基于纵横交叉算法的储能系统自适应控制策略

任萱[1]，陈通[1]，董立志[2]，黄灵通[1]，张明霞[2]
（1.国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司，江苏 镇江 212000；
2.中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘要：大量储能设备通过虚拟同步机（VSG）并入电网时，传统固定惯量和阻尼控制策略中，控制参数选取不当会造成调节时间长或超调量大，且无法充分发挥VSG控制灵活的优势。为此，提出了基于纵横交叉（CSO）算法的储能系统自适应控制策略，首先，建立了储能系统VSG系统，将储能VSG系统频率的误差与电压总谐波畸变率之和的最小值作为CSO的目标函数，并引入电池的荷电状态（SOE）约束求解最佳惯量以及阻尼，该算法收敛速度更快且有效地规避了参数局部解。在此基础上，设计一种改进的惯量阻尼自适应控制策略，有效地改善了VSG的动态性能。最后，通过Matlab/Simulink搭建仿真模型，验证了所提策略的有效性。

关键词：储能系统；虚拟同步机；惯量阻尼自适应控制；电池荷电状态；纵横交叉算法
中图分类号：TM619 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd25258

Adaptive Control Strategy for Energy Storage Systems Based on Crisscross Optimization Algorithm

REN Xuan[1]，CHEN Tong[1]，DONG Lizhi[2]，HUANG Lingtong[1]，ZHANG Mingxia[2]
（1. *State Grid Jiangsu Electric Power Co.，Ltd. Zhenjiang Power Supply Branch，Zhenjiang* 212000，*Jiangsu*，*China*；2. *China Electric Power Research Institute Co.，Ltd.，Beijing* 100192，*China*）

Abstract：When a large number of energy storage devices are integrated into the power grid through a virtual synchronous generator（VSG），improper selection of control parameters in traditional fixed inertia and damping control strategies can lead to long adjustment times or large overshoot，and fail to fully leverage the flexible advantages of VSG control. To address this issue，an adaptive control strategy for energy storage system based on the crisscross optimization（CSO）algorithm was proposed. Firstly，the VSG model of the energy storage system was established，and the minimum value of the sum of the frequency error of the VSG system and the total harmonic distortion of the voltage was taken as the objective function of CSO. The battery state of energy（SOE）constraint was introduced to solve the optimal inertia and damping. This algorithm has a faster convergence speed and effectively avoids parameter local solutions. On this basis，an improved inertia and damping adaptive control strategy was designed to effectively improve the dynamic performance of VSG. Finally，the effectiveness of the proposed strategy was verified by building a simulation model using Matlab/Simulink.

Key words：energy storage system；virtual synchronous generator（VSG）；adaptive control of inertia and damping；state of energy（SOE）of batteries；crisscross optimization（CSO）algorithm

为了解决“环境污染”、“能源紧缺”的问题，推进国家“双碳战略”落地，新型储能得到大力发展。大量电化学储能设备通过电力电子装置并网，电力电子装置不同于传统的旋转设备，具有无转动惯量的特点，导致电力系统的整体惯性大幅度下降，影响电力系统的稳定性[1]。虚拟同步机（virtual synchronous generator，VSG）是当前改善逆变器的动态稳定性的方案。众多学者对虚拟同步机进行了大量的研究，其主要的思想是逆变器模拟同步机的运行特性，为分布式电源提供惯性和阻尼支撑[2]。文献[3]通过建立VSG的小信号模型，提出了设计VSG控制参数的方法，将VSG更广泛地应用于储能系统中。文献[4]通过考虑蓄电池模型，提出了一种优化虚拟同步电机下垂系数的控制策略。但并未兼顾系统的稳定性能。文献[5]将蓄电池的SOC边界条件考虑到

基金项目：国网江苏省电力有限公司科技项目（J2022112）
作者简介：任萱（1973—），女，硕士，研究员级高级工程师，主要研究方向为大规模储能运行控制技术研究，Email：zj_rx@is.sgcc.com.cn

