 阻尼系数 D 由50平滑上升至106.45, 虚拟惯量 J 由1.5平滑下降至0.4。

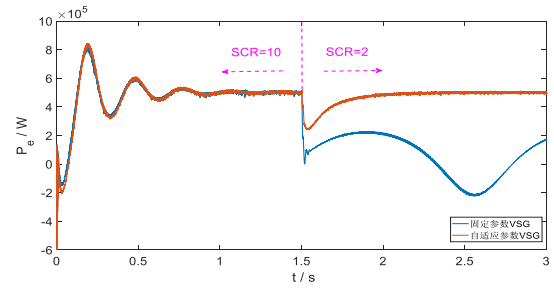


图11 SCR=10切换至SCR=2时有功响应 P_e 对比
Fig. 11 Comparison of active power response P_e when switching from SCR=10 to SCR=2

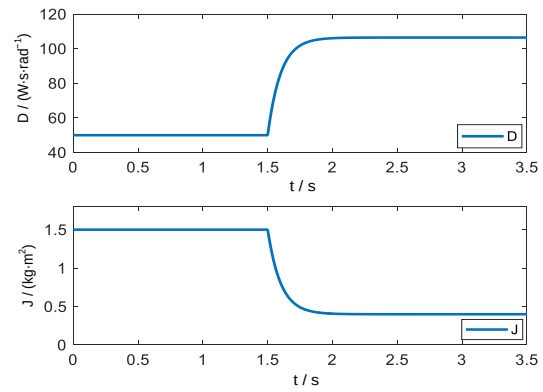


图12 SCR=10切换至SCR=2过程中 D 、 J 自适应变化过程
Fig. 12 Adaptive behavior of D and J during the transition from SCR=10 to SCR=2

为进一步验证所提方法对有功指令动态响应的改善效果, 设置系统初始运行于SCR=10, 并在1.5s时将SCR切换为5。结合图7可知, SCR切换后, 固定参数VSG的 D 、 J 参数仍位于SCR=5对应的稳定区域内, 因此系统未发生失稳。然而, 该参数点并不一定能够获得较优的有功动态响应。对此, 自适应VSG根据SCR=5对应的离线 D - J 可行域, 将参数平滑调整至 $D=91.3$ 、 $J=0.6$ 。在2.5s时加入有功指令阶跃, 图13给出了固定参数VSG与自适应VSG的有功阶跃响应对比。结果表明, 固定参数VSG在阶跃后存在较大的超调和振荡, 而所提自适应策略使有功响应更加平滑, 显著减小超调量, 加快了振荡衰减速度。

4 结论

针对不同SCR下VSG型构网储能固定阻尼系数 D 和虚拟惯量 J 难以同时兼顾动态响应与并网稳定裕度的问题, 提出了一种基于离线 D - J 可行域的

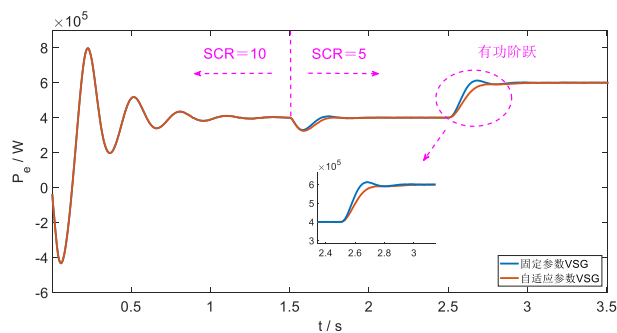


图 13 SCR=10 切换至 SCR=5 后有功阶跃响应 P_e 对比
Fig. 13 Comparison of active step responses P_e after switching from SCR=10 to SCR=5

自适应控制方法。通过理论分析和仿真验证, 结论如下:

(1) 基于 VSG 有功环小信号模型表明, 增大阻尼系数 D 能够提高系统阻尼, 有利于抑制有功功率振荡并减小超调; 而虚拟惯量 J 增大虽可增强惯量支撑能力, 但会降低系统阻尼比和自然振荡频率, 使有功响应变慢, 振荡衰减能力减弱。

(2) 基于 dq 输出阻抗模型的稳定性分析表明, 随着 SCR 降低, D 、 J 参数稳定区域逐渐收缩, 固定参数 VSG 难以适应不同电网强度下的稳定运行要求。

