

基于 RBF 的 VSG 虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制

张子星¹, 赵晋斌², 曾志伟¹, 毛玲¹, 张永立³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学海上风电研究院, 上海 200090;
3. 上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘要: 虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)技术可以使并网逆变器具有与同步发电机类似的外特性。VSG 系统暂态稳定性的主要影响因素是虚拟惯量和阻尼系数, 但现有的控制策略在参数调节过程中存在灵活性不足的缺点, 不能有效解决系统暂态稳定性和暂态恢复时间的问题。针对这一问题, 提出动态调节阻尼补偿量的概念。将阻尼系数和阻尼补偿量共同作为系统的等效阻尼系数, 设计了基于径向基函数(radial basis function, RBF)的 VSG 虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制策略, 实现了参数之间的解耦, 使系统的阻尼随着系统频率的变化进行动态调整。通过建立 VSG 数学模型, 确定了参数的具体取值范围。最后, 在仿真平台上搭建 VSG 系统, 分别在出力波动和低压穿越两种工况下验证了所提控制策略相较于传统 RBF 控制策略的优越性。

关键词: 虚拟同步机; 虚拟惯量; 动态阻尼补偿; RBF 神经网络; 自适应控制

VSG virtual inertia and dynamic damping compensation adaptive control based on RBF

ZHANG Zixing¹, ZHAO Jinbin², ZENG Zhiwei¹, MAO Ling¹, ZHANG Yongli³

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Offshore Wind Power Research Institute, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
3. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) technology enables grid-connected inverters to exhibit external characteristics similar to synchronous generators. The primary factors influencing the transient stability of the VSG system are virtual inertia and damping coefficients. However, existing control strategies suffer from a lack of flexibility during parameter adjustment, failing to effectively address transient stability and recovery time issues in the system. To address this issue, this paper proposes the concept of dynamically adjusting the damping compensation amount. It considers the damping coefficient and damping compensation amount together as the equivalent damping coefficient of the system. A RBF-based VSG virtual inertia and dynamic damping compensation adaptive control strategy is designed to achieve decoupling among parameters. This strategy enables the damping of the system to be dynamically adjusted as the system frequency changes. By establishing a mathematical model for the VSG, specific parameter ranges are determined. Finally, this paper builds a VSG system on a simulation platform and validates the superiority of the proposed control strategy over traditional RBF control strategies in conditions of output fluctuation and low-voltage ride through.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177184).

Key words: virtual synchronous generator (VSG); virtual inertia; dynamic damping compensation; radial basis function neural network (RBFNN); adaptive control

0 引言

“双高”背景下, 大量新能源接入电网, 电力电子化的电力系统呈现低惯性、弱阻尼特性, 使电

力系统的稳定性变差^[1-3]。为改善新能源的接入对电网造成的失稳现象, 虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)技术被提出^[4-6]。由于虚拟同步机可使并网逆变器具有与同步发电机类似的外特性, 且 VSG 的虚拟惯量、阻尼系数和阻尼补偿量的灵活调节对系统的动态稳定性有着显著的影响^[7-10], 因此

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177184)

国内外专家针对 VSG 参数的调节进行了大量研究。

文献[11]提出了运用 bang-bang 算法对 VSG 的虚拟惯量进行自适应调节,但是在调节过程中,该算法的参数呈现离散的变化,同时参数的突变会使系统有失稳的趋势。该方法仅对虚拟惯量进行自适应调节,并未考虑阻尼系数对 VSG 的影响。

针对 VSG 稳定性的问题,国内外学者转向研究多个参数的调节对 VSG 的影响。文献[12]对比研究了运用径向基函数(radial basis function, RBF)算法自适应调节虚拟惯量和运用 RBF 算法自适应调节虚拟惯量和阻尼系数两种控制策略,但该策略的灵活性不足、控制精度不高。文献[13-14]对虚拟惯量和阻尼系数进行自适应调节,但只是定性讨论了二者随着角频率的变化趋势,其在调节过程中存在的耦合问题并没有解决,控制策略精度不高。文献[15-16]通过固定阻尼补偿量,利用智能算法自适应调节虚拟惯量和阻尼系数,使二者随着频率波动自适应地进行调整,该策略虽然运用智能算法解决了虚拟惯量和阻尼系数之间的耦合问题,但并没有对阻尼补偿量实时在线调整,控制策略的精度不高。文献[17]对 VSG 的虚拟惯量和阻尼系数两个参数进行优化,但并没有考虑阻尼补偿量对 VSG 稳定性的影响,并且没有验证所提控制策略在不同工况下的适应性。文献[18]提出了通过调整虚拟惯量和阻尼系数两个参数来改变 VSG 的阻尼状态,但只是定量分析了两个参数的变化,并没有准确地定性确定参数的取值范围。文献[19]提出了改进的 VSG 控制策略,在低压穿越的情况下维持系统稳定,但该策略固定虚拟惯量和阻尼系数,存在灵活性不足的问题。

以上文献关于 VSG 参数控制策略的研究,仅考虑虚拟惯量和阻尼系数对系统的影响及参数取值范围,并没有讨论当阻尼补偿量变化时对 VSG 的影响及其取值。文献[20]讨论了 VSG 的虚拟惯量、阻尼系数和阻尼补偿量对其稳定性的影响,得到阻尼补偿量对 VSG 的稳定控制有着不可忽视的影响。文献[21]提出了在多终端直流系统中 VSG 的阻尼补偿量自适应调整的方法,但只是单独调节阻尼补偿量,并没有将虚拟惯量、阻尼系数和阻尼补偿量结合起来。文献[22]讨论了 VSG 的虚拟惯量、阻尼系数和阻尼补偿量的变化对 VSG 系统的影响,并分析了 VSG 控制策略和下垂控制之间的联系,但并没有提出相应的控制策略。文献[23]针对两台 VSG 并网的问题提出了虚拟惯量、阻尼系数和阻尼补偿量的自适应控制策略,实验表明动态调整阻尼补偿量比固定其取值对 VSG 的稳定性效果更好,但参数的取值