虚拟同步机系统中,但对于提升储能系统下的虚拟同步机的性能的工作尚未进行。文献[6]提出一种基于储能协调的虚拟同步机的控制策略,但是在参数整定设计上存在不足。

近年来,随着人工智能技术的不断发展,人工智能技术逐渐应用到优化VSG的性能中[7-10]。文献[7]首次在虚拟同步机中引入粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)算法,实现了对VSG的控制参数的优化。文献[8]结合粒子群算法和天牛须算法优化得到VSG的最佳惯量和阻尼。文献[9]提出了一种淘汰粒子群优化算法,增强了粒子群算法对VSG控制参数的寻优能力。文献[10]对粒子群算法的惯性权重以及目标函数加以改进,更进一步提升了粒子群算法寻优能力。然而,粒子群算法自身存在一定的缺陷。文献[11]首次提出一种纵横交叉优化(crisscross optimization,CSO)算法,该算法能够实现全局并行搜索且迭代次数更少,在电力系统中得到广泛的应用。文献[12]将纵横交叉算法应用到电力市场的电价预测中。文献[13]将纵横交叉算法应用到直流微电网中并有效优化系统参数。然而现阶段,尚未有文献将纵横交叉算法应用到虚拟同步机中。

智能优化算法通过不断迭代VSG的参数,寻找最优参数应用到VSG系统中,然而VSG动态响应优化也同等重要。文献[14]首次提出自适应控制算法应用于虚拟同步机中。文献[15]提出了一种改进的自适应控制算法,提升了虚拟同步机的动态调节性能。文献[16]提出了一种基于RBF神经网络自适应调节惯量和阻尼的控制策略。但上述自适应控制算法皆基于理想电源进行动态响应优化。

综上,当VSG的直流侧为理想电压源,则忽略了储能设备的充放电功率限定约束。在实际应用中,当VSG的输出功率的最大值大于储能设备的充放电的功率时,系统会发生剧烈振荡。且PSO算法存在容易出现陷入局部解和收敛速度时间长的问题,需要采用更先进的算法加以改善。

因此,针对上述问题,本文的主要工作如下:1)基于电池功率限定的约束条件,得到VSG的惯量阻尼的取值范围。2)基于上述的取值范围,利用CSO算法计算VSG在稳态运行下的最佳惯量与阻尼。3)设计一种惯量和阻尼自适应控制策略,改善VSG输出功率以及频率变化的动态响应。

1　储能VSG的基本原理

1.1　储能VSG的结构

储能VSG电气拓扑结构如图1所示。其中Q_1~Q_6为IGBT,逆变器侧的电感L_s与电容C构成LC滤波器,R_s与R_c分别为LC滤波器的寄生电阻,L_g与R_g分别为电网电感和电网电阻,U_g为无穷大电源。

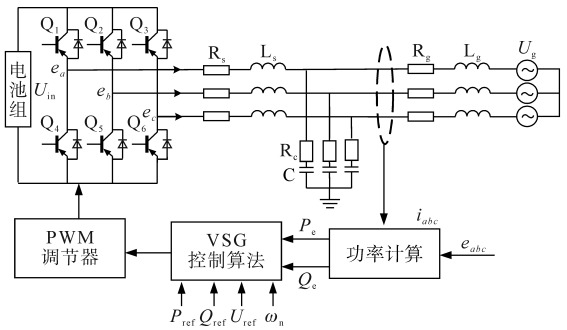


图1　储能VSG电气拓扑结构

Fig.1　Energy storage VSG electrical topology

储能VSG的有功环与无功环的控制方程分别为

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} - D(\omega - \omega_o) = \dfrac{P_{ref} - P_e}{\omega_o} \\ \theta = \int \omega \mathrm{d}t \\ E = \dfrac{K}{s}\left[D_q(U_{ref} - U_e) + (Q_{ref} - Q_e)\right] \end{cases} \tag{1}$$

