

基于BP神经网络的储能VSG参数自适应优化策略^{*}

刘维莎 石荣亮 周其锋 钟志贤

(广西高校先进制造与自动化技术重点实验室(桂林理工大学) 桂林 541006)

摘要: 为改善传统虚拟同步发电机系统参数设计复杂及应对有功指令阶跃时的并网有功动态振荡问题,提出一种基于BP神经网络的储能VSG参数自适应优化策略。首先,阐述储能VSG的工作原理及其特性,分析虚拟惯量与虚拟阻尼对其并网有功动态响应特性的影响并确定参数的取值范围;其次,引入具有良好非线性映射性能的BP神经网络,将其应用于储能VSG参数自适应设计中,实现虚拟惯量和虚拟阻尼系数的实时动态调整,进而优化有功动态响应性能;最后,实验结果表明在有功指令突变工况下所述控制策略较固定参数VSG控制策略有功功率超调量从45%下降至2.5%,调节时间减少了0.89 s,输出频率幅值降低了0.1 Hz,这充分体现了所述策略的有效性和优越性。

关键词: 虚拟同步电机;虚拟惯量;虚拟阻尼系数;BP神经网络;自适应控制

中图分类号: TN830;TM712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Parameter adaptive optimization strategy of energy storage VSG
based on BP neural network

Liu Weisha Shi Rongliang Zhou Qifeng Zhong Zhixian

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology (Guilin University of Technology),
Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541006, China)

Abstract: To improve the complex parameter design of traditional virtual synchronous generator (VSG) system and deal with the dynamic oscillation of grid-connected active power during the step of active power instruction, an adaptive optimization strategy on parameters of energy storage VSG based on BP neural network is proposed. Firstly, the working principle and characteristics of the energy storage VSG are described, and the influence of virtual inertia and virtual damping on dynamic response characteristics of the grid-connected active power is analyzed to determine the range of parameters. Secondly, BP neural network with nonlinear mapping performance is introduced and applied to the adaptive design of energy storage VSG parameters to realize real-time dynamic adjustment of virtual inertia and virtual damping parameters, and then optimize the dynamic response performance of active power. Finally, the experimental results show that the active power overshoot of the control strategy is reduced from 45% to 2.5%, the adjustment time is reduced by 0.89 s, and the amplitude of the output frequency is reduced by 0.1 Hz compared with the fixed parameter VSG control strategy under the condition of sudden change of active power instruction, which fully reflects the effectiveness and superiority of the strategy.

Keywords: virtual synchronous generator; virtual inertia; virtual damping coefficient; BP neural network; adaptive control

0 引言

在我国“双碳”战略目标下,以太阳能、风力发电为主的新能源发电备受瞩目,而新能源发电一般通过电力电子逆变器并入电网,这些逆变器难以为电网提供阻尼和惯性支撑,将对电网的稳定运行带来严峻挑战^[1-2]。在此背景下,

储能虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的控制及其应用受到广泛关注^[3-4]。储能VSG通过模拟传统同步发电机(synchronous generator, SG)的运行外特性,使并网逆变器具有一定的虚拟惯量和虚拟阻尼支撑能力,有利于抑制频率波动、增强系统稳定性,但不可避免地引入类似于传统SG的并网有功动态振荡问题^[5-6]。

收稿日期:2024-10-14

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52467022)、广西壮族自治区研究生教育创新计划项目(YCSW2024372)资助

由于虚拟惯量和虚拟阻尼系数是储能VSG技术的核心参数,因此如何调整储能VSG控制参数以提高系统动态与稳态响应性能成为当下研究的热点^[7]。文献[8]通过基于Bang-Bang控制的虚拟惯量自适应调节方法来提高系统的动态响应性能,但虚拟惯量的值在每个振荡周期切换4次,参数频繁断续切换给VSG系统的稳定运行带来了挑战。文献[9]提出了一种自适应调节虚拟惯量的VSG控制策略,能有效抑制系统有功功率的动态振荡,但在负载扰动工况下的系统频率易出现新的振荡现象。文献[10]对VSG系统虚拟惯量和虚拟阻尼系数均采用自适应控制方法,提高了频率稳定性,但未给出自适应参数的限制范围。文献[11]将虚拟阻抗控制策略与自适应控制策略相结合,改善了系统的频率响应特性,但仅考虑了虚拟阻抗在优化VSG频率调节中的应用,未考虑自适应参数对系统稳定性的影响。文献[12]利用改进粒子群算法确定自适应虚拟惯量控制策略的初始值,提高了VSG并网系统的稳定性,但牺牲了动态响应速度。文献[13]提出一种基于VSG的接口变换器参数模糊自适应控制策略,提升了VSG并网系统在面对有功指令扰动时的动态调节性能,但模糊规则仅由人工经验决定。文献[14]利用输出角频率反馈控制调节VSG并网系统的动态阻尼,改善了电网频率调节的暂态性能,同时抑制了有功超调,但在虚拟惯量和虚拟阻尼系数自适应调节过程中易出现尖刺现象。文献[15-16]均利用智能算法对VSG的虚拟惯量、虚拟阻尼参数进行优化,但均存在结构复杂、实现难度大的缺点。

