

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240824

基于VSG的储能变流器JDL协调控制策略

吴卓, 李自成, 刘江, 王鑫舟, 廖小兵

(武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 传统的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略通过调节转动惯量和阻尼系数抑制功率振荡, 但传统控制策略中功率振荡的抑制效果和系统动态性能之间存在矛盾。为抑制VSG的功率振荡, 提升系统的功率响应速度, 提出了一种基于虚拟转动惯量 J 、虚拟阻尼 D 和虚拟电感 L 的JDL协调自适应控制策略。首先, 分析了虚拟转动惯量 J 、虚拟阻尼 D 和虚拟电感 L 对虚拟同步发电机控制系统阻尼的影响。然后, 用VSG输出功率差额、输出功率变化率和电网角频率差额3个参数代替传统控制策略中的角频率差额和角频率变化率, 并基于这3个参数和功率振荡曲线制定了JDL的自适应控制规则。最后, 通过Simulink仿真, 将所提的JDL协调自适应控制策略与传统参数自适应控制策略和模糊自适应控制策略进行对比研究, 验证了该控制策略抑制系统功率振荡和提升动态性能的有效性及其适用性。

关键词: 虚拟同步发电机; 协调自适应; 虚拟阻尼; 虚拟电感; 功率振荡抑制

VSG-based coordinated JDL control strategy for energy storage converters

WU Zhuo, LI Zicheng, LIU Jiang, WANG Xinzhou, LIAO Xiaobing

(School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: Traditional virtual synchronous generator (VSG) control strategies suppress power oscillations by adjusting inertia and damping coefficients. However, there is a trade-off between power oscillation suppression and system dynamic performance in conventional control strategies. To address this issue, a coordinated JDL adaptive control strategy based on virtual inertia J , virtual damping D , and virtual inductance L is proposed to suppress VSG power oscillations and enhance power response speed. First, the influence of J , D , and L on the damping characteristics of the VSG control system is analyzed. Then, instead of using the conventional frequency deviation and frequency deviation rate, three parameters, i.e., VSG output power deviation, output power change rate, and grid frequency deviation, are introduced. Based on these three parameters and power oscillation curve, JDL adaptive control rules are formulated. Finally, Simulink simulations are conducted to compare the proposed coordinated JDL adaptive control strategy with traditional parameter adaptive control and fuzzy adaptive control strategies. The results verify the effectiveness and applicability of the proposed control strategy in suppressing power oscillations and improving dynamic performance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107122).

Key words: virtual synchronous generator; coordination adaptive; virtual damping; virtual inductance; power oscillation suppression

0 引言

近年来, 为应对能源需求、环境污染和气候变化等全球性挑战, 风力和光伏发电作为清洁的可再生能源得到了广泛的关注, 许多国家实施政策促进

风力和光伏的发展^[1-3], 但随着越来越多的可再生能源接入电网, 电网的稳定性受到了巨大的影响。传统的火力和水力发电通过电能和转子动能相互转化的方式为系统提供惯性, 进而维持电网频率稳定, 但新能源发电通过电力电子装置并入电网, 并网逆变器具有惯性小的特性, 难以为电网提供必要的功率和频率支撑。

为解决虚拟同步发电机惯性小、稳定性差和功

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107122); 武汉市重点研发计划项目资助(2023010402010584)

率振荡等问题,相关学者提出了不同的方案。第一类是通过调节虚拟转动惯量、虚拟阻尼和虚拟阻抗参数,进而抑制虚拟同步发电机的功率振荡。文献[4-6]提出了一种基于自适应虚拟惯量的虚拟同步发电机控制方法,有效抑制了功率振荡。文献[7]通过平滑调节转动惯量抑制功率振荡,同时减小了噪声对系统的影响。文献[8]通过模糊推理动态调整虚拟惯量和阻尼系数,实现两者的协调控制。文献[9]在传统模糊控制的基础上,提出了更精细的转动惯量和阻尼控制的模糊规则。文献[10]提出了一种基于径向基函数神经网络的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)转动惯量和阻尼系数协同控制策略,通过人工智能算法改进传统控制策略。文献[11]采用动态虚拟阻抗提升系统的暂态阻尼,进而抑制功率振荡。文献[12]提出了一种适用于多VSG并网的自适应虚拟阻抗算法,通过调节虚拟阻抗提升多虚拟同步发电机频率响应的一致性,进而抑制虚拟同步发电机之间的功率交互振荡。文献[13]通过在传统控制策略的基础上增加额外的虚拟阻尼和阻抗,抑制功率振荡。文献[14]在控制策略中引入角频率偏差量和功率偏差量,减少了角频率噪声对系统的干扰,同时有效抑制了系统的功率振荡。上述方法通过增加系统的暂态阻尼,一定程度上抑制功率振荡,但也降低了系统功率响应的速度。第二类是通过增加多台虚拟同步发电机之间的阻尼抑制功率的交互振荡,文献[15]提出了一种虚拟动态互阻尼控制方法,通过在各VSG中引入附加互阻尼转矩,缩小各VSG虚拟转矩和角速度的差距,从而抑制系统暂态过程中的功率振荡。文献[16]设计了自阻尼和互阻尼控制器,以抑制并联VSG功率的低频交互振荡。文献[17]提出了一种分散互阻尼控制方法,抑制多VSG电网中的功率振荡。这一类控制策略对多机并联系统的抑制效果较好,但系统处于单机运行时无法达到较好的抑制效果。第三类是通过补偿控制等方法提升系统的阻尼,进而达到抑制功率低频振荡的目的。文献[18]提出了一种并联功率指令微分项的方法提升系统暂态阻尼抑制功率振荡。文献[19]通过在常规VSG有功控制环中加入角频率和电磁功率的高频分量来增强系统暂态阻尼。文献[20]调整二阶虚拟惯性算法中一阶微分补偿环节和一阶惯性环节在功率外环前向通道的位置,提出了二阶虚拟惯性优化控制策略。文献[21]提出了在VSG控制策略中加入暂态前馈补偿和暂态反馈补偿的2种改进策略,有效抑制了VSG的有功振荡。这一类控制策略普遍采用增加系统暂态阻尼的方法