并不精确,并且控制策略的精度不高。

通过以上分析可知,阻尼补偿量对系统稳定性有着不可忽视的影响,固定阻尼补偿量在调节系统的频率和有功功率时灵活性不足,不能有效解决系统暂态稳定性和暂态恢复时间的问题。动态调整阻尼补偿量可以更加精确地根据系统频率的变化对系统的等效阻尼系数进行在线调整,从而提高 VSG 系统稳定性。虚拟惯量、阻尼系数和阻尼补偿量之间存在耦合关系并且与频率是非线性函数的关系,但现有的控制策略不能解决参数之间的耦合性问题且控制精度不高。因此本文利用 RBF 神经网络多输入多输出的特性,处理了参数的耦合关系,并且 RBF 神经网络只调节权值,收敛速度比通常的多层神经网络更快,能满足实时控制的要求。

本文提出基于 RBF 的 VSG 虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制策略,实现了参数之间的解耦,使系统的阻尼随着系统频率的变化进行动态调整,提高了控制策略的精度。本文首先对改进后的 VSG 数学模型进行分析,之后根据阻尼比、幅值裕度和相角裕度等约束条件确定了参数的具体取值范围^[24-28]。相较于固定阻尼补偿量,该策略对阻尼补偿量进行实时的动态调整,使参数的范围更加精确。最后本文搭建了仿真模型,分别在出力波动和低压穿越两种工况下与基于 RBF 的虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略^[12]进行对比,从角频率的超调量、有功功率的超调量和动态响应时间三个指标进行对比分析,验证了该控制策略的有效性和理论分析的正确性。

1 VSG 参数范围的确定

1.1 建立基于 RBF 的 VSG 数学模型

基于 RBF 的 VSG 控制原理如图 1 所示,由 VSG 主体和控制策略部分组成。VSG 主体部分包括分布式电源 DG、储能系统和逆变器部分(由逆变器侧电感 L_1 以及网侧电感 L_2 和滤波电容 C 组成的 LCL 滤波器)。控制策略部分由 VSG 基础控制部分和改进部分组成。如图 2 所示, VSG 基础控制部分由有功功率控制回路(虚拟调速器和摇摆方程)和无功功率控制回路(虚拟励磁器)两部分组成。改进部分是基于 RBF 神经网络的虚拟惯量和等效阻尼系数 D_0 (由阻尼系数 D 和阻尼补偿量 ΔD 计算得出)的自适应控制策略。如图 1 所示,该策略将角频率值输入给 RBF 神经网络,之后由 RBF 神经网络算法对输入输出一组虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 、阻尼补偿量 ΔD 的值,并返回给控制策略的基础部分,通过摇摆方程、虚拟调速器和虚拟励磁器的作用得到一组逆变器输

出侧单相电压有效值 E 和 VSG 等效输出阻抗的阻抗角, 并将这组值经由 PWM 环节后, 输入到 VSG 主体部分得到下一时刻的角频率值, 完成整个闭环控制。

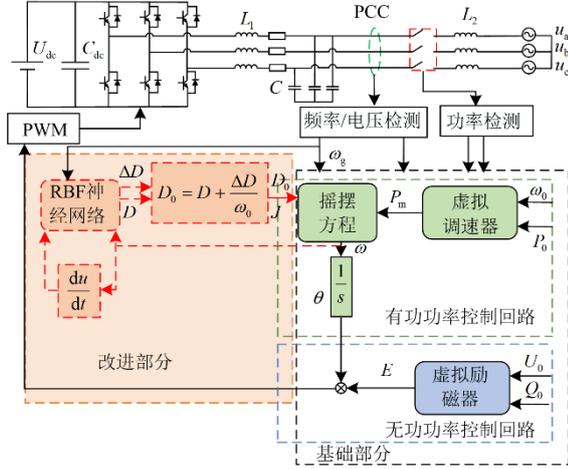


图 1 基于 RBF 的 VSG 控制原理图

Fig. 1 Schematic diagram of RBF-based VSG control principles

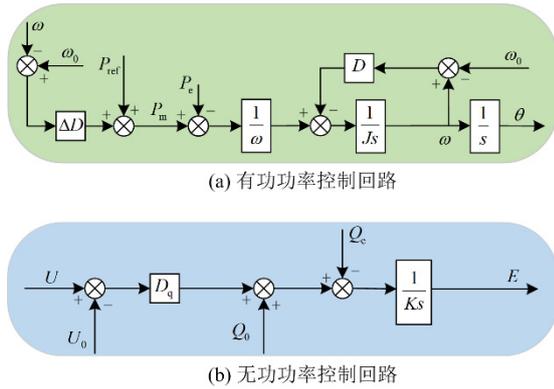


图 2 VSG 的功率控制回路

Fig. 2 Power control circuit of VSG

其中, VSG 的数学模型可以表示为

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

$$P_m = P_{ref} + \Delta D(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

式中: P_m 表示机械功率; P_e 表示电磁功率; P_{ref} 表示有功功率给定值; ω 表示 VSG 的实际角速度; ω_0 表示电网的额定角速度。令 D_0 作为由 D 和 ΔD 计算出的等效阻尼系数, 如式(3)所示。

$$D_0 = D + \frac{\Delta D}{\omega_0} = D + \frac{P_m - P_{ref}}{\omega_0(\omega_0 - \omega)} \quad (3)$$