鉴于此,本文提出了一种基于BP神经网络的储能VSG参数自适应优化策略。首先,介绍储能VSG的控制原理,分析虚拟惯量和虚拟阻尼系数对并网有功动态响应的影响,并确定参数的取值范围。其次,考虑虚拟惯量、虚拟阻尼系数与频率、有功功率是非线性关系,而BP神经网络具有优良的非线性映射性能,故本文分析了BP神经网络的原理并将其应用于储能VSG并网系统参数自适应设计中,实现虚拟惯量和虚拟阻尼系数的实时动态调整进而优化并网有功的动态响应性能,消除了自适应过程中由于频率变化不平稳造成的参数尖刺现象。最后,通过MATLAB仿真以及硬件实验对比测试,验证所述自适应优化策略在抑制储能VSG并网有功动态振荡方面的有效性与优越之处。

1 储能VSG的数学模型与特性分析

基于超级电容的电梯能量存储系统结构及原理:

基于BP神经网络的储能VSG控制结构如图1所示^[17]。储能VSG并网电路拓扑包括储能系统、逆变器、滤波电路、电网侧等效阻抗和无穷大电网。储能VSG的控制部分包括一次调压、转子运动方程、电压-电流双环控制、SVPWM调制、BP神经网络等模块。本文的控制策略将储能VSG的输出角频率 ω 及其变化率 $d\omega/dt$ 作为输入,经过

BP神经网络后输出可以自适应调节的虚拟惯量 J 和虚拟阻尼系数 D ,返回后的 J 、 D 参数通过VSG的控制部分最终实现储能VSG并网,并完成整个闭环控制。

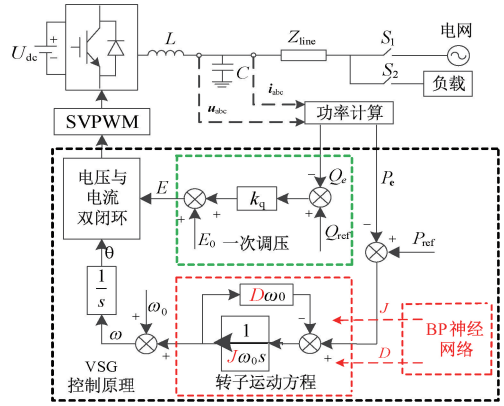


图1 基于BP神经网络的储能VSG控制结构图
Fig. 1 Diagram of energy storage VSG control structure in BP neural network

图1中, U_{dc} 代表具有稳压功能的储能电池; u_{abc} 为储能VSG逆变器三相输出电压; i_{abc} 为储能VSG逆变器三相输出电流; S_1 、 S_2 分别为并网开关、负载开关; L 、 C 分别为逆变器的滤波电感、滤波电容; Z_{line} 为等效阻抗; Q_c 为并网无功; P_e 为并网有功; Q_{ref} 为无功指令; P_{ref} 为有功指令; E_0 为额定电压幅值; E 为输出电压幅值; ω_0 为额定角频率; k_q 为一次调压参数。

储能VSG的转子运动方程为:

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

电网电压和逆变器输出电压之间的等效阻抗一般呈感性,因此储能VSG的并网有功 P_e 为:

$$P_e = \frac{3U_g E}{2X} \sin\delta \approx \frac{3U_g E}{2X} \delta = K\delta = K \frac{\omega - \omega_0}{s} \quad (2)$$

式中: δ 为功角; U_g 与 X 依次为电网电压幅值与线路等效感抗; $K = 1.5U_g E/X$ 为同步电压系数。在忽略储能VSG的电压-电流双环动态响应特性对其有功-频率外环影响的条件下,结合式(1)和(2)可得到储能VSG并网有功闭环等效控制框图,如图2所示^[18]。

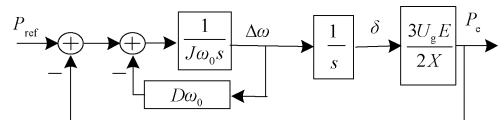


图2 储能VSG并网有功闭环等效控制框图
Fig. 2 Block diagram of grid-connected active closed loop equivalent control for energy storage VSG