抑制功率振荡,虽对功率振荡的抑制有一定的效果,但忽略了系统阻尼对功率响应速度的影响。

传统的基于VSG的并网逆变器的功率稳定性和动态性能之间存在矛盾^[22]。为抑制虚拟同步发电机的功率振荡,同时提升虚拟同步发电机功率响应的动态性能,本文提出一种基于虚拟转动惯量、虚拟阻尼和虚拟电感的JDL协调控制策略,并通过理论分析和对比仿真实验验证了该控制策略的有效性和适用性。

1 虚拟同步发电机工作原理

图1为虚拟同步发电机总体结构图,系统主电路由直流电源 U_{dc} 、三相逆变桥臂和LCL滤波器组成,其中LCL滤波器由LC滤波器的 L_1 、 C 以及线路电感 L_2 共同组成。控制电路主要由功率外环、电压电流双闭环和PWM调制部分组成。

VSG的虚拟调速器通过模拟同步发电机转子动态模型的运动方程实现,由同步发电机运动方程的二阶模型、功率与转矩的关系,可得

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

式中: T_m 为输入的机械转矩; T_e 为输出的电磁转矩; P_m 为输入的机械功率; P_e 为输出的电磁功率; J 为转动惯量; D_p 为有功下垂系数,即虚拟阻尼; θ 为VSG输出电压的相角; ω 为VSG输出电压的角频率; ω_n 为额定角频率; $\Delta\omega$ 为VSG输出电压角频率与电网电压角频率的差额。

当系统处于稳态时,电网的电压角频率与VSG输出电压的角频率差距较小,因此 ω 可近似于 ω_n ,整理式(1)可得VSG的转子运动方程。

$$P_{set} + D_p(\omega_n - \omega) - P_e = J\omega_n \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2)$$

式中, P_{set} 为有功功率给定值。同步发电机励磁调节器的闭环控制方程如式(3)所示。

$$i_f = G_{(s)}(U_{ref} - U_o) \quad (3)$$

式中: i_f 为励磁电流; U_{ref} 为输出参考电压; U_o 为同步发电机输出端口的电压; $G_{(s)}$ 为励磁控制器的调节器。

为使VSG具有与同步发电机相同的一次调压功能,VSG采用了虚拟励磁调节器,其数学模型如式(4)所示。

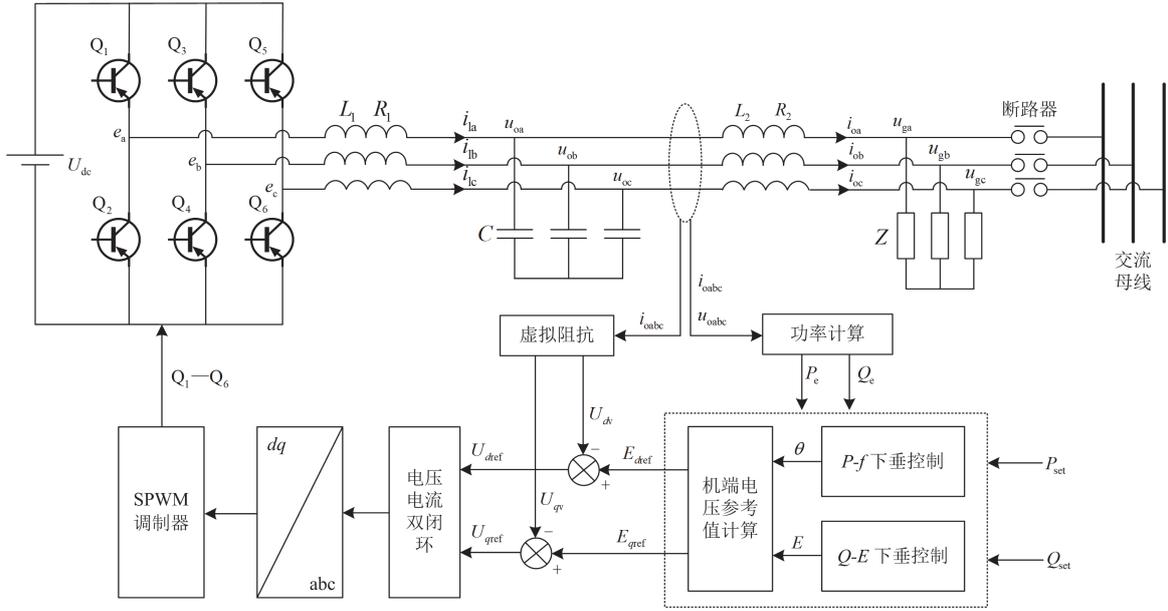


图 1 VSG 总体结构图

Fig. 1 General structure diagram of VSG

$$E_{ref} = U_n + \frac{1}{D_q}(Q_{set} - Q_c) \quad (4)$$

式中： E_{ref} 为机端电压的参考值； U_n 为虚拟同步发电机输出电压的额定值； D_q 为无功下垂系数； Q_{set} 为无功功率的给定值； Q_c 为 VSG 输出的无功功率。为实现电压的无差控制，需在无功电压下垂控制环节中加入积分环节，调整后得到的励磁控制器的闭环控制方程为

$$i_f = \frac{1}{K_S}[D_q(U_n - U_o) + (Q_{set} - Q_c)] \quad (5)$$

式中： K 为电压控制器的积分系数； s 为拉普拉斯算子。

由式(1)和式(5)可知：VSG 的有功环和无功环分别模拟了同步发电机的一次调频和一次调压功能。VSG 功率环路采用下垂控制，其输出经过一次调频和调压后得到电压参考值，将其进行 park 变换得到参考电动势 E_{dref} 和 E_{qref} ，再将其减去虚拟阻抗上的压降，得到电压电流双闭环的给定值，最后，电压电流双闭环的输出经 PWM 调制器调制后作为 VSG 逆变桥臂 6 开关管的驱动信号，完成功率环路的闭环控制。