式中:J为惯量参数;D为阻尼参数;ω为VSG的角频率;ω_o为额定角频率;P_{ref}为给定的输出有功功率;P_e为VSG的输出有功功率;θ为VSG的功角;K为电压调节系数;D_q为无功调节系数;U_{ref}为给定的输出电压;U_e为VSG的实际输出电压;Q_{ref}为给定的输出无功功率;Q_e为VSG的输出无功功率。

1.2　储能VSG的传递函数

根据文献[13]分析可以得出,在设计有功环的时候可以忽略无功环的影响。储能VSG系统的输出功率与额定功率的传递函数如下:

$$G(s) = \frac{\dfrac{K}{J\omega_o}}{s^2 + \dfrac{D}{J}s + \dfrac{K}{J\omega_o}} \tag{2}$$

通过式(2)得到二阶系统的阻尼比ξ以及自然振荡频率ω_n,其表达式如下:

$$\xi = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{\omega_o}{JK}} \tag{3}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{J\omega_o}} \tag{4}$$

1.3 惯量和阻尼对储能VSG的影响

根据式(3)和式(4)可以得出惯量J与阻尼D对储能VSG的影响较大，不同的惯量J与阻尼D对VSG的动态性能具有不同影响，如图2所示。

图2a为阻尼D一定时，不同惯量J对VSG的动态性能的影响。由图2a可知，惯量越大，振荡的幅值越小，但调节时间越长，同理，惯量越小，振荡的幅值越大，但调节时间越短。

图2b为惯量J一定时，不同阻尼D对VSG的动态性能的影响。由图2b可知，阻尼越小，振荡的幅值越大且调节时间越长，阻尼越大，振荡的幅值越小且调节时间越短。

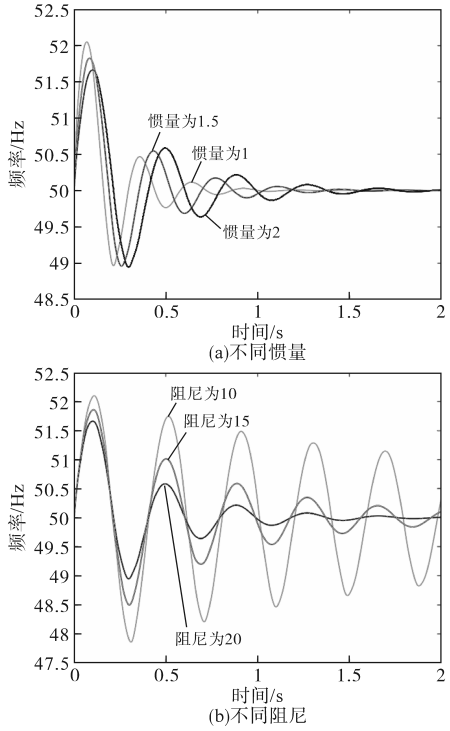


图2　VSG中不同惯量和阻尼的频率动态响应

Fig.2　Frequency dynamic response of different inertias and dampers in VSG

2　储能系统惯量阻尼自适应控制模型

2.1 储能系统惯量阻尼参数建模

在电池的充放电过程中，其端口电压和内阻等参数会随着其剩余容量的变化而发生变化。这个剩余容量通常用电池荷电状态(state of energy，SOE)表示。在相同的SOE状态下，电池在面对不同方向的负载波动时，其充放电功率限制值也会随之发生变化。此外，在应对相同负载功率波动时，不同SOE状态下的充放电功率限制值也会有所不同。

因此，当储能VSG系统发生阶跃响应，电池通过充放电向储能VSG系统提供功率，其功率的表达式为[10]

$$P_{\mathrm{ref}}=\frac{\dfrac{K}{J\omega_{\mathrm{o}}}}{s^{2}+\dfrac{D}{J}s+\dfrac{K}{J\omega_{\mathrm{o}}}}\cdot\frac{P_{\mathrm{e}}}{s}\tag{5}$$