根据图2可发现,储能VSG的 P_e 动态振荡问题主要受 P_{ref} 扰动的影响,且 $\Delta P_{ref} \sim \Delta P_e$ ($\Delta P_e = P_e - P_{ref}$)的闭环传递函数可列写为:

$$G_P(s) = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_{ref}} = \frac{K}{J\omega_0 s^2 + D\omega_0 s + K} \quad (3)$$

根据式(3)可发现,储能 VSG 并网有功闭环等效控制系统在引入 J 后变成一个二阶振荡系统,即其 P_e 在 P_{ref} 发生扰动时将易存在动态振荡与功率超调。式(3)所描述二阶振荡系统的特征参数分别为:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K}{J\omega_0}} \\ \xi = \frac{D\omega_0}{2} \sqrt{\frac{1}{KJ\omega_0}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_n 与 ξ 分别为系统的自然振荡角频率及其阻尼比。由式(4)可知, ω_n 与 ξ 将随着 J 取值的增大而同时减小,这表明了储能 VSG 系统的有功响应速度将随之变慢且动态振荡将随之加剧。此外, ξ 将随着 D 取值的增大而增大,这表明了储能 VSG 系统的有功动态振荡将随着 D 增大而减小。

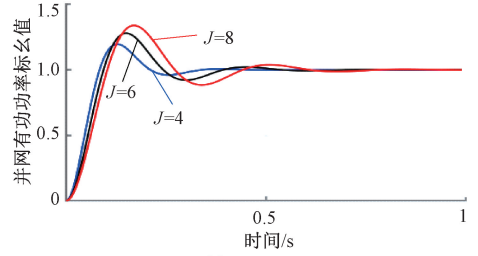
为了验证参数 J 、 D 对系统动态响应特性的影响,将表 1 中给出的系统参数代入式(3)即可绘制出储能 100 kVA-VSG 系统在参数变化下的并网有功动态响应结果、并网有功闭环系统的根轨迹图依次如图 3(a)、(b)所示。

表 1 储能 100 kVA-VSG 的系统参数

Table 1 System parameters of energy storage 100 kVA-VSG

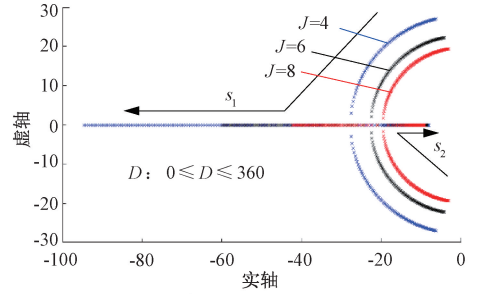
参数名称	数值	参数名称	数值
隔离变压器/V	270:400	线路阻抗 X/Ω	0.15
额定电压/V	380	一次调压系数 k_q	1.4×10^{-4}
额定频率/Hz	50	电压环比例系数	750
采样频率/kHz	5	电压环积分系数	50.6
滤波电感/mH	0.56	电流环比例系数	0.93
滤波电容 $C/\mu F$	270	输出电压幅值 E/V	311

图 3(a)中,令 $D=51.4$, $J=(4,6,8) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。图 3(b)中,令 D 按变化步长为 3 从 0 增加至 360, $J=(4,6,8) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。由图 3(a)可知,当 D 保持不变, J 的取值增大时, P_{ref} 阶跃情况下 P_e 的超调量增大,调节时间变长。由图 3(b)可知,一方面随着 J 取值增大,并网系统的极点向虚轴靠近,即 P_{ref} 阶跃情况下 P_e 的超调量增大,调节时间变长,能够跟图 3(a)中的理论分析结果保持对应;另一方面随着 D 取值增大,系统的共轭极点 s_1, s_2 向靠近实轴的方向移动并最终变为两个负实数极点,即 P_{ref} 阶跃情况下 P_e 的超调量减小,但由于虚拟阻尼系数 D 与一次调频系数之间的耦合关系, P_e 在电网频率偏离 ω_0 时的稳态误差也增大。因此,储能 VSG 并网系统有功的动、稳态响应性能将由 J 和 D 共同决定,即储能 VSG 并网系统若采用固定的 J 、 D 参数将难以确保其有功既具有优良的动态特性又具有良好的稳态性能^[19]。



(a) $D=51.4$ 不变, $J=(4, 6, 8) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

(a) $D=51.4$ unchanged, $J=(4, 6, 8) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$



(b) D 变化, $J=(4, 6, 8) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

(b) D variation, $J=(4, 6, 8) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