(3) 仿真结果表明, 当 SCR 由 10 降至 2 时, 固定参数 VSG 出现明显低频振荡, 而所提方法将 D 、 J 平滑调整至目标可行域内, 有效减小功率波动; 在 SCR=10 切换至 SCR=5 后的有功指令阶跃工况下, 自适应 VSG 具有更小的超调量和更快的振荡衰减速度。所提方法能够有效适应 SCR 变化, 在保证系统稳定运行的同时改善有功动态响应。

参考文献

[1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. "双高"电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE X R, HE J B, MAO H Y, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.

[2] Xiong L, Liu X, Liu Y, et al. Modeling and stability issues of voltage-source converter-dominated power systems: A review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(6): 1530-1549.

[3] 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): 590-604.
CHI Y N, JIANG B W, HU J B, et al. Grid-forming converters: physical essence and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 590-604.

[4] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277-297.
LIU H, YU S Q, SUN D W, et al. Review on control technology and principle of grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-297.

[5] 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 C J, WU H, WANG X F, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.

[6] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
LV Z P, SHENG W X, ZHONG Q C, et al. Virtual synchronous generator and its applications in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.

[7] 刘辉, 高舜安, 孙大卫, 等. 光伏虚拟同步发电机并网小信号稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 417-424.
LIU H, GAO S N, SUN D W, et al. Small-signal stability analysis of grid-connected photovoltaic virtual synchronous generator[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(2): 417-424.

[8] 温春雪, 陈丹, 胡长斌, 等. 微网逆变器的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 120-126, 183.
WEN C X, CHEN D, HU C B, et al. Adaptive control of virtual inertia and damping coefficient for VSG in microgrid inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 120-126, 183.

[9] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.
WU H, RUAN X B, YANG D S, et al. Modeling and parameter design of the power loop for virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.

[10] 陈建荣, 赵波, 赵炳洋. 考虑多控制环路影响的 VSG 型构网储能 dq 阻抗建模及稳定性分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 222-239.
CHEN J R, ZHAO B, ZHAO B Y. Modeling and stability analysis of energy storage dq impedance of VSG-type configuration network considering the influence of multiple control loops[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(1): 222-239.

[11] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.

[12] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.
CHENG C, YANG H, ZENG Z, et al. Adaptive control method of rotor inertia for virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.

[13] 任碧莹, 邱姣姣, 刘欢, 等. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自调节优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 128-138.
REN B Y, QIU J J, LIU H, et al. Self-tuning optimal control strategy for parameters of parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 128-138.

- [14] 张骞, 李征, 蔡旭, 等. 一种电网强度在线感知的自适应虚拟同步控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 117-125.
ZHANG Q, LI Z, CAI X, et al. Adaptive virtual synchronous control strategy based on online grid-strength perception[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 117-125.
- [15] 李新宁. 虚拟同步发电机阻抗建模与弱电网适应性优化[D]. 山东大学, 2023.
LI X N. Impedance modeling and weak-grid adaptability optimization of virtual synchronous generators[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [16] 闫来清, 张媛媛, 朱介北, 等. 鲸鱼优化算法整定的VSG惯量-阻尼协同自适应控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2026.
YAN L Q, ZHANG Y Y, ZHU J B, et al. Whale optimization algorithm based adaptive coordinated inertia-damping control strategy for virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2026.
- [17] 杨效, 曾成碧, 苗虹, 等. 优化虚拟同步发电机惯量和阻尼的自适应控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 495-504.
YANG X, ZENG C B, MIAO H, et al. Adaptive control strategy for optimizing inertia and damping of virtual synchronous generators[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(11): 495-504.
- [18] Zhong Q C, Weiss G. Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [19] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [20] 王伟岸, 张鹏凯, 吕敬, 等. 基于VSG的构网型光伏逆变器阻抗建模与稳定性分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(10): 1573-1585.
WANG W A, ZHANG P K, LV J, et al. Impedance modeling and stability analysis of VSG-based grid-forming photovoltaic inverters[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(10): 1573-1585.
- [21] 陈新, 王赞程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094.
CHEN X, WANG Y C, GONG C Y, et al. Review of stability studies on grid-connected inverters based on impedance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.
- [22] Pogaku N, Prodanovic M, Green T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [23] 涂春鸣, 高家元, 赵晋斌, 等. 弱电网下具有定稳定裕度的并网逆变器阻抗重塑分析与设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1327-1335.
TU C M, GAO J Y, ZHAO J B, et al. Impedance reshaping analysis and design of grid-connected inverters with specified stability margins under weak grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1327-1335.
- [24] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
XIN H H, DONG W, YUAN X M, et al. Generalized short-circuit ratio for power-electronics-dominated multi-infeed power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [25] 宋琼, 张辉, 孙凯, 等. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 412-424.
SONG Q, ZHANG H, SUN K, et al. Improved adaptive virtual inertia control for virtual synchronous generators in autonomous microgrids with multiple distributed sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 412-424.
- [26] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5724-5731.
CHEN L J, WANG R, ZHENG T W, et al. Optimal transient response control of virtual synchronous generators based on adaptive parameter adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731.