从式(5)可以得到，在欠阻尼状态下，电池在响应负载变化产生超过功率波动值的最大充放电功率的表达式为

$$P_{\max}=(1+\mathrm{e}^{-\frac{\pi D\sqrt{X}}{\sqrt{4JEU\omega_{\mathrm{o}}}}})\cdot P_{\mathrm{e}}\tag{6}$$

根据电池的充放电特性[5]，可以得到电池充、放电功率限值表达式为

$$P_{\text{充电限制}}=-(1-SOE)\cdot S_{\mathrm{n}}\mu_{\mathrm{ref}}\tag{7}$$

$$P_{\text{放电限制}}=SOE\cdot S_{\mathrm{n}}\mu_{\mathrm{ref}}\tag{8}$$

因此，基于电池SOE的功率约束条件，得到惯量和阻尼取值范围的步骤如下：

首先，当电池的SOE为68%，根据式(7)和式(8)可得，放电功率限制值可达到$1.8P_{\mathrm{ref}}$，而充电功率限制值为$1.6P_{\mathrm{ref}}$。选取两者的功率限制值的最小值作为储能系统的约束条件。

其次，由于VSG处于欠阻尼状态下，阻尼比ξ在(0，1)的范围之内，惯量J与阻尼D满足不等式：

$$J>\frac{D^{2}\mathrm{X}}{EU\omega_{\mathrm{o}}}\tag{9}$$

最后，设计VSG频率变化为2 Hz，其中逆变器有功功率的变化范围在额定功率的40%~100%之间，因此，阻尼D可以表示为

$$D=\frac{P}{\omega_{\mathrm{o}}\omega_{\max}}\tag{10}$$

基于储能系统的约束下惯量和阻尼的取值范围如图3所示。

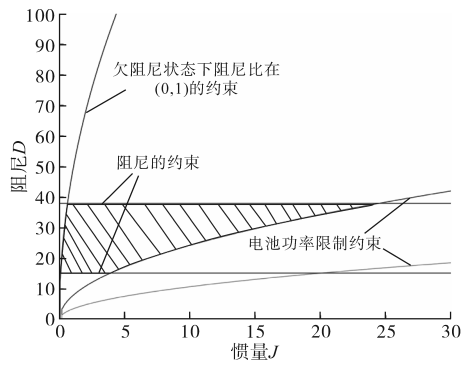


图3　储能系统下VSG的惯量阻尼的取值范围

Fig.3　The value range of inertia damping of VSG under energy storage system

2.2　基于纵横交叉算法的储能系统惯量阻尼求解模型

基于上述条件,得到惯量与阻尼的取值范围。因此,基于PSO寻优VSG惯量和阻尼参数时,需要在此约束范围内保证VSG能够在储能系统下稳定运行。

传统PSO算法容易陷入局部最优解,导致无法得到全局最优解[5]。而CSO算法收敛速度更快且有效地规避了参数局部解。

CSO算法是通过将不同维度的趋优参数进行交叉,产生新的个体,增加种群的多样性,促进算法的全局搜索能力,纵向交叉通过对父代趋优参数进行算术运算,生成新的子代趋优参数,从而实现交叉操作[13]。其表达式为

$$M_{vc}(i,d_1)=r\cdot X(i,d_1)+(1-r)\cdot X(i,d_2)+c\cdot[X(i,d_1)-X(i,d_2)] \tag{11}$$

式中:r为0到1之间的随机数;c为0到1之间的随机数;$X(i,d_1)$,$X(i,d_2)$为不同维度的父代趋优参数;$M_{vc}(i,d_1)$为父代不同维度纵向交叉产生的子代趋优参数;i为个体编号,取值范围为1到Q,Q为种群规模;d_1,d_2为趋优参数的维度编号,取值范围为1到C,C为种群的维度数量。

本文采用的CSO竞争算子通过比较两者的适应度值,选取适应度值最小的参数进行下一次迭代,使得整体竞争算子趋向最好的方向。

本文提出CSO的适应度函数为储能VSG系统频率的误差与储能VSG系统电压总谐波畸变率(THD)之和,其函数表达式为

$$fitness=\int_0^t t|(f-f_{ref})|\,\mathrm{d}t+\frac{\sqrt{\sum_2^{\infty}U_n^2}}{U_1}\times 100\% \tag{12}$$