图 3 储能 100 kVA-VSG 的并网有功动态响应性能

Fig. 3 Grid-connected active dynamic response of the energy storage 100 kVA-VSG

2 虚拟惯量和虚拟阻尼系数参数整定

通过上文分析储能 VSG 的控制原理及响应特性可知, J 与 D 共同影响着 P_e 的动态与稳态响应特性。因此,将 J 、 D 限制在适当的范围内是至关重要的。根据[20]中提出的储能 VSG 控制参数设计, J 的取值应满足:

$$J \leq \frac{P_{\max}}{\max\left(\left|\omega \frac{d\omega}{dt}\right|\right)} \approx \frac{P_{\max}}{\max\left(\left|\omega_0 \frac{d\omega}{dt}\right|\right)} \quad (5)$$

式中: $P_{\max}$ 为储能 VSG 输出有功的最大值,且本文设计储能 VSG 的额定容量为 100 kVA,故 J 的最大值可根据系统所要求满足的 $|\omega \frac{d\omega}{dt}|$ 进行合理性选择。

根据我国的电网标准 GB/T15945,逆变器正常工作条件下其偏差应在 $\pm 1\%$ 以内,即 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ ^[21]。考虑输出角频率的极限,储能 VSG 的 D 应满足:

$$D \geq \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\omega_0 (\omega_{\max} - \omega_{\min})} \quad (6)$$

式中: $P_{\min}$ 为储能 VSG 输出有功的最小值; $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 为输出角频率的最大值和最小值。根据式(6)可求得 $D \geq 50.66$ 。此外,将式(4)进行等效变换可求得:

$$J = \frac{\omega_0 X D^2}{6\xi^2 U_g E} \quad (7)$$

式中: X 为线路等效感抗。为保证储能 VSG 并网系统具备良好的动态响应性能,通常将系统阻尼比 ξ 设置为 $\xi \in [0.7, 1.0]$,并结合式(6)和(7)可得:

$$J \geq \frac{\omega_0 X \left(\frac{P_{\max} - P_{\min}}{\omega_0 (\omega_{\max} - \omega_{\min})} \right)^2}{6\xi^2 U_g E} \quad (8)$$

由式(8)与表1中的参数,可得 $J \geq 0.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

3 基于BP的储能VSG参数自适应策略

当储能VSG系统中出现随机扰动时,由于虚拟惯量 J 和虚拟阻尼系数 D 与频率之间为非线性关系,固定的 J 和

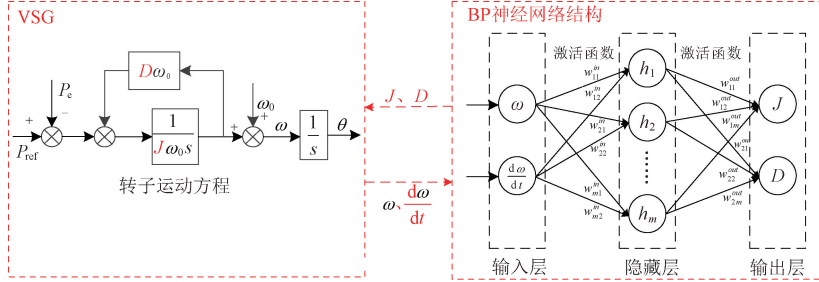


图4 基于BP神经网络的储能VSG参数自适应优化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the parameter adaptive optimization for energy storage VSG based on BP neural network

步骤2)计算隐藏层中第 i 个神经元 h_i 的输入值 h_i^{in} 与输出值 h_i^{out} ;

$$h_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^n (\omega_{ij}^{\text{in}} \times x_j + b_1) \quad (9)$$

$$h_i^{\text{out}} = f^{\text{in}}(h_i^{\text{in}})$$

式中: n 为输入层神经元数量, ω_{ij}^{in} 为隐藏层权重, b_1 为隐藏层偏置, $f^{\text{in}}(\cdot)$ 为隐藏层的激活函数,采用 sigmoid 函数,如式(10)所示。

$$f^{\text{in}}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (10)$$

步骤3)计算输出层第 i 个神经元 y_i 的输入量 y_i^{in} 与输出量 y_i^{out} ;

$$y_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^m (\omega_{ij}^{\text{out}} \times h_j + b_2) \quad (11)$$

$$\begin{cases} J = y_i^{\text{out}} = f^{\text{out}}(y_i^{\text{in}}), & i = 1 \\ D = y_i^{\text{out}} = f^{\text{out}}(y_i^{\text{in}}), & i = 2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: m 为隐藏层神经元数量, ω_{ij}^{out} 为输出层权重, b_2 为输出层偏置, $f^{\text{out}}(\cdot)$ 为输出层的激活函数,采用 sigmoid 函数。