2 VSG 功率振荡分析及抑制策略

2.1 VSG 虚拟惯量和阻尼对有功响应的影响

当线路阻抗为感性时，VSG 在半个工频周期内输出的平均有功和无功功率^[23]为

$$P_e = \frac{3U_o U_g}{X_s} \sin \delta \quad (6)$$

$$Q_c = \frac{3(U_o - U_g \cos \delta)U_o}{X_s} \quad (7)$$

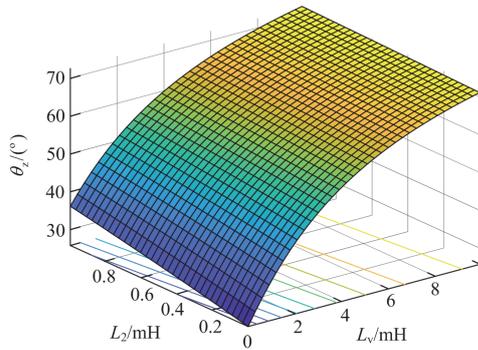
式中： U_g 为电网电压； δ 为 VSG 输出电压的功角； X_s 为 VSG 的总输出阻抗。VSG 输出电压的功角为逆变器频率与公共交流母线频率差值的积分，如式(8)所示。

$$\delta(s) = \frac{\omega(s) - \omega_n(s)}{s} \quad (8)$$

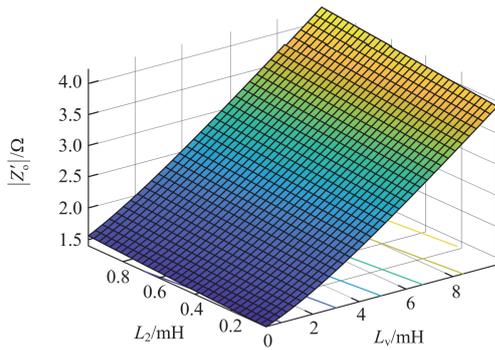
结合式(6)和式(8)可知，VSG 输出功率的变化可以由输出电压角频率 ω 的变化来反映。当 VSG 的功率指令从 P_1 上升至 P_2 时，其角频率振荡和功率振荡的曲线如图 2 所示。VSG 功率振荡的一个周期可以划分为 4 个阶段，阶段 1 电磁功率小于给定功率，此时角频率和功角增大，到达 b 点时电磁功率等于给定功率，但此时输出角频率大于额定角频率；阶段 2 功角继续增大，VSG 输出电压角频率逐渐减小，此时电磁功率大于给定功率，直至到达 c 点，在 c 点，输出角频率等于额定频率，但电磁功率仍然大于功率给定值，VSG 输出电压角频率继续减小；VSG 处于阶段 3 时，VSG 输出角频率小于额定频率，电磁功率与给定功率的差值逐渐缩小，直至 d 点，d 点处 VSG 输出功率等于给定功率，但此时 VSG 输出电压的角频率小于额定值；阶段 4 角频率逐渐上升，功角也随之增大，电磁功率逐渐减小，直至 e 点完成一个振荡周期。

式中： R_2 为线路电阻； L_2 为线路电感。

当线路电感 L_2 取1mH，虚拟电阻 R_v 取 0Ω ，电压环比例系数 k_p 取0.7，电压环积分系数 k_i 取30， G_1 的比例系数取20， L_1 取3.8mH， C 取 $11.8\mu\text{F}$ 时，可得工频下虚拟电感 L_v 、线路电感 L_2 与输出阻抗角 θ_z 和输出阻抗模值的关系，如图5所示。



(a) L_v 和 L_2 与输出阻抗角的关系



(b) L_v 和 L_2 与输出阻抗幅值的关系

图5 L_v 和 L_2 与输出阻抗对应关系图

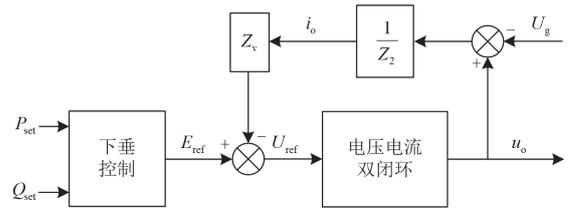
Fig. 5 L_v and L_2 corresponding to the output impedance

由图5可知，虚拟电感和线路电感对输出阻抗的作用相同，加入虚拟阻抗可以显著提升输出阻抗角，进而降低有功和无功的耦合程度，但虚拟阻抗过大会导致电压电流双闭环输出的PWM调制波幅值与期望值的差值过大，不利于系统对功率的调节及其稳定运行，因此虚拟阻抗的取值不宜过大。

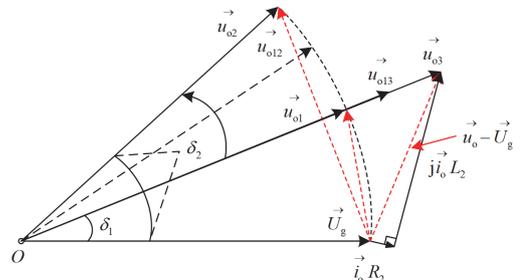
虚拟电感的加入虽能减小系统功率耦合的程度，但也为系统增加了额外的阻尼，其作用机理如图6所示。

当有功功率给定值 P_{set} 增大时，VSG功率环输出的机端参考电压 E_{ref} 的相角增大，在该功率指令下，VSG的输出电压理论终值为 u_{o2} ，但在调整过程中，并网线路上的压降逐渐变大，其输出电流 i_o 也

逐渐增大，虚拟阻抗上的压降也随之增加。电压电流双闭环的输出参考电压 U_{ref} 小于期望值，VSG输出电压处于 u_{o1} 与 u_{o2} 之间的 u_{o12} ，虽然功率外环通过调节 E_{ref} 的相位可以达到有功的无差调节，但相较无虚拟阻抗的VSG控制策略，其 E_{ref} 需要调节的相位更大，所需的调节时间也更长。同理，当无功功率指令增加时，VSG功率环输出电压 E_{ref} 的幅值增大，在该无功指令下，VSG的输出电压理论终值为 u_{o3} ，但在调整过程中，并网线路上的压降逐渐变大，其输出电流 i_o 也逐渐增大，虚拟阻抗上的压降也逐随之增加。电压电流双闭环的电压给定值 U_{ref} 小于期望值，在此工况下VSG输出电压处于 u_{o1} 和 u_{o3} 之间的 u_{o13} ，虽在功率外环的调节下可以实现无功的无差调节，但相较无虚拟阻抗的VSG控制策略，其 E_{ref} 需要调节的幅值更大，调节时间也更长。同理，有功和无功功率指令减小时亦然。



(a) 含虚拟阻抗 Z_v 的VSG控制结构图



(b) 含虚拟阻抗 Z_v 的VSG输出电压矢量图

图6 虚拟阻抗 Z_v 的阻尼作用机理图

Fig. 6 Damping mechanism diagram of virtual impedance Z_v

综上，虚拟阻抗的引入能够有效抑制输出电压的相位和幅值变化速率。因此，可以通过调节虚拟阻抗来抑制功率振荡并优化系统的动态性能。

2.3 JDL 协调控制策略

VSG的转动惯量 J 、虚拟阻尼 D_p 和虚拟电感 L_v 对系统的阻尼均有较大的影响，且3个虚拟参数均有较大可行域。在此基础上，本文提出一种基于虚拟转动惯量、虚拟阻尼和虚拟电感的JDL协同自适应