VSG 的摇摆方程是通过联立式(1)一式(3)得到

的, 如式(4)所示。由摇摆方程可得, 虚拟惯量和等效阻尼系数与系统的角频率和有功功率之间是非线性函数的关系。

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{ref} - P_e}{\omega_0} + D_0(\omega_0 - \omega) \quad (4)$$

如果不考虑有功环和无功环之间的耦合关系, 根据式(1)一式(4)和图 2(a)可以得到 VSG 在并网模式下的输出有功闭环传递函数, 如式(5)所示。

$$G(s) = \frac{K_p}{Js^2 + \left(D + \frac{\Delta D}{\omega_0}\right)s + K_p} = \frac{K_p}{Js^2 + D_0s + K_p} \quad (5)$$

式中, $K_p = 3U_0E/\omega_0X$, 其中 U_0 表示参考相电压, X 表示 VSG 的等效电抗。

从式(5)中可以看出, 虚拟惯量 J 和等效阻尼系数 D_0 共同作用影响 VSG 并网运行时的系统稳定性。随着等效阻尼系数 D_0 的增大, 系统的响应速度变慢。由于角频率 ω_0 的加权, 使得阻尼系数 D 比阻尼补偿量 ΔD 对系统稳定性的影响更大。阻尼系数 D 虽然对 VSG 系统的阻尼起着重要作用, 但是阻尼补偿量 ΔD 对 VSG 系统阻尼的影响同样不可忽略。

1.2 VSG 参数范围的确定

1.2.1 等效阻尼系数范围的确定

VSG 进行调频时, 根据 GB/T40595 标准, 调差率为 0.5%, VSG 输出有功功率为额定有功的 40%~100%。本文给定额定有功为 10 000 W。

$$\Delta D = \frac{P_m - P_{ref}}{\omega_0 - \omega} \quad (6)$$

由式(6)求得 ΔD 的取值范围为(6366.19, 15915.5)。

根据有功闭环传递函数的表达式可以求得 VSG 系统的固定角频率 ω_n 和阻尼比 ξ , 分别如式(7)、式(8)所示。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{J\omega_0}} \quad (7)$$

$$\xi = D \sqrt{\frac{\omega_0}{4JK_p}} + \Delta D \sqrt{\frac{1}{4J\omega_0K_p}} \quad (8)$$

为确定参数的取值范围, 对上述小信号模型的幅值条件和相角条件作如式(9)、式(10)的设定。

$$h(\text{dB}) = \frac{\omega \sqrt{\omega^2 + 4\xi^2 \omega_n^2}}{\omega_n^2} \Bigg|_{\omega=\omega_g} = +\infty \quad (9)$$

式中, ω_g 为系统的穿越频率。

$$\gamma = \arctan \left(\frac{2\xi}{\sqrt{\sqrt{1+4\xi^4} - 2\xi^2}} \right) > 60^\circ \quad (10)$$

由式(9)、式(10)可以得出,幅值裕度趋于无穷大,为了使VSG系统有较好的稳定性,本文取相角裕度 $\gamma > 60^\circ$,可以得到 ξ 在(0.612,1)内。

由式(8)可知, D 为

$$D = 2\xi \sqrt{\frac{3EUJ}{X\omega_0} - \frac{\Delta D}{\omega_0}} \quad (11)$$

此外,阻尼系数的取值还受到机械转矩变化量和角频率变化量的影响,这里取系统的角频率 $\omega \approx \omega_0$ 。

$$D = \frac{\Delta T}{\Delta\omega_{\max}} = \frac{\Delta P}{\omega\Delta\omega_{\max}} \approx \frac{\Delta P}{\omega_0\Delta\omega_{\max}} \quad (12)$$

式中: ΔT 为机械转矩变化量, $\Delta T = \frac{\Delta P}{\omega}$, ΔP 为有功功率变化量; $\Delta\omega_{\max}$ 为角频率变化量的最大值。

由式(8)、式(11)和式(12)得到 D 的范围为(20.26, 27.76)。由式(3)可得等效阻尼系数 D_0 的取值范围为(40.52, 78.42)。

1.2.2 虚拟惯量范围的确定

根据二阶系统调节时间的限制,设定系统特征根 $S_{1,2}$ 的实部 $\text{Re}(S_i) = -\xi\omega_n \leq \text{Re}(S_i)_{\max}$ 。将已经求出的阻尼系数和阻尼补偿量的范围代入特征根的实部,得到虚拟惯量、阻尼系数、阻尼补偿量和特征根实部的三维曲线,如图3所示。

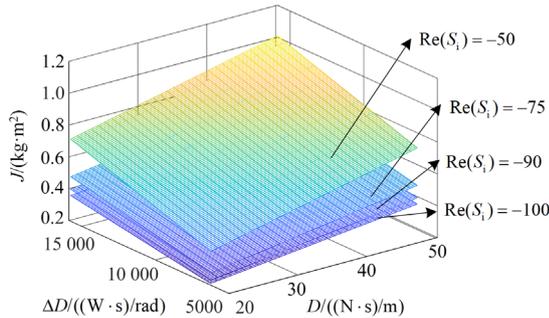


图3 虚拟惯量、阻尼系数、阻尼补偿量和特征根实部的关系
Fig. 3 Relationship between virtual inertia, damping coefficient, damping compensation, and real part of eigenvalues

根据自动控制原理,欠阻尼的二阶系统闭环极点离虚轴越远,对系统的动态影响越小。依据并网逆变器所接电网的容量大小,本文取 $\text{Re}(S_i)_{\max} = -100$ ^[18,23],可以得到虚拟惯量随阻尼系数、阻尼补偿量和特征根实部的图像。

根据式(5)可得有功功率环的开环传递函数为

$$G_p(s) = \frac{3EU/\omega_0 X}{Js^2 + D_0s} \quad (13)$$

在有功环传递函数截止频率 f_c 处,环路增益幅值等于1。

$$G_p(j\omega_c) = 1 \quad (14)$$

由上述可得

$$J = \frac{D_0}{2\pi f_c} \sqrt{\left[\frac{3EU}{2\pi f_c X \omega_0 D_0} \right]^2 - 1} \quad (15)$$