步骤4)采用文献[22]的方法计算性能指标函数 $E(k)$ 。

$$E(k) = \frac{1}{k} (\omega_0(k) - \omega(k))^2 \quad (13)$$

式中: k 为输出层的神经元数量。

步骤5)采用的梯度下降法训练神经网络,更新权值。

$$\begin{cases} w' = w - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial w} \\ b' = b - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial b} \end{cases} \quad (14)$$

D 难以达到理想的控制效果。而BP神经网络是一种多层前馈神经网络,可以根据期望信号和实际信号的误差在线调整网络权值,从而实现虚拟惯量 J 和虚拟阻尼系数 D 的实时动态调节。基于BP神经网络的储能VSG参数自适应优化示意图如图4所示。图4中,输入层包含 ω 和 $d\omega/dt$ 两个变量,隐藏层共有 m 个神经元,输出层包含 J 和 D 两个量,具体的计算步骤如下:

步骤1)导入输入变量,输入层中第 i 个神经元为 x_i ;

式中: w' 、 b' 为更新后的权重与偏置, η 为学习率。

将上述BP神经网络应用于储能VSG参数的优化过程中,得到如图5所示的基于储能VSG系统的BP神经网络流程图。由图5可知,结合储能VSG系统的BP神经网络优化策略整体思路为:首先取虚拟惯量、虚拟阻尼系数在设计范围内的一组初值 J_0 、 D_0 ;然后通过 J_0 、 D_0 及式(1)所描述的转子运动方程来选定储能VSG角频率初

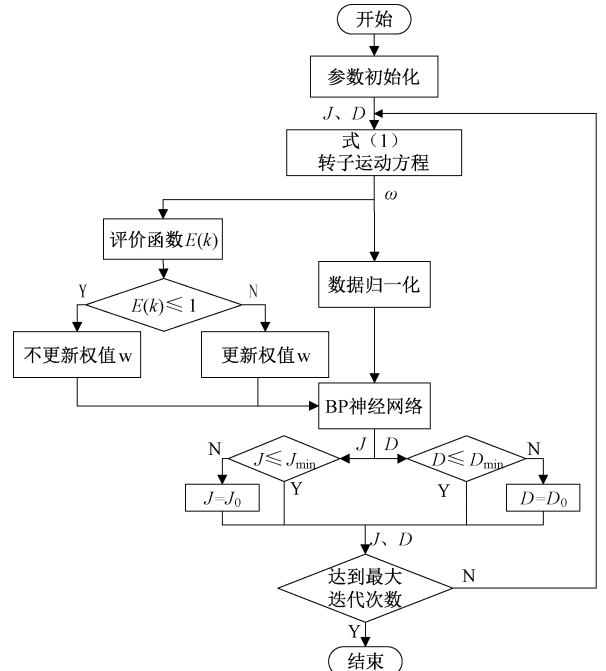


图5 基于储能VSG系统的BP神经网络流程图

Fig. 5 BP neural network flow chart based on VSG system of energy storage

始值;然后依据式(13)所表示的性能指标函数 $E(k)$ 确定权值是否需要更新,随即自适应调整虚拟惯量 J 、虚拟阻尼系数 D ;最后将经过自适应调整后的 J 与 D 取值返回至式(1),即可实现 J 与 D 参数的自适应闭环控制。

4 仿真与实验验证对比结果

4.1 仿真验证对比结果及其分析

为了对比验证采用 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略与固定 J 、 D 控制策略下的 P_e 。在 P_{ref} 发生有功功率指令阶跃扰动工况下的动态、稳态响应性能,本文基于图 1 所示的储能 100 kVA-VSG 控制结构利用 Matlab/Simulink 软件搭建仿真平台。其中,根据现行国家标准 GB/T 38983.1-2020《虚拟同步机第 1 部分:总则》的参数设计要求,对于额定容量为 100 kVA 的 VSG(100 kVA-VSG)而言,其虚拟惯量和虚拟阻尼参数的初始值可分别设置为 $J_0=6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $D_0=50.66$,其他仿真参数与表 1 一致。仿真测试时间为 6 s,初始时刻并网有功指令为 20 kW,在 3 s 时令有功指令阶跃至 60 kW,用于模拟实际电力系统中有功功率需求突变时的场景。