应控制策略, 用于抑制 VSG 的功率振荡, 提升系统的动态性能。

传统的 VSG 功率振荡抑制策略普遍采用增加系统暂态阻尼的方案, 虽然可以抑制系统的功率振荡, 但整个调整时间会变慢, 系统的动态性能较差, 本文提出的协调自适应控制策略在传统的控制基础上引入功率差额、功率变化率和电网角频率差额 3 个参考变量, 并将功率的调节过程分为 6 个阶段, 如图 7 所示。

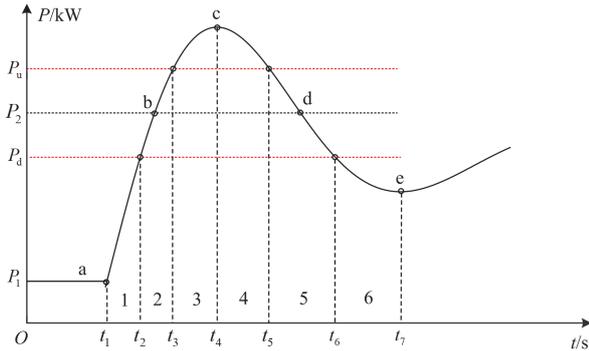


图 7 协同自适应功率振荡阶段图

Fig. 7 Phase diagram of cooperative adaptive power oscillation

图 7 中: P_u 、 P_d 分别为功率参考的阈值上下限; $t_1 - t_7$ 为 6 个阶段分界点的时间。图中阶段 1 和阶段 4 系统处于输出功率向稳态值调整的过程, 此时 VSG 输出功率与稳态值之间有较大差额, 应减小系统阻尼; 当系统处于阶段 2 和阶段 5 时, VSG 的输出功率与稳态功率的差值较小, 此时应增大系统的阻尼, 防止功率超调; 阶段 3 和阶段 6 时 VSG 输出功率差值逐渐增大, 应增大系统阻尼, 抑制功率超调的幅值。以额定容量为 10 kVA 的 VSG 为例, 本文提出的协同自适应控制策略为

$$P_u = \begin{cases} 1.05P'_{\text{set}} + \Delta P_{\omega}, & (1.05P'_{\text{set}} \geq P'_{\text{set}} + \Delta P_s) \\ P'_{\text{set}} + \Delta P_{\omega} + \Delta P_s, & (1.05P'_{\text{set}} < P'_{\text{set}} + \Delta P_s) \end{cases} \quad (17)$$

$$P_d = \begin{cases} 0.95P'_{\text{set}} + \Delta P_{\omega}, & (0.95P'_{\text{set}} \leq P'_{\text{set}} - \Delta P_s) \\ P'_{\text{set}} + \Delta P_{\omega} - \Delta P_s, & (0.95P'_{\text{set}} > P'_{\text{set}} - \Delta P_s) \end{cases} \quad (18)$$

式中: ΔP_{ω} 为一次调频的功率增量; P'_{set} 为修正后的功率指令; ΔP_s 为 VSG 稳态下输出功率低频振荡的幅值。虚拟阻抗直接作用于电压电流双闭环, 相较于作用于功率外环的虚拟阻尼和虚拟转动惯量, 虚拟阻抗对系统输出功率的响应影响较快, 虚拟转动惯量和虚拟阻尼频繁调节不利于虚拟阻抗的调节, 同时, 为实现系统阻尼的快速调节, 本文的虚拟阻尼和虚拟转动惯量采用式(19)和式(20)的控制方式。

$$D_{p1} = \begin{cases} D_{p0}, & (t_1 \leq t < t_2, |dP_e| > T_d) \\ D_{p0}, & (t_2 \leq t < t_3) \\ 1.5D_{p0}, & (t_3 \leq t < t_4, |dP_e| > T_d) \\ 1.5D_{p0}, & (t_4 \leq t < t_5, |dP_e| > T_d) \\ D_{p0}, & (t_5 \leq t < t_6) \\ 1.5D_{p0}, & (t_6 \leq t < t_7, |dP_e| > T_d) \end{cases} \quad (19)$$

$$J_1 = \begin{cases} \frac{1}{3}J_0, & (t_1 \leq t < t_2, |dP_e| > T_d) \\ J_0, & (t_2 \leq t < t_3) \\ \frac{4}{3}J_0, & (t_3 \leq t < t_4, |dP_e| > T_d) \\ \frac{1}{3}J_0, & (t_4 \leq t < t_5, |dP_e| > T_d) \\ J_0, & (t_5 \leq t < t_6) \\ \frac{4}{3}J_0, & (t_6 \leq t < t_7, |dP_e| > T_d) \end{cases} \quad (20)$$

式中: D_{p0} 为 VSG 的初始阻尼系数; D_{p1} 为自适应控制器输出的阻尼系数; J_0 为 VSG 的初始转动惯量; J_1 为自适应控制器输出的转动惯量; T_d 为虚拟阻尼和转动惯量的动作阈值。

为使系统阻尼的变化更加平滑, 自适应控制器输出的阻尼系数 D_{p1} 和转动惯量 J_1 需级联低通滤波器, 实现系统阻尼的连续调节, 虚拟阻尼、虚拟转动惯量的终值表示为

$$D_p = D_{p1} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0 + s} \quad (21)$$

$$J = J_1 \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0 + s} \quad (22)$$