附录

矩阵符号	详细表达式
$\mathbf{G}_1$	$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} R_f + sL_f & -\omega L_f \\ \omega L_f & R_f + sL_f \end{bmatrix}$
$\mathbf{G}_2$	$\mathbf{G}_2 = \frac{U_{dc}}{(\omega L_f)^2 + (L_f s + R_f)^2} \mathbf{G}_1$
$\mathbf{G}_3$	$\mathbf{G}_3 = \frac{1}{(\omega L_f)^2 + (L_f s + R_f)^2} \mathbf{G}_1 - \begin{bmatrix} sC & -\omega C \\ \omega C & sC \end{bmatrix}$
$\mathbf{G}_4$	$\mathbf{G}_4 = -\frac{1.5}{s\omega_0(D + Js)} \begin{bmatrix} i_d & i_q \\ i_d & i_q \end{bmatrix}$
$\mathbf{G}_5$	$\mathbf{G}_5 = -\frac{1.5}{s\omega_0(D + Js)} \begin{bmatrix} u_d & u_q \\ u_d & u_q \end{bmatrix}$
$\mathbf{G}_6$	$\mathbf{G}_6 = -1.5D_1 \begin{bmatrix} -i_q & i_d \\ -i_q & i_d \end{bmatrix}$
$\mathbf{G}_7$	$\mathbf{G}_7 = -1.5D_1 \begin{bmatrix} u_q & -u_d \\ u_q & -u_d \end{bmatrix}$
$\mathbf{G}_8$	$\mathbf{G}_8 = \begin{bmatrix} -R_v H_i H_u - K_q u_q H_u H_i - H_i & \omega L_v H_u H_i + K_q u_d H_u H_i - \omega L \\ \omega L - \omega L_v H_i H_u & -R_v H_i H_u - H_i \end{bmatrix}$
$\mathbf{G}_9$	$\mathbf{G}_9 = \begin{bmatrix} K_q i_q H_u H_i - \omega^2 LC - sCH_i - H_u H_i + 1 & -\omega sLC - K_q i_d H_u H_i \\ \omega sLC & H_u H_i - \omega^2 LC - sCH_i + 1 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}_i$ 、 $\mathbf{M}_u$ 、 $\mathbf{M}_d$	$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} i_q & 0 \\ 0 & -i_d \end{bmatrix}$ 、 $\mathbf{M}_u = \begin{bmatrix} u_q & 0 \\ 0 & -u_d \end{bmatrix}$ 、 $\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} -d_q & 0 \\ 0 & d_d \end{bmatrix}$
$\mathbf{G}_{10}$	$\mathbf{G}_{10} = \frac{1}{U_{dc}} (\mathbf{G}_9 + \mathbf{G}_8 \mathbf{M}_i \mathbf{G}_4 + \mathbf{G}_9 \mathbf{M}_u \mathbf{G}_4) + \mathbf{M}_d \mathbf{G}_4$
$\mathbf{G}_{11}$	$\mathbf{G}_{11} = \frac{1}{U_{dc}} (\mathbf{G}_8 + \mathbf{G}_8 \mathbf{M}_i \mathbf{G}_5 + \mathbf{G}_9 \mathbf{M}_u \mathbf{G}_5) + \mathbf{M}_d \mathbf{G}_5$