因此,CSO优化算法的流程如下:

1)设定竞争算子的初值(包括竞争算子大小,初始位置以及初始速度);

2)设定竞争算子的上、下限以及竞争算子的最大迭代次数;

3)根据适应度函数计算竞争算子适应度值;

4)更新竞争算子的位置与速度;

5)判断是否完成迭代次数。若满足,直接执行步骤6),若不满足,返回步骤3);

6)结束迭代,寻优结束。通过CSO优化算法寻优后的初值,得到最佳惯量J_{best}以及最佳阻尼D_{best}。

2.3　储能系统惯量阻尼自适应控制模型

VSG具有类似同步发电机的外特性和转子惯量特性,且VSG的惯量和阻尼参数具有一定的灵活性,惯量可以根据储能系统的场景来自适应地选择更合适的数值。为了更好地掌握VSG的动态特性,设计了一种储能系统惯量阻尼自适应控制策略。

为了更好地设计VSG的惯量阻尼自适应控制策略,需要对VSG的功角曲线以及转子角频率振荡曲线进行分析,如图4所示。由图4可知,输入功率增加时,虚拟转子的角速度会加快,应采用较大的惯量,限制虚拟转子角速度的增加,避免转速超调。当虚拟转子角速度进入减速状态时,应采用较小的惯量,限制虚拟转子角速度减缓,并尽快将功率的振荡达到最佳值。在不同的输入功率范围内,需要选择不同大小的惯量J,使虚拟转子角速度能够更好地适应电网的变化。而阻尼D需要随着虚拟同步机的虚拟转子角速度的变化而增大。

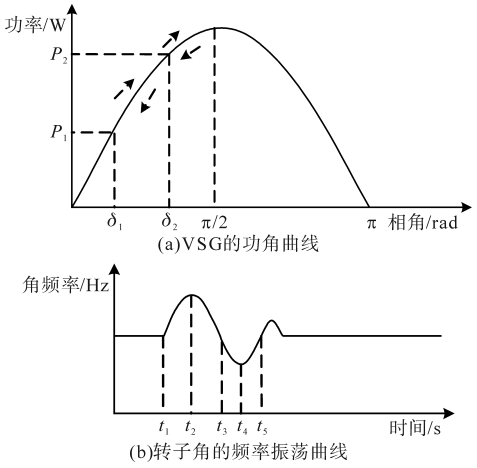


图4　VSG的功角曲线以及转子角频率振荡曲线

Fig.4　Power angle curve of VSG and rotor angular frequency oscillation curve

VSG惯量阻尼自适应控制的规律如表1所示,频率偏差为$\omega-\omega_0$,频率变化率为$\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$。

表1　VSG惯量阻尼自适应控制的规律

Tab.1　The law of VSG inertia damping adaptive control

区间序号	频率偏差	频率变化率	惯量	阻尼
1	>0	>0	增大	增大
2	>0	<0	减小	增大
3	<0	<0	减小	增大
4	<0	>0	增大	增大

根据表1的VSG惯量阻尼自适应控制的规律,本文设计的VSG惯量阻尼自适应控制方程如下:

$$J=\begin{cases}J_{\text{best}}+k\dfrac{\arctan\left(\Delta\omega/\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right)}{\Delta\omega/\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}} & \Delta\omega\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}>0\cap|\Delta\omega|>2\pi f_{\mathrm{s}}\\ J_{\text{best}}-k\dfrac{\arctan\left(\Delta\omega/\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right)}{\Delta\omega/\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}} & \Delta\omega\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}>0\cap|\Delta\omega|>2\pi f_{\mathrm{s}}\\ J_{\text{best}} & |\Delta\omega|<2\pi f_{\mathrm{s}}\end{cases}\tag{13}$$

$$D=\begin{cases}D_{\text{best}}+k\dfrac{\arctan\left(\Delta\omega/\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right)}{\Delta\omega/\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}} & |\Delta\omega|>2\pi f_{\mathrm{s}}\\ D_{\text{best}} & |\Delta\omega|<2\pi f_{\mathrm{s}}\end{cases}\tag{14}$$