虚拟电感的控制策略如式(23)一式(29)所示。

$$L_{v1} = \begin{cases} \frac{P_e}{P_{\text{set}}} L_{v0}, & (t_1 \leq t < t_2, |dP_e| > T_d) \\ L_{v0} + k_2 |P_e - P_{\text{set}}|, & (t_2 \leq t < t_3) \\ \frac{P_e}{P_{\text{set}}} L_{v0} + k_1 \frac{dP_e}{dt}, & (t_3 \leq t < t_4, |dP_e| > T_d) \\ L_{v0} + k_1 \frac{dP_e}{dt}, & (t_4 \leq t < t_5, |dP_e| > T_d) \\ L_{v0} + k_2 |P_e - P_{\text{set}}|, & (t_5 \leq t < t_6) \\ \frac{P_e}{P_{\text{set}}} L_{v0} + k_1 \frac{dP_e}{dt}, & (t_6 \leq t < t_7, |dP_e| > T_d) \end{cases} \quad (23)$$

$$L_{v0} = L_{\text{base}} \cdot \left(1 + \frac{|\omega_n - \omega_g|}{2\pi}\right) \quad (24)$$

$$P'_{set} = P_{set} + D_p(\omega_n - \omega_g) \quad (25)$$

$$L_{v2(n)} = \begin{cases} L_{v2(n-1)}, (t_1 \leq t < t_2) \\ L_{v2(n-1)} + \Delta L_1, (t_2 \leq t < t_3, |dP_c| > T_d) \\ L_{v2(n-1)} - \Delta L_2, (t_2 \leq t < t_3, |dP_c| < T_d) \\ L_{v2(n-1)} + \Delta L_1, (t_3 \leq t < t_4) \\ L_{v2(n-1)}, (t_4 \leq t < t_5) \\ L_{v2(n-1)} + \Delta L_1, (t_5 \leq t < t_6, |dP_c| > T_d) \\ L_{v2(n-1)} - \Delta L_2, (t_5 \leq t < t_6, |dP_c| < T_d) \\ L_{v2(n-1)} + \Delta L_1, (t_6 \leq t < t_7) \end{cases} \quad (26)$$

式中： k_1 和 k_2 分别为功率变化率和功率差额对虚拟电感的调节系数； L_{v0} 为修正后的虚拟电感初值； L_{base} 为虚拟电感的基础值； ω_g 为电网角频率； L_{v1} 为虚拟电感主体部分的值，当系统处于 6 振荡阶段中间的过渡状态时， L_{v1} 维持原值，以避免在过渡期内频繁调整虚拟电感的值； $L_{v2(n)}$ 为当前采样周期虚拟电感微调部分的值； $L_{v2(n-1)}$ 为上一个采样周期虚拟电感微调部分的值； ΔL_1 和 ΔL_2 为虚拟电感微调部分的周期调整值。为确保并联 VSG 实现功率均分， $L_{v2(n-1)}$ 需在稳态时回归初值，因此需要在虚拟电感的调整过程中使其不断向初值调整，即当虚拟电感偏离初值时使其加上或减去一个小的调整值，具体实现如式(27)所示。

$$L_{v2(n)} = \begin{cases} L_{v2(n)} - \Delta L_3, (L_{v2(n)} > 0) \\ L_{v2(n)}, (L_{v2(n)} = 0) \\ L_{v2(n)} + \Delta L_3, (L_{v2(n)} < 0) \end{cases} \quad (27)$$

式中， ΔL_3 为虚拟电感回归初值的周期调整值，为使虚拟阻抗的微调部分能够正常工作，虚拟阻抗三个周期调整值需满足式(28)。

$$\Delta L_1 > \Delta L_3 > \Delta L_2 \quad (28)$$

虚拟电感的终值为

$$L_v = (L_{v1} + L_{v2}) \frac{\omega_0}{\omega_0 + s} \quad (29)$$

为降低虚拟电感变化时对功率解耦的影响，采用虚拟负电阻是一种可行的方案，图 8 为虚拟电阻取不同值时 VSG 的输出阻抗伯德图。由图 8 可知，当虚拟电阻逐渐减小时，输出阻抗在工频处的阻抗角逐渐接近 90° ，但随着虚拟电阻进一步减小，输出阻抗在低频段表现出负电阻特性，输出阻抗的负电阻特性也逐渐向高频段移动，因此，为保证系统具有一定的稳定裕度，虚拟负电阻的取值不能太小。

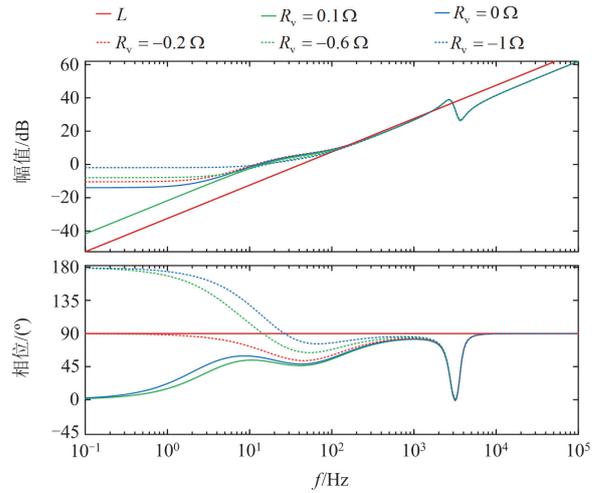


图 8 输出阻抗伯德图

Fig. 8 Bode diagram of output impedance

3 仿真结果及分析

本文在 Matlab/Simulink 平台分别搭建了自适应控制策略、模糊控制策略和 JDL 协同自适应控制策略的模型，模型的基本参数如表 1 所示，其中自适应控制策略采用文献[6]的自适应控制策略，模糊自适应控制策略采用文献[9]的改进型模糊自适应控制策略。

表 1 虚拟同步发电机基本参数

Table 1 Basic parameters of VSG

参数	数值	参数	数值
电网电压 U_g/V	220	无功下垂系数 D_q/A	321
滤波电感 L_f/mH	3.8	虚拟电感基础值 L_{base}/mH	3
滤波电容 $C/\mu F$	11.8	线路电感 L_2/mH	1
装机容量 S/kVA	10	$\Delta L_1/mH$	0.018
额定频率 f_n/Hz	50	$\Delta L_2/mH$	0.003
开关频率 f_s/Hz	10 000	$\Delta L_3/mH$	0.015
直流母线电压 U_{dc}/V	800	虚拟电阻 R_v/Ω	-0.3
$J/(kg \cdot m^2)$	0.15	$k_1/(mH \cdot s/kW)$	6×10^{-5}
$D_p/(W \cdot s/rad)$	1592	$k_2/(mH/kW)$	0.1

3.1 功率扰动

图 9 为 $t = 0.5 s$ 有功功率指令由 0 kW 调整为 10 kW 时，不同虚拟电感下自适应控制策略(adaptive control strategy, ACS)和 JDL 协调控制策略的功率响应曲线。

图 10 为 $t = 0.5 s$ 时有功功率指令由 0 kW 调整为 10 kW 时，不同虚拟电感下模糊自适应控制策略(fuzzy adaptive control strategy, FACS)和 JDL 协调控制策略的功率响应曲线。