根据式(15)可知,根号中的表达式恒大于0。

$$f_c \leq \frac{3EU}{2\pi X \omega_0 D_0} = f_{\max} \quad (16)$$

当 $f_c = f_{\max}$ 时, $J = 0$ 。但在系统的调节过程中,要求有虚拟惯量做支撑,即 $J > 0$ ^[24],因此需要满足 $f_c < f_{\max}$ 。由以上分析可以求出 J 的范围为(0, 0.5)。

2 基于RBF的多参数VSG自适应控制策略

2.1 建立结合VSG控制的RBF神经网络

在分析VSG虚拟惯量 J 和等效阻尼系数 D_0 的自适应控制时,由于参数之间存在耦合关系,阻尼补偿量需要根据系统频率的变化对阻尼系数进行实时动态调整。RBF神经网络不仅可以处理系统内的耦合关系及提高控制精度,而且对虚拟惯量和等效阻尼系数与频率之间的非线性函数关系具有良好的逼近效果,满足实时控制的要求,解决了输入信息之间的互补性和冗余性问题。图4为结合VSG控制的RBF神经网络结构图,其中 j 、 i 、 l 分别代表神经网络输入层、隐含层和输出层的节点个数。

本文采用2-5-3结构的RBF神经网络,取神经网络的输入变量为 ω 和 $d\omega/dt$,分别用 x_1 、 x_2 来表示。从图4中可以看出,输入层输出的表达式为

$$O_j^{(1)} = x(j), j=1,2 \quad (17)$$

式中, $O_j^{(1)}$ 为输入层输出的函数。

$$x(1) = \omega - \omega_0 = \Delta\omega, x(2) = d\omega/dt \quad (18)$$

隐含层的输入为

$$\text{net}_i^{(2)} = \vec{x}, \vec{x} = (x(1), x(2)) \quad (19)$$

隐含层的输出为

$$O_i^{(2)}(k) = g(\text{net}_i^{(2)}(k)), i=1,2,\dots,5 \quad (20)$$

式中: $O_i^{(2)}$ 为隐含层输出的函数; $g(\cdot)$ 为高斯函数。

$$g(x) = \exp \left(-\frac{\|\vec{x} - \vec{c}_i\|^2}{2b_i^2} \right), i=1,2,\dots,5 \quad (21)$$

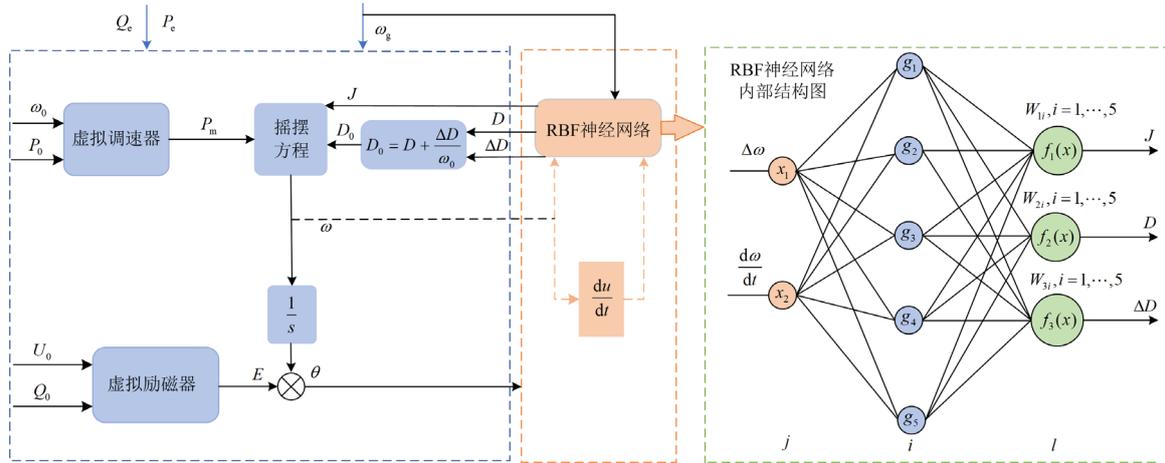


图 4 结合 VSG 控制的 RBF 神经网络结构图

Fig. 4 Structural diagram of RBF neural network combined with VSG control

式中: b_i 为高斯基函数的宽度矢量 \mathbf{b} 中的元素, $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_5]^T$; $\bar{c}_i = [c_{i1}, c_{i2}]$ 为第 i 个隐层神经元的中心点矢量值。

输出层的输入为

$$net_i^{(3)}(k) = \sum_{i=1}^5 w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (22)$$