综上,基于纵横交叉算法的储能系统虚拟同步机惯量自适应控制策略流程图如图5所示,具体步骤如下:

步骤1:基于储能约束得到J与D的取值范围:$[J_{\min},J_{\max}]$,$[D_{\min},D_{\max}]$。

步骤2:基于粒子群算法得到最佳惯量J_{best}和最佳阻尼D_{best},其具体步骤为:

首先,初始化粒子种群大小,迭代最大次数、位置和速度;

其次,更新每个粒子的速度和位置,当前个体最优质的全局最优值;

最后,判断迭代是否满足要求。若满足要求,则得到最佳惯量J_{best}和最佳阻尼D_{best};若不满足,重新迭代粒子的速度与位置。

步骤3:根据上述的惯量与阻尼的取值范围以及最佳惯量和最佳阻尼,进行惯量阻尼自适应控制,改善系统的动态响应。

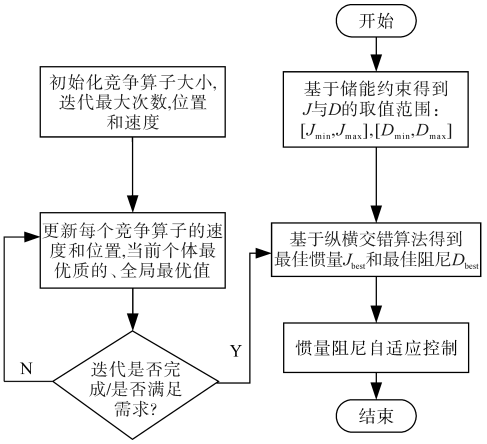


图5　VSG惯量阻尼自适应控制流程图

Fig.5　VSG inertia damping adaptive control flow chart

3　仿真结果分析

为了验证本文所提控制策略的有效性,利用Matlab/Simulink软件建立储能虚拟同步控制模型,并进行仿真验证,具体参数如下:直流电压为2 500 V,滤波电感为4 mH,参考输出功率1.5×10^5 W,滤波电容1 μF,额定频率为50 Hz,并网电压为220 V,铅酸电池*SOE*为68%,铅酸电池储能容量为10 A·h。

3.1　储能系统惯量与阻尼参数验证

为了分析储能系统惯量和阻尼参数取值范围的正确性,设定不同情况。

情况1:当J与D在取值范围内,给定惯量J=2,给定阻尼D=20。

情况2:当J与D超出取值范围,给定惯量J=20,给定阻尼D=5。

将情况1和2分别代入储能VSG系统中,其频率动态响应曲线如图6所示。当惯量J与阻尼D超过了取值范围,在3.5 s后储能VSG系统不稳定。因此,当惯量J与阻尼D取值合理时,系统才能稳定。

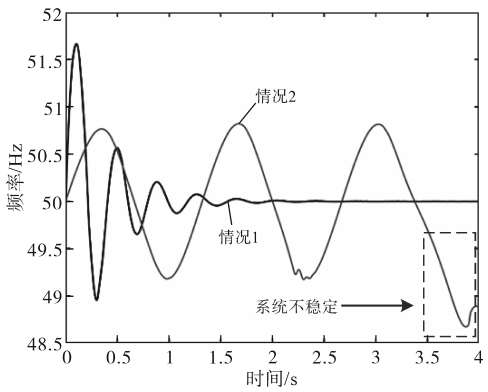


图6　VSG频率动态响应曲线

Fig.6　VSG frequency dynamic response curves

为了验证惯量J与阻尼D超过了电池约束条件时,系统发生剧烈振荡。

情况3:在电池作为直流电源时,给定惯量J=20,给定阻尼D=5。

情况4:在理想电压源作为直流电源时,给定惯量J=20,给定阻尼D=5。

将情况3和4分别代入VSG的系统中,其频率动态响应曲线如图7所示,当电池作为直流电源,超过储能约束条件时系统会导致发生剧烈振荡。同等条件下,当理想直流电源作为直流电源,系统并未发生剧烈振荡。