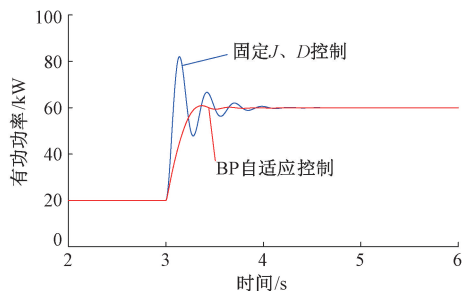
图 6 为固定 J 、 D 控制策略和 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略下的仿真验证对比结果。由图 6(a)可知,当 P_{re} 突增时,采用固定 J 、 D 控制策略和 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略下的有功功率超调量分别为 36.6% 和 1.5%;调节时间分别为 1.13 s 和 0.64 s。由图 6(b)可知,当 P_{re} 突增时,采用固定 J 、 D 控制策略和 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略下输出频率的最大幅值分别为 50.11 Hz 和 50.04 Hz。这说明 BP 神经网络 J 、 D 自适应控制相较于固定 J 、 D 控制缩短了调节时间,并大大降低了有功功率和频率的超调量。

图 7 为仿真时虚拟惯量 J 和虚拟阻尼系数 D 的自适应曲线。由图 7 可知,当系统出现有功功率波动时,BP 神经网络 J 、 D 自适应控制下的虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 均在设计范围内运行。综上,BP 神经网络可以实时动态调节 J 、 D ,从而有效抑制有功功率和频率振荡,提高系统暂态稳定性和动态响应性能。

4.2 实验验证对比结果及其分析

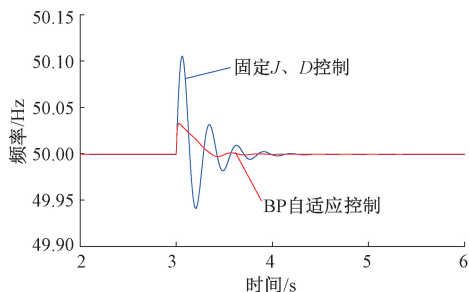
为了进一步对比验证储能 100 kVA-VSG 采用 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略与固定 J 、 D 控制策略下其 P_e 在 P_{ref} 阶跃下的动稳态响应特性,文中在如图 8 所示的储能微网系统硬件平台上进行实验测试。图 8 中主要包括 2 台储能 100 kVA-VSG,2 台能够提供稳定直流电压的 100 kVA 蓄电池模拟器,以及 1 套可投切的 250 kW 电阻负载箱等^[17]。储能 100 kVA-VSG 的实验参数采用表 1 与 4.1 节中的仿真参数。实验测试时间为 8 s,初始时刻并网有功指令为 20 kW,在 5 s 时令有功指令阶跃至 60 kW。

有功指令扰动下的实验对比结果如图 9 所示。由图 9(a)和(b)所给出的实验对比结果可看出,当 P_{re} 突增



(a) 不同控制策略下有功功率对比结果

(a) Comparison results of active power under different control strategies

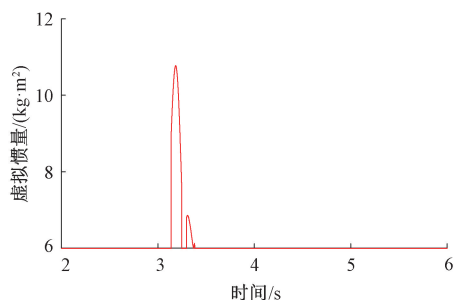


(b) 不同控制策略下频率对比结果

(b) Comparison Results of frequency under different control strategies

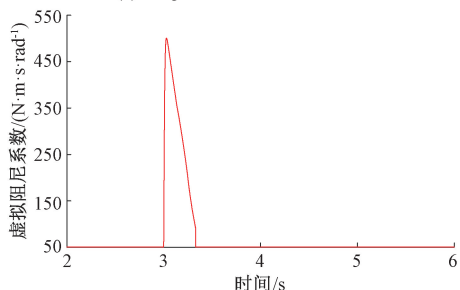
图 6 不同控制策略下的仿真对比结果

Fig. 6 Simulation comparison results under different control strategies



(a) 虚拟惯量 J 的自适应曲线

(a) Adaptive curve of virtual inertia J



(b) 虚拟阻尼系数 D 的自适应曲线

(b) Adaptive curve of virtual damping coefficient D

图 7 J 和 D 的自适应曲线

Fig. 7 Adaptive curves of J and D

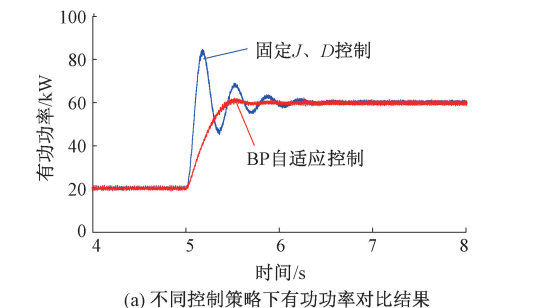
时,采用固定 J 、 D 控制策略和 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略下的有功功率超调量分别为 40.5% 和 2.5%;调节时间分别为 1.56 s 和 0.67 s。采用固定 J 、 D 控制策略和 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略下输出频率的最大