式中, $w_{li}^{(3)}$ 代表神经网络的权值。

输出层的输出分别为虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 和阻尼补偿量 ΔD 。

$$J = O_l^{(3)}(k) = f(net_l^{(3)}(k)), l=1 \quad (23)$$

$$D = O_l^{(3)}(k) = f(net_l^{(3)}(k)), l=2 \quad (24)$$

$$\Delta D = O_l^{(3)}(k) = f(net_l^{(3)}(k)), l=3 \quad (25)$$

式中, $O_l^{(3)}$ 为输出层的输出函数。

网络的输出函数为

$$f(x) = \frac{u_l e^x}{e^x + e^{-x}}, l=1, 2, 3 \quad (26)$$

式中: u_1 、 u_2 和 u_3 分别为虚拟惯量、阻尼系数和阻尼补偿量的上限值。

神经网络的性能指标函数为

$$E(k) = \frac{1}{2} (\omega_0(k) - \omega(k))^2 \quad (27)$$

采用梯度下降法调整隐藏层中的权值, 同时添加惯性环节来提高算法的寻优速度。

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (28)$$

式中, η 和 α 分别代表网络的学习速率和惯性系数。

2.2 建立基于 RBF 的 VSG 虚拟惯量和动态补偿阻尼自适应控制策略

图 5 为基于 RBF 神经网络的 VSG 虚拟惯量和

动态补偿阻尼自适应控制策略流程图。

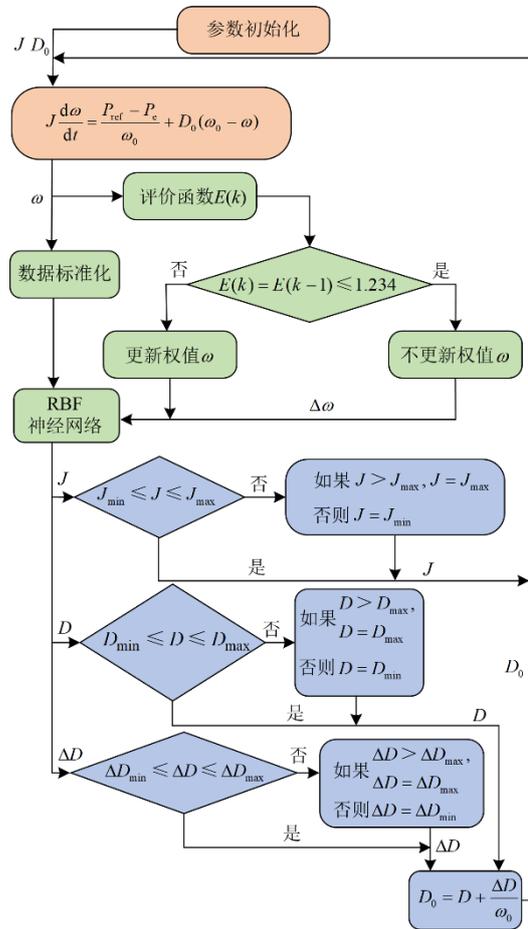


图 5 基于 RBF 神经网络的 VSG 虚拟惯量和动态补偿阻尼自适应控制策略流程图

Fig. 5 Flowchart of adaptive control strategy based on RBF neural network for VSG virtual inertia and dynamic compensation damping

整体控制思路为：先任取系统虚拟惯量 J 、等效阻尼系数 D_0 参数取值范围内的一组初值；再根据初值和摆动方程确定初始角频率 ω ，由评价函数 $E(k)$ 确定是否更新权值；之后根据神经网络进行自适应调整虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 和阻尼补偿量 ΔD 的值，看三者是否落在了给定的取值范围内，从而得到下一时刻的值；由式(3)计算得到等效阻尼系数 D_0 ，将虚拟惯量 J 和等效阻尼系数 D_0 返回至摇摆方程，完成下一次的闭环控制。

3 仿真实验与结果分析

为验证所提出的基于 RBF 神经网络的 VSG 虚拟惯量和动态补偿阻尼自适应控制策略的优越性，在 Matlab/Simulink 软件中搭建了单台 VSG 系统，通过对比基于 RBF 神经网络的虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略，分别在出力波动和低压穿越的情况下进行了验证。仿真参数如表 1 所示。

表 1 VSG 及电网侧主要控制参数

Table 1 Main control parameters of VSG and grid side

参数	数值
直流电压 U_{dc}/V	800
电网侧额定电压 U/V	380
额定频率 f_0/Hz	50
逆变器侧电感 L_1/mH	0.6
电网侧电感 L_2/mH	1.4
滤波电容 $C/\mu F$	1500
额定频率 $\omega_0/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	314

3.1 出力波动工况下 VSG 输出优化

为了验证基于 RBF 神经网络的 VSG 虚拟惯量和动态补偿阻尼自适应控制策略在出力波动时对 VSG 的输出优化效果，本文采用表 1 的数据进行仿真验证。仿真时长为 1 s，初始运行时的 VSG 出力为 10 kW，在 0.6 s 时，有功功率增加至 20 kW，无功功率一直不变。在相同的仿真条件下，本文分析对比和验证了基于 RBF 的虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略。

图 6 显示了系统频率在 0.6 s 增加 10 kW 的情况下，基于 RBF 神经网络的 VSG 虚拟惯量和动态补偿阻尼自适应控制策略(RBF- JD_0)、基于 RBF 的虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略(RBF- JD)的输出角频率波形对比。 M_{p_1} 、 M_{p_2} 分别表示 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略的频率超调量， t_{s_1} 、 t_{s_2} 分别表示 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略的调整时间。当有功功率在 0.6 s 突然增加时，系统输出频

率升高。与 RBF- JD 控制策略相比，RBF- JD_0 控制策略的频率偏差更小。在 RBF- JD 控制策略中固定阻尼补偿量 ΔD ，而在 RBF- JD_0 控制策略中根据系统频率的变化自适应调节阻尼补偿量 ΔD ，可以进一步对阻尼系数 D 进行动态补偿，使得频率的超调量更小，系统恢复稳定的时间更短，因此，运用 RBF 算法自适应地调整虚拟惯量和等效阻尼系数可以更好地对 VSG 的频率进行在线调整。

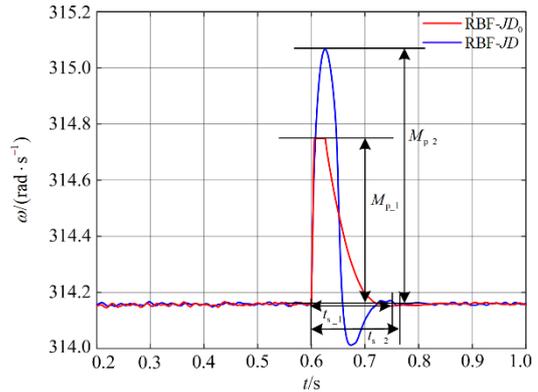


图 6 出力波动下不同控制策略的系统频率对比结果

Fig. 6 Comparison results of system frequency for different control strategies under output fluctuation