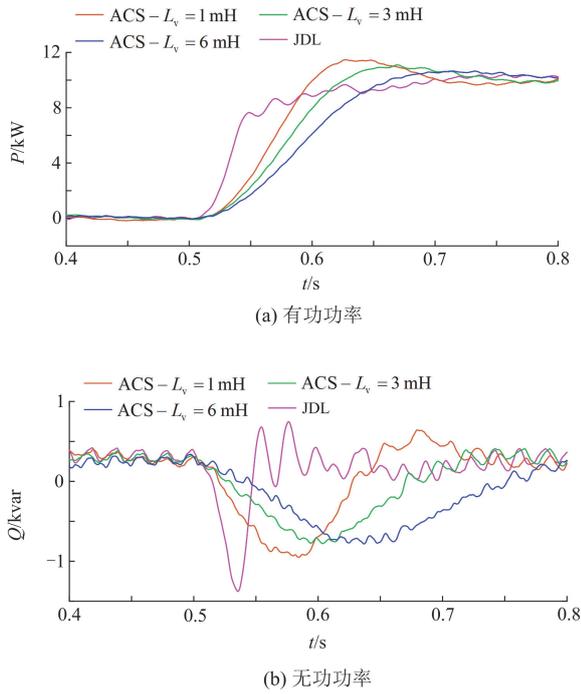


图 9 自适应控制策略与 JDL 控制策略的功率响应
Fig. 9 Power response of adaptive control strategy and JDL control strategy

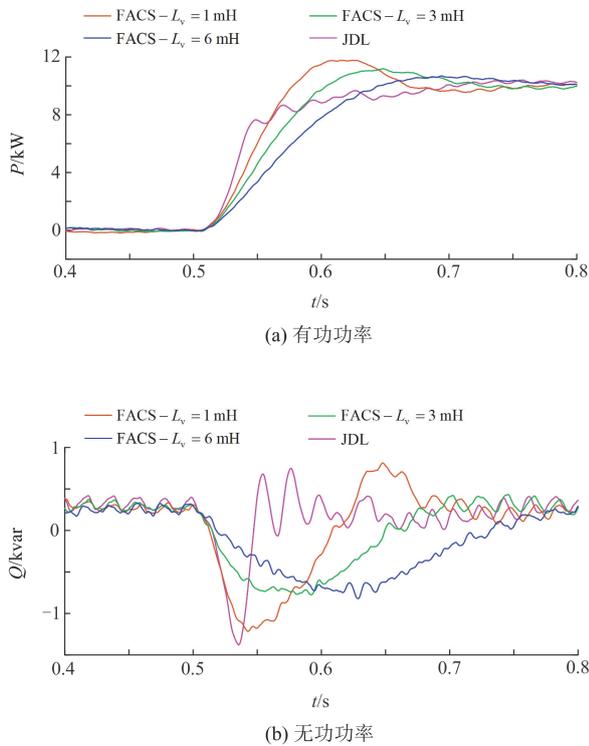


图 10 模糊自适应控制策略与 JDL 控制策略的功率响应
Fig. 10 Power response of fuzzy adaptive control strategy and JDL control strategy

由图 9 和图 10 可知,当虚拟电感值分别设置为 1 mH、3 mH、6 mH 时,采用自适应控制策略的功率调整到稳态值的时间分别为 0.18 s、0.2 s、0.25 s,其有功功率超调量分别为 17%、12%和 5%,无功功率的波动幅值分别为 811 var、551 var、554 var。采用模糊自适应控制策略的功率调整到稳态的时间分别为 0.2 s、0.22 s、0.23 s,其有功功率超调量分别为 19%、14%和 4%,无功功率的波动幅值分别为 911 var、497 var、581 var。相较于固定虚拟阻抗的自适应控制策略和模糊自适应控制策略,本文所提 JDL 协调控制策略的有功功率在 0.1 s 内达稳态值附近,其有功功率超调量小于 5%,无功功率波动幅值与模糊控制策略下虚拟电感为 1 mH 时的超调量相当,但无功受影响的时间小于 0.1 s。本文所提 JDL 协调控制策略在抑制功率振荡和提升功率调节速度方面有明显的优势。

图 11 为虚拟电感 L_v 取 3 mH 时,分别采用自适应控制策略、模糊自适应控制策略与 JDL 协调控制策略功率扰动为 100%时 VSG 的角频率 ω 、虚拟转动惯量 J 、虚拟阻尼 D_p 和虚拟电感 L_v 的变化曲线。

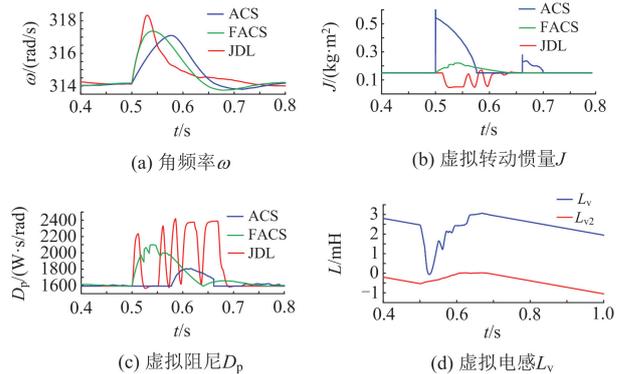


图 11 有功扰动下 ω 、 J 、 D_p 和 L_v 变化曲线
Fig. 11 Change curves of ω , J , D_p and L_v under active power disturbance

由仿真结果可知,采用自适应控制策略和模糊自适应控制策略的 VSG 频率调整速度较慢,其参数在调整过程中的变化趋势相对简单,频率在稳态值附近出现振荡。本文所提 JDL 控制策略在功率调整的前期调节速度较快,在调整后期,系统逐渐趋于稳态,频率变化平稳。

3.2 频率扰动

当并网点的电压频率发生变化时,采用下垂控制的 VSG 需增发或吸收有功为电网提供频率支撑。图 12 和图 13 分别为当 $t = 0.5$ s 时电网频率从 50 Hz 下降到 49 Hz,采用 ACS 和 JDL 协调控制策略以及采用模糊控制策略和 JDL 协调控制策略的功率响应曲线。