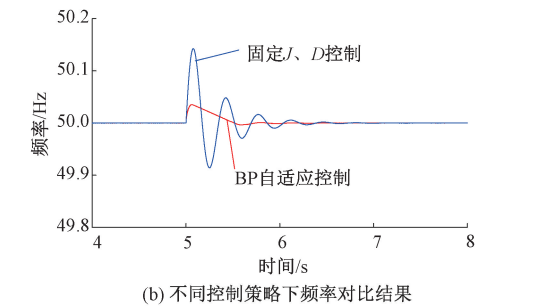
图8 储能微网系统硬件平台

Fig.8 Energy storage microgrid system hardware platform

幅值分别为 50.14 Hz 和 50.04 Hz。这说明 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略能有效抑制有功功率和频率动态振荡并缩短了系统恢复稳定的时间。



(a) Comparison results of active power under different control strategies

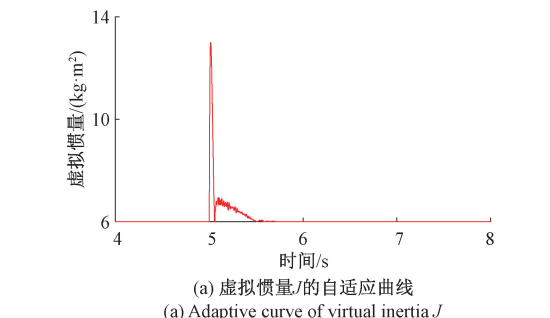
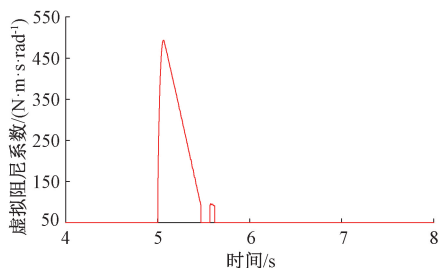


(b) Comparison results of frequency under different control strategies

图9 100 kVA-VSG 的实验验证对比结果

Fig.9 Experimental comparison results under different control strategies

图10为实验时虚拟惯量 J 和虚拟阻尼系数 D 的自适应曲线。由图10可知,当有功指令突变时,BP神经网络能迅速输出合适的 J 、 D 的值,满足实时控制的要求,进而抑

(a) Adaptive curve of virtual inertia J (b) Adaptive curve of virtual damping coefficient D 图10 J 和 D 的自适应曲线Fig.10 Adaptive curves of J and D

制有功功率和频率的动态振荡与超调,使系统更快到达稳定状态。

综上所述,仿真与实验共同验证了能实时调节的 BP 神经网络 J 、 D 自适应优化策略较固定 J 、 D 控制策略能更有效抑制有功功率和频率动态振荡,缩短调节时间,以提高系统的动稳态性能。

5 结 论

本文在分析 J 和 D 参数对储能 VSG 并网系统有功响应性能影响的基础上,引入具有非线性特性的 BP 神经网络对参数进行自适应调节,实现虚拟惯量和虚拟阻尼系数的实时动态调整,提出了一种基于 BP 神经网络的储能 VSG 参数自适应优化策略。并在有功指令阶跃工况下对所述控制策略进行仿真与实验对比验证。根据仿真与实验对比结果验证基于 BP 神经网络的储能 VSG 参数自适应优化策略对比固定参数控制策略能保证稳定的功率和频率输出,有效抑制了有功和频率振荡并缩短了调节时间,提高了系统的稳定性和快速性。

参考文献

- [1] 张赞宁,孙想亮,付文龙,等. 参数协调模糊自适应 VSG 控制策略[J]. 电子测量技术, 2022, 45(21): 1-7.
ZHANG Y N, SUN X L, FU W L, et al. Parameter coordination fuzzy adaptive VSG control strategy[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(21): 1-7.
- [2] GROVER H, SHARMA S, VERMA A, et al. Adaptive parameter tuning strategy of VSG-based islanded microgrid under uncertainties [J]. Electric Power Systems Research, 2024, 235(10): 1108-1119.
- [3] YAO W L, PEI CH B, CHI R H, et al. Presynchronization control for ship microgrid of merchant marine inverters based on VSG algorithm with MFAC [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2024, 46(10): 1858-1870.