图 7 显示了在相同工况下，RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略的输出有功功率波形比较结果。 M_{p_3} 、 M_{p_4} 分别表示 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略的有功功率超调量。从图 7 中可以看出，相比于 RBF- JD 控制策略，RBF- JD_0 控制策略输出的有功功率超调量更小、优化性能更好。

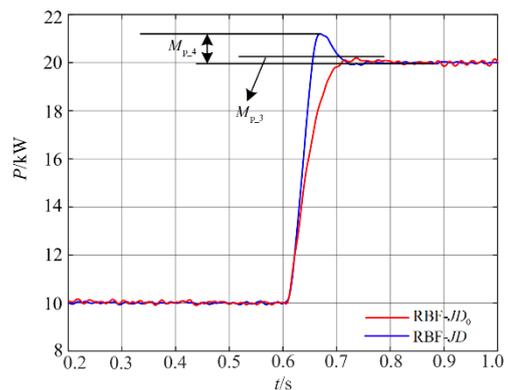


图 7 出力波动下不同控制策略的有功功率对比结果

Fig. 7 Comparison results of active power for different control strategies under output fluctuation

上述分析主要是从时域进行定性分析。为了更加准确地对比 RBF- JD_0 与 RBF- JD 控制策略的性

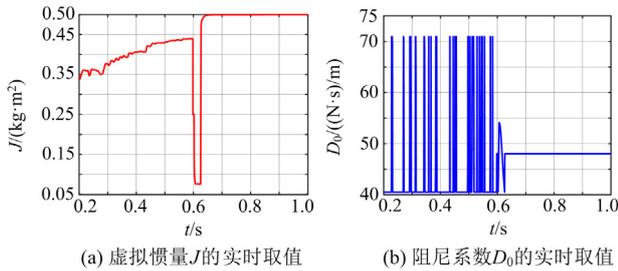
能, 本文选取输出有功功率的增量、输出角频率的增量和稳定时间作为动态性能的定量分析评价指标。各算法的各项分析指标如表 2 所示。VSG 在 0.6 s 出力从 10 kW 增加到 20 kW 时, RBF- JD_0 、RBF- JD 控制策略的输出有功功率分别增加 0.13 kW 和 1.33 kW, 超调量分别为 0.65% 和 6.65%, RBF- JD_0 控制策略对系统输出有功功率超调量的降低效果最为显著。RBF- JD_0 、RBF- JD 控制策略的角频率分别增加 0.59 rad·s⁻¹ 和 0.90 rad·s⁻¹, 超调量分别为 0.19% 和 0.29%, RBF- JD_0 控制策略对系统角频率超调量的降低效果最为显著。两种控制策略的暂态恢复时间分别为 0.12 s 和 0.13 s, RBF- JD_0 控制策略恢复暂态的时间较短。因此, RBF- JD_0 控制策略由于能自适应地调节阻尼补偿量, 使得 VSG 的等效阻尼系数有了进一步的优化, 相比于 RBF- JD 控制策略进一步抑制了系统输出有功功率和角频率的超调量、缩短了系统的暂态恢复时间、提高了控制策略的精度。

表 2 不同控制策略的分析指标

Table 2 Analysis indicators of different control strategies

控制策略	$\Delta P_{\max} / \text{kW}$	$\Delta \omega_{\max} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	t_s / s
RBF- JD_0	0.13	0.59	0.12
RBF- JD	1.33	0.90	0.13

如图 8 所示, 在系统发生有功功率波动的情况下, RBF- JD_0 控制策略下的虚拟惯量 J 、等效阻尼系数 D_0 都在合理范围内运行。当有功功率发生波动时, 由于 RBF 神经网络只调节权值, 很好地解决了信息之间冗余性的问题, 且运行时间短, 因此能够迅速得到虚拟惯量 J 、等效阻尼系数 D_0 的合适取值, 可以适应实时控制的要求, 从而减小了 VSG 的频率和有功波动的幅值, 缩短了系统恢复稳定的时间。

图 8 有功功率波动下 J 和 D_0 的实时取值Fig. 8 Real-time values of J and D_0 under active power fluctuations

3.2 低压穿越工况下 VSG 输出优化

为了验证所提出的控制策略在不同工况下对 VSG 的输出优越性, 本文在系统低压穿越的情况下

分别运用 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略进行对比验证, 仿真模型参数如表 1 所示。

仿真时长为 1.5 s, 电网侧额定电压在 0.4 s 时降低为原电压的 70%, 在 0.8 s 时恢复正常, 其他参数在仿真过程中保持不变。

图 9 显示了 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略在低压穿越情况下的频率波形对比。 M_{p_5} 、 M_{p_6} 分别表示 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略的频率超调量, t_{s_3} 、 t_{s_4} 分别表示 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略的调整时间。在 0.4 s 电网电压发生跌落时, 两种控制策略下的 VSG 频率都发生了波动, 在 0.8 s 电网电压恢复后, VSG 的频率逐渐恢复到 314 rad·s⁻¹。由于引入了阻尼补偿量 ΔD , 相较于 RBF- JD 控制策略, RBF- JD_0 控制策略使得频率恢复时间更短, 频率波动幅值更小。