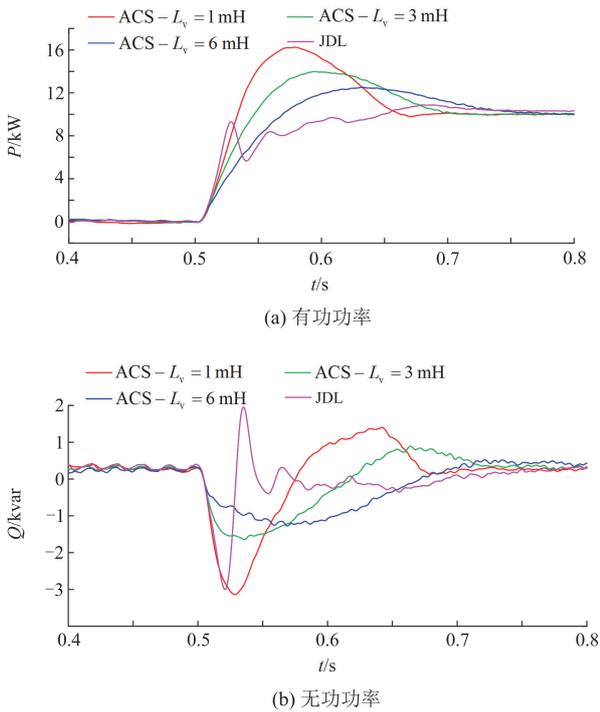


图 12 频率扰动下自适应控制策略与 JDL 控制策略的功率响应

Fig. 12 Power response of adaptive control strategy and JDL control strategy under frequency disturbance

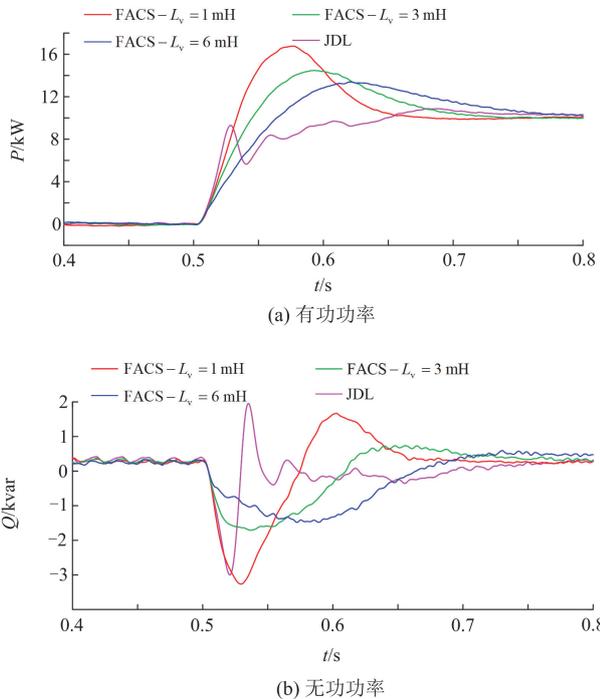


图 13 频率扰动下模糊自适应控制策略与 JDL 控制策略的功率响应

Fig. 13 Power response of fuzzy adaptive control strategy and JDL control strategy under frequency disturbance

由图 12 和图 13 可知，频率扰动对系统功率稳定的影响比功率扰动明显，在频率扰动下，虚拟电感对功率振荡抑制的影响趋势与功率扰动对功率振荡抑制的影响趋势一致。当 VSG 的虚拟电感分别设置为 1 mH、3 mH 和 6 mH 时，自适应控制策略的有功功率超调量分别为 60%、40%和 24%，无功的波动幅值分别为 3312 var、1583 var、1214 var。到达稳态的时间分别为 0.17 s、0.23 s 和 0.24 s；改进型模糊自适应控制策略的有功功率超调量分别为 70%、44%和 26%，无功功率的波动幅值分别为 3337 var、1672 var、1408 var，到达稳态的时间分别为 0.17 s、0.23 s 和 0.25 s。本文所提 JDL 协调控制策略的有功功率超调量为 5%，无功的波动幅值为 2989 var，其调节到稳态的时间为 0.15 s。

图 14 为传统自适应控制策略和模糊自适应控制策略的虚拟电感 L_v 取 3 mH 时，采用自适应控制策略、模糊自适应控制策略与 JDL 协调控制策略当电网电压频率下降 1 Hz 时 VSG 的角频率 ω 、虚拟转动惯量 J 、虚拟阻尼 D_p 和虚拟电感 L_v 的变化曲线。

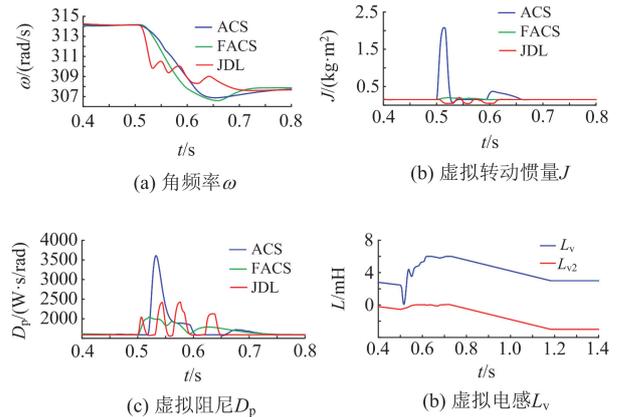


图 14 频率扰动下 ω 、 J 、 D_p 和 L_v 变化曲线

Fig. 14 Change curve of ω , J , D_p and L_v under frequency disturbance

由图 14 可知，随着电网频率下降，当功率调整至图 2 中的区间 1 内时，VSG 输出电压的角频率与电网角频率偏差值 $\Delta\omega$ 大于 0，VSG 输出电压的角频率变化率 $d\omega/dt$ 小于 0， $\Delta\omega$ 和 $d\omega/dt$ 的乘积与功率扰动时的状态相反，此时自适应和模糊自适应控制策略无法正常调节虚拟转动惯量和虚拟阻尼。本文所提 JDL 控制策略以功率为判断条件，在功率和频率扰动时，功率变化的趋势与功率扰动时相同，因此 JDL 协调抑制策略的转动惯量、虚拟阻尼和虚拟电感在频率扰动时同样能协调动作，抑制功率的振荡。