- [4] LU SH Y, ZHU Y, DONG L H, et al. Small-signal stability research of grid-connected virtual synchronous generators [J]. *Energies*, 2022, 15 (19), DOI: 10.3390/EN15197158.
- [5] 程启明, 沈章平, 程尹曼, 等. 基于虚拟同步发电机和无源性控制的 DFIG 机侧控制策略[J]. *电子测量与仪器报*, 2023, 37(3): 141-151.
CHENG Q M, SHEN ZH P, CHENG Y M, et al. Virtual synchronous generator and PBC based cascaded control for DFIG rotor-side converter[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(3): 141-151.
- [6] 任光照, 马家庆, 吴钦木, 等. 新能源逆变系统中 VSG 控制时随机激励的谐波抑制研究[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(12): 48-53.
REN G ZH, MA J Q, WU Q M, et al. Research on harmonic suppression with random excitation for VSG control in new energy inverter system[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(12): 48-53.
- [7] 兰才华, 石荣亮, 王国斌, 等. 基于频率前馈补偿的储能 VSG 并网有功响应优化策略[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(2): 236-243.
LAN C H, SHI R L, WANG G B, et al. Optimization strategy of grid-connected active power response of grid-connected active of energy storage VSG based on frequency feedforward compensation[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2024, 45(2): 236-243.
- [8] 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.
- [9] MENG J H, WANG Y, PENG J L, et al. Flexible virtual synchronous generator control for distributed generator with adaptive inertia[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2019, 47(1-2): 128-140.
- [10] LI D D, ZHU Q W, LIN SH F, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(1): 397-398.
- [11] REN M W, LI T, SHI K, et al. Coordinated control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive moment of inertia and virtual impedance[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2021, 11(1): 99-110.
- [12] 卢盛阳, 朱钰, 陈涛, 等. 基于改进粒子群算法的阻尼惯量自适应控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(4): 68-75.
LU SH Y, ZHU Y, CHEN T, et al. Adaptive control strategy of damping inertia based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(4): 68-75.
- [13] 黄新宇, 梁泉, 陈先福, 等. 基于 VSG 的接口变换器参数模糊自适应控制策略[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2024, 49(2): 360-373.
HUANG X Y, LIANG Q, CHEN X F, et al. Fuzzy adaptive control strategy for interface converter parameter based on VSG[J]. *Journal of Guangxi University(Natural Science Edition)*, 2024, 49(2): 360-373.
- [14] 任海鹏, 陈琦, 张亮亮, 等. 虚拟同步发电机参数自适应调节[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(12): 2571-2580.
REN H P, CHEN Q, ZHANG L L, et al. Parameter adaptive strategy for virtual synchronous generator control[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(12): 2571-2580.
- [15] 段玉, 朱子民, 王小云, 等. 基于改进粒子群算法的自适应构网型变流器控制策略[J]. *广东电力*, 2024, 37(2): 10-17.
DUAN Y, ZHU Z M, WANG X Y, et al. Adaptive grid-type converter control strategy based on improved particle swarm algorithm [J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(2): 10-17.
- [16] LI J, WEN B Y, WANG H Y. Adaptive virtual inertia control strategy of VSG for micro-grid based on improved Bang-Bang control strategy [J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 39509-39514.
- [17] 石荣亮, 兰才华, 王国斌, 等. 基于有功前馈补偿的储能 VSG 并网有功振荡抑制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(14): 118-126.
SHI R L, LAN C H, WANG G B, et al. Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(14): 118-126.
- [18] SHI R L, LAN C H, DONG ZH, et al. An active power dynamic oscillation damping method for the

grid-forming virtual synchronous generator based on energy reshaping mechanism [J]. Energies, 2023, 16(23): 7723.

[19] SHI R L, LAN C H, HUANG J, et al. Analysis and optimization strategy of active power dynamic response for VSG under a weak grid [J]. Energies, 2023, 16(12): 4593.

[20] GAO X, ZHOU D, MOGHADDAM A A, et al. An adaptive control strategy with a mutual damping term for paralleled virtual synchronous generators system [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 38:101308.

[21] 程静,胡健雄,王维庆,等. 基于虚拟同步机的风-光-储并网系统自适应功频控制策略[J]. 现代电力, 2024, 41(5): 878-885.

CHENG J, HU J X, WANG W Q, et al. Adaptive power frequency control strategy for wind/photovoltaics/storage grid connected system based on virtual synchronizer generator [J]. Modern Electric Power, 2024, 41(5): 878-885.

[22] 张子星,赵晋斌,曾志伟,等. 基于 RBF 的 VSG 虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2):155-164.

ZHANG Z X, ZHAO J B, ZENG ZH W, et al. VSG virtual inertia and dynamic damping compensation adaptive control based on RBF [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 155-164.

作者简介

刘维莎,硕士研究生,主要研究方向为电梯能量回馈及其利用控制技术。
E-mail:1293655434@qq.com

石荣亮(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为新能源利用与分布式发电技术。
E-mail:shirl163@163.com