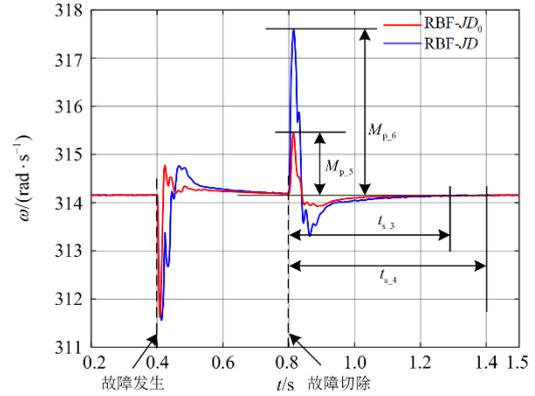


图 9 低压穿越下不同控制策略的系统频率的对比

Fig. 9 Comparison of system frequency under low-voltage ride through for different control strategies

图 10 显示了 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略在低压穿越情况下的输出有功功率波形对比。 M_{p_7} 、 M_{p_8} 分别表示 RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略的输出有功功率超调量。在 0.4 s 电网电压发生跌落时, 两种控制策略下的 VSG 有功功率都发生了波动, 在 0.8 s 电网电压恢复后, 有功功率逐渐恢复稳定。但相较于 RBF- JD 控制策略, RBF- JD_0 控制策略使得有功功率恢复时间更短, 有功波动幅值更小。

上述分析主要是从时域进行定性分析。为了更加准确地对比两种控制策略的优劣性, 本文选取频率的增量、有功功率的增量和系统恢复稳定的时间作为动态性能的定量分析指标。两种控制策略的分析指标如表 3 所示。RBF- JD_0 和 RBF- JD 控制策略在电网电压恢复稳定以后, 频率的超调量分别为

1.31 rad·s⁻¹、3.56 rad·s⁻¹，分别增加了 0.42%和 1.13%。有功功率的增量分别为 7068.74 W、8772.82 W，超调量分别为 70.69%和 87.73%。恢复稳定的时间分别为 0.47 s 和 0.60 s。因此，在低压穿越的情况下，由于引入了阻尼补偿量 ΔD ，相较于 RBF- JD 控制策略，RBF- JD_0 控制策略对系统输出有功功率和角频率超调量的抑制效果更加明显，并且系统的暂态恢复时间更短。

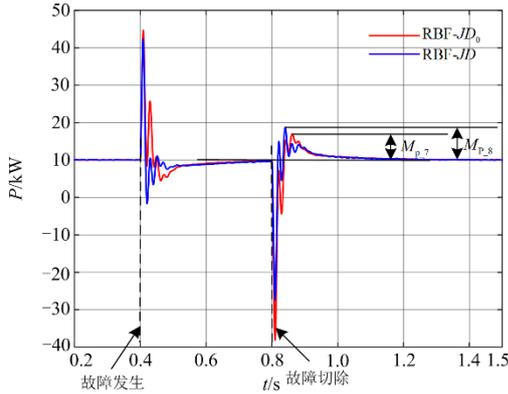


图 10 低压穿越下不同控制策略系统有功功率的对比
Fig. 10 Comparison of active power for different control strategies under low-voltage ride through

表 3 不同控制策略的分析指标

Table 3 Analysis indicators for different control strategies

控制策略	$\Delta P_{\max} / \text{kW}$	$\Delta \omega_{\max} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	t_s / s
RBF- JD_0	7068.74	1.31	0.47
RBF- JD	8772.82	3.56	0.60

如图 11 所示，在系统发生低压穿越的情况下，RBF- JD_0 控制策略下的虚拟惯量 J 和等效阻尼系数 D_0 都在合理范围内运行。当电网电压发生跌落时，能够迅速得到虚拟惯量 J 和等效阻尼系数 D_0 的合适取值，可以适应实时控制的要求，从而减小了 VSG 的频率和有功波动的幅值，缩短了系统恢复稳定的时间。

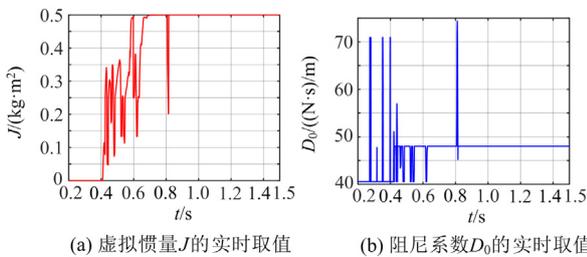


图 11 低压穿越下 J 和 D_0 的实时取值

Fig. 11 Real-time values of J and D_0 during low-voltage ride through

4 结论

针对固定阻尼补偿量的传统 VSG 控制策略存在灵活性较差，不能有效解决系统暂态稳定性和暂态恢复时间的问题，本文提出了基于 RBF 神经网络的虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制策略，实现了参数之间的解耦，使系统的阻尼随着系统频率的变化进行更加精确地动态调整。在有功功率发生波动和低压穿越两种工况下，本文对比验证了所提控制策略与基于 RBF 神经网络的虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略得到以下结论。

1) 在虚拟惯量和等效阻尼系数 D_0 共同调节 VSG 的有功和频率时，利用 RBF 神经网络简化了控制过程，实现了参数间的解耦。

2) 根据阻尼比、幅值裕度和相角裕度等约束条件，可以求解得到 VSG 的虚拟惯量和等效阻尼系数的具体取值范围。相较于固定阻尼补偿量，本文考虑了动态阻尼补偿，使参数的范围更加精确。

3) 相较于固定阻尼补偿量，只调节虚拟惯量和阻尼系数的传统 RBF 控制策略，本文在研究 VSG 的控制策略时自适应地调整阻尼补偿量 ΔD ，使得系统的阻尼随着系统频率的变化进行动态调整，进一步抑制了系统频率和输出有功功率的波动，缩短了系统恢复稳定所需的时间。

参考文献

[1] 张勇军, 羿应棋, 李立涅, 等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1-12.
ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.

[2] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.