综上，相较于自适应和模糊自适应控制策略，本文所提 JDL 协调自适应控制策略在功率和频率扰

动下均能较好地抑制功率振荡, JDL协调控制策略的适用性更强。

4 结论

本文针对VSG现有控制算法在功率振荡抑制效果和功率调整速度存在矛盾的现象, 提出了JDL协调控制算法, 并搭建仿真平台, 将本文所提JDL协调控制算法与现有自适应控制算法和改进型模糊自适应控制算法进行对比分析, 结论如下。

1) 传统的采用固定虚拟阻抗的控制算法无法兼顾功率振荡抑制的效果和功率响应的速度。虚拟阻抗越小, 功率响应的速度越快, 但功率超调量也会更大。

2) 仿真实验结果表明, 相比现有的自适应和改进的模糊自适应控制算法, 本文所提JDL协调控制策略在现有控制策略中引入自适应虚拟电感 L_v , 对功率振荡的抑制和响应速度的提升均有明显效果。

3) 本文所提的JDL协调控制策略将功率差额、功率变化率和频率差额作为控制参数, 当系统功率和频率发生变化时其对功率振荡均有较好的抑制效果, 所提控制算法的适用性更强。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 王渝红, 程杨帆, 廖建权, 等. 基于改进电容电流反馈的含非线性负载光伏并网系统振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 10-22.
WANG Yuhong, CHENG Yangfan, LIAO Jianquan, et al. Oscillation suppression strategy of a PV grid-connected system with nonlinear loads based on improved capacitor current feedback[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 10-22.
- [3] 李飞, 王栋, 李博, 等. 改进猎人猎物优化算法的光伏发电MPPT控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 116-124, 134.
LI Fei, WANG Dong, LI Bo, et al. The MPPT control strategy for photovoltaic based on improved hunter-prey optimization algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 116-124, 134.
- [4] 朱慧敏, 苑舜, 李春来. 含储能环节的光伏电站虚拟同步发电机控制策略与分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 45-50.
ZHU Huimin, YUAN Shun, LI Chunlai. Control strategy and analysis of virtual synchronous generator of photovoltaic power plant with energy storage link[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 45-50.
- [5] FU Siqi, SUN Yao, LIU Zhangjie, et al. Power oscillation suppression in multi-VSG grid with adaptive virtual inertia[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 69(1): 10202-10214.
- [6] 李志军, 杨梦伟, 张家安, 等. VSG惯量及阻尼的协同自适应控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 36-43.
LI Zhijun, YANG Mengwei, ZHANG Jia'an, et al. Research on synergistical adaptive control of inertia and damping of VSG[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1): 36-43.
- [7] 于晶荣, 孙文, 于佳琪, 等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 137-144.
YU Jingrong, SUN Wen, YU Jiaqi, et al. Virtual synchronous generator control of a grid-connected inverter based on adaptive inertia[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 137-144.
- [8] KARIMI A, KHAYAT Y, NADERI M, et al. Inertia response improvement in AC microgrids: a fuzzy-based virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4321-4331.
- [9] ZHANG Liang, ZHENG Hao, CAI Guowei, et al. Power-frequency oscillation suppression algorithm for AC microgrid with multiple virtual synchronous generators based on fuzzy inference system[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16: 1589-1601.
- [10] 郭建伟, 樊友平. 基于改进粒子群算法的VSG参数自适应控制策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(6): 72-82.
GUO Jianyi, FAN Youping. Adaptive VSG parameter control strategy based on improved particle swarm optimization[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 72-82.
- [11] 高子轩, 赵晋斌, 杨旭红, 等. 基于RBF的VSG转动惯量和阻尼系数自适应控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 132-139.
GAO Zixuan, ZHAO Jinbin, YANG Xuhong, et al. RBF-based adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for VSG[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 132-139.
- [12] HUANG Linbin, XIN Huanghai, YUAN Hui, et al. Damping effect of virtual synchronous machines provided by a dynamical virtual impedance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 570-573.

- [13] FU Siqu, SUN Yao, LI Lang, et al. Power oscillation suppression in multi-VSG grid by adaptive virtual impedance control[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(3): 4744-4755.
- [14] 何鑫, 左芸裴, 杨映海, 等. 基于虚拟同步机参数自适应调节的并网逆变器控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 259-266.
HE Xin, ZUO Yunpei, YANG Yinghai, et al. Research on control strategy of grid-connected inverter based on parameter adaptive adjustment of virtual synchronous generator[J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(7): 259-266.
- [15] SHUAI Zhikang, HUANG Wen, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(4): 4127-4142.
- [16] 奚鑫泽, 黄英博, 邢超. 一种多虚拟同步机并联系统虚拟动态互阻尼控制方法[J/OL]. 电网技术: 1-10[2024-05-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0080>.
XI Xinze, HUANG Yingbo, XING Chao. A virtual dynamic mutual damping control method for multi-VSGs parallel system[J/OL]. Power System Technology: 1-10[2024-05-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0080>.
- [17] YU Yun, SANJAY K C, TINAJERO G D A, et al. Active damping for dynamic improvement of multiple grid-tied virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 3673-3683.
- [18] FU Siqu, SUN Yao, LI Lang, et al. Power oscillation suppression of multi-VSG grid via decentralized mutual damping control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10): 10202-10214.
- [19] 江世明, 唐杰. 基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 144-154.
JIANG Shiming, TANG Jie. Improved VSG control strategy based on transient damping enhancement[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 144-154.
- [20] 范宸琿, 秦晓辉, 齐磊, 等. 构网型下垂控制中虚拟阻抗的作用、改进及研究前景分析[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2237-2250.
FAN Chenhui, QIN Xiaohui, QI Lei, et al. Analysis of the role, improvement, and research prospects of virtual impedance in grid-forming droop control[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2237-2250.
- [21] 兰征, 龙阳, 曾进辉, 等. 考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率振荡抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 131-141.
LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. Transient power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator considering overshoot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 131-141.
- [22] 徐海珍, 余畅舟, 毛福斌, 等. 基于频率稳定性提升的虚拟惯性优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 126-133.
XU Haizhen, YU Changzhou, MAO Fubin, et al. A virtual inertia optimization control strategy based on frequency stability improvement[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 126-133.
- [23] 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 Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.

收稿日期: 2024-06-30; 修回日期: 2024-08-10

作者简介:

吴卓(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子及电气传动; E-mail: 2322721514@qq.com

李自成(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力电子与新能源高效利用; E-mail: zcli@wit.edu.cn

刘江(1987—), 男, 博士, 研究方向为电力电子与光伏发电技术。E-mail: liujiang_xyz@126.com

(编辑 许威)