为了分析当电池在*SOE*=68%状态下,电池

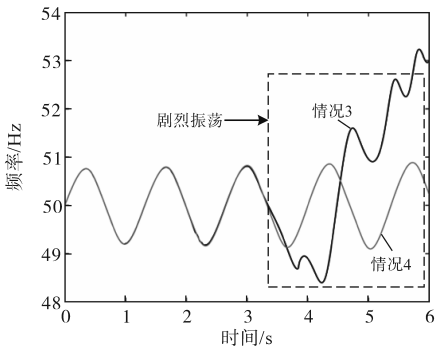


图7　直流电源不同时的频率动态响应曲线

Fig.7　Frequency dynamic response curves of DC power supply at different times

的充放电功率限制的正确性，电池作为直流电源，给定惯量 J=2 和阻尼 D=20。

情况5：在2.2 s—2.5 s时刻，将VSG的有功功率的参考值上升50 kW，使得VSG的输出功率不超过功率限制 $1.6P_{ref}$。

情况6：在2.2 s—2.5 s时刻，将VSG的有功功率的参考值上升150 kW，使得VSG的输出功率超过功率限制 $1.6P_{ref}$。

将情况5和6分别代入VSG的系统中，其频率的动态响应曲线如图8所示。若突增功率超过功率限值，储能VSG系统不稳定，会导致系统的崩溃。若突增功率低于功率限值，储能VSG系统会趋向于稳定。

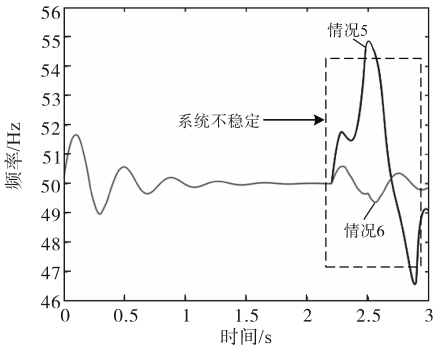


图8　基于储能功率限幅的频率动态响应曲线

Fig.8　Frequency dynamic response curves based on energy storage power limiting

3.2　粒子群算法寻优结果

CSO算法参数设置以及寻优后的结果如下：种群数量为5，最大迭代次数为100，寻优后，最佳惯量 J_{best} 为0.64，最佳阻尼 D_{best} 为38，适应度值为 $0.522\ 4\times10^{-3}$。为了验证本文设计的CSO算法的优越性。图9分别为CSO算法与PSO算法对储能VSG惯量、阻尼参数的寻优结果。从图9可以得到，CSO算法在第6次迭代中找到最优值，而PSO算法在第16次迭代中找到最优值。因此，CSO算法比PSO算法收敛速度更快，迭代次数更少。