[3] 肖先勇, 郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key

- techniques, and challenges[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(1): 47-59.
- [4] 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.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [5] 李颖, 鲍一鸣, 田雨, 等. 基于 VSG 的低压柔性直流系统连接串联补偿电网的稳定性分析[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(10): 51-59, 68.
- LI Ying, BAO Yiming, TIAN Yu, et al. Stability analysis of VSG-based low voltage flexible DC system connected to series compensation grid[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(10): 51-59, 68.
- [6] 王宪萍, 马津, 倪喜军, 等. 虚拟同步发电机的电网适应性控制策略研究[J]. *可再生能源*, 2022, 40(9): 1273-1278.
- WANG Xianping, MA Jin, NI Xijun, et al. Grid adaptive control strategy of virtual synchronous generator[J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(9): 1273-1278.
- [7] 孙佳航, 王小华, 黄景光, 等. 基于 MPC-VSG 的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(6): 51-60, 81.
- SUN Jiahang, WANG Xiaohua, HUANG Jingguang, et al. MPC-VSG based control strategy for dynamic stability of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. *Electric Power*, 2023, 56(6): 51-60, 81.
- [8] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 190-207.
- CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(4): 190-207.
- [9] 康思伟, 董文凯, 郭诗然, 等. 基于虚拟同步机控制的新能源发电并网系统小干扰稳定临界短路比[J]. *电力建设*, 2022, 43(3): 131-140.
- KANG Siwei, DONG Wenkai, GUO Shiran, et al. Critical short-circuit ratio of small-signal stability for a grid-connected renewable power generation system based on virtual synchronous generator control[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(3): 131-140.
- [10] 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.
- [11] LI Jin, WEN Buying, WANG Huaiyuan. Adaptive virtual inertia control strategy of VSG for micro-grid based on improved bang-bang control strategy[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 39509-39514.
- [12] YAO Fengjun, ZHAO Jinbin, LI Xiangjun, et al. RBF neural network based virtual synchronous generator control with improved frequency stability[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(6): 4014-4024.
- [13] 曾国辉, 廖鸿飞, 赵晋斌, 等. 直流微网双向 DC/DC 变换器虚拟惯量阻尼系数自适应控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6): 65-73.
- ZENG Guohui, LIAO Hongfei, ZHAO Jinbin, et al. A self-adaptive control strategy of virtual inertia and a damping coefficient for bidirectional DC-DC converters in a DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 65-73.
- [14] 殷桂梁, 董浩, 代亚超, 等. 光伏微网中虚拟同步发电机参数自适应控制策略[J]. *电网技术*, 2020, 44(1): 192-199.
- YIN Guiliang, DONG Hao, DAI Yachao, et al. Adaptive control strategy of VSG parameters in photovoltaic microgrid[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(1): 192-199.
- [15] 杨涛, 廖勇. 含双馈风电场的互联电力系统虚拟惯量与虚拟阻尼协调控制方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(11): 92-100.
- YANG Tao, LIAO Yong. Coordinated control method of virtual inertia and virtual damping for interconnected power system with doubly-fed wind farm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(11): 92-100.
- [16] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(11): 72-77.
- LI Dongdong, ZHU Qianwei, CHENG Yunzhi, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(11): 72-77.
- [17] 程子霞, 于洋, 柴旭峥. 基于协同自适应控制的光储 VSG 运行控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24): 79-85.
- CHENG Zixia, YU Yang, CHAI Xuzheng. Research on operation control of a photovoltaic system with storage VSG

based on cooperative adaptive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 79-85.

[18] 王亚军, 杨立波, 马斌, 等. 虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 88-98.

WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordination and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 88-98.

[19] 丁一凡, 季亮, 常潇, 等. 不对称电压跌落下虚拟同步机改进低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 76-85.

DING Yifan, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Improved low voltage ride-through control strategy of a virtual synchronous generator during unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 76-85.

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

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

[21] WANG Ren, CHEN Lajun, ZHENG Tianwen, et al. VSG-based adaptive droop control for frequency and active power regulation in the MTDC system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(3): 260-268.

[22] 刘钊汛, 秦亮, 杨诗琦, 等. 面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 1-15.

LIU Zhaoxun, QIN Liang, YANG Shiqi, et al. Review on virtual synchronous generator control technology of power electronic converter in power system based on new energy[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 1-15.

[23] 王振浩, 张越, 成龙, 等. 多参数协同自适应的改进虚拟同步控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2403-2413.

WANG Zhenhao, ZHANG Yue, CHENG Long, et al. Improved virtual synchronization control strategy with multi-parameter collaborative[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2403-2413.

[24] 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.

[25] 吴鸣, 吕志鹏, 秦岭, 等. 变电网运行条件下虚拟同步发电机鲁棒控制参数设计[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3743-3753.

WU Ming, LÜ Zhipeng, QIN Ling, et al. Robust control parameter design for virtual synchronous generator under variable operation conditions of grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3743-3753.

[26] WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.

[27] 伍文华, 陈燕东, 周乐明, 等. 虚拟同步发电机接入弱电网的序阻抗建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1560-1571, 1853.

WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability analysis for virtual synchronous generator connected to the weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1560-1571, 1853.

[28] 陶亮, 程军照, 王文玺, 等. 虚拟同步发电机参数设计及优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 128-135.

TAO Liang, CHENG Junzhao, WANG Wenxi, et al. Methods of parameter design and optimization in virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 128-135.

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-12-05

作者简介:

张子星(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为虚拟同步发电机与新能源并网技术; E-mail: a792563zzx@163.com

赵晋斌(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子电路、装置与系统, 电力电子电路的智能化及模块化技术, 现代电力电子技术在电力系统中的应用, 新能源发电技术, 无线电能传输技术。E-mail: zhaojinbin@shiep.edu.cn

(编辑 姜新丽)