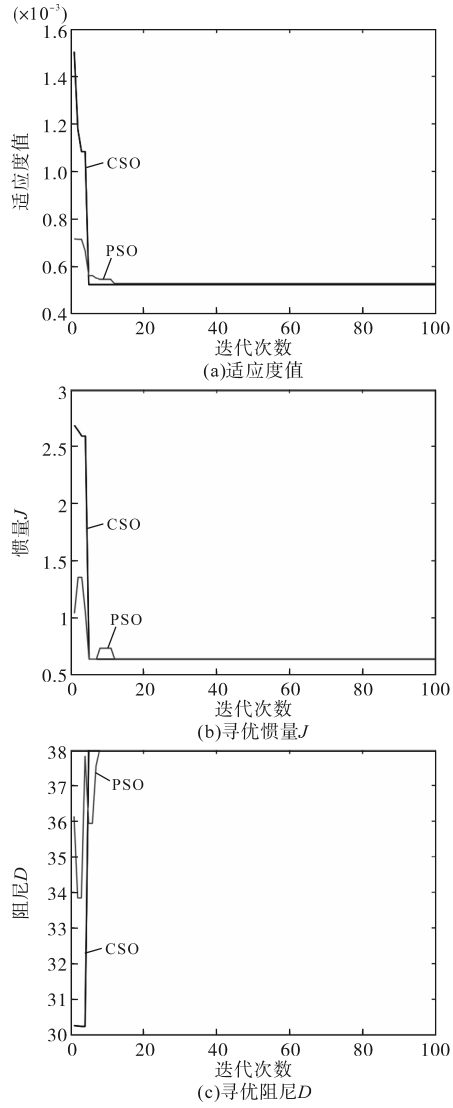


图9　CSO寻优结果与PSO寻优结果对比

Fig.9　Comparison of CSO optimization results with PSO optimization results

3.3　储能系统VSG阻尼自适应控制

为了验证本文设计的惯量阻尼自适应控制策略的优越性。在0~2 s将有功功率的参考值设为100 kW，在2~4 s将有功功率的参考值上升为150 kW。

情况7：本文设计的自适应控制作用于储能VSG系统中。

情况8：当惯量和阻尼为常数，J=0.64，D=38。

将情况7和8分别代入储能VSG系统中，其频率与功率的动态响应曲线如图10所示。在自适应惯量阻尼控制下，有功功率和频率的动态响应明显优于常量惯量阻尼的控制。当功率发生波动时，自适应惯量阻尼控制下的储能VSG系统频率变化率更小，功率变化率更小。

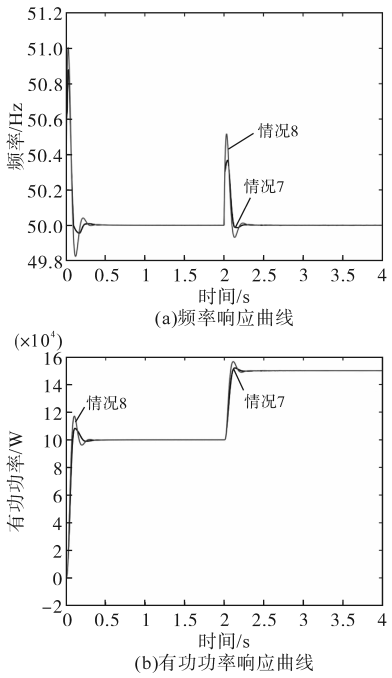


图10　自适应控制下VSG的动态响应曲线

Fig.10　Dynamic response curves of VSG under adaptive control

4　结论

本文提出了基于纵横交叉算法的储能系统自适应控制策略。考虑了电池能量状态约束以及电池充放电功率约束作为惯量与阻尼参数计算的约束条件，得到惯量与阻尼的取值范围。同时利用基于纵横交叉算法，以储能VSG系统的电压总谐波畸变率THD最优以及储能VSG系统的频率变化最小为优化目标，对VSG的惯量J与阻尼D进行寻优，得到最佳惯量J_{best}与阻尼D_{best}。最后，设计惯量阻尼自适应控制策略，改善了VSG的动态性能。

参考文献

[1] 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 Chong，YANG Huan，ZENG Zheng，et al. Rotor inertia adaptive control method for VSG[J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(19)：82-89.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 石荣亮，张兴，徐海珍，等.基于自适应模式切换的虚拟同步发电机功率控制策略[J].电工技术学报，2017，32(12)：127-137.
SHI Rongliang，ZHANG Xing，XU Haizhen，et al. The active and reactive power control of virtual synchronous generator based on adaptive mode switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2017，32(12)：127-137.

[5] 李吉祥，赵晋斌，屈克庆，等.考虑SOC特性的微电网VSG运行参数边界分析[J].电网技术，2018，42(5)：1451-1457.
LI Jixiang，ZHAO Jinbin，QU Keqing，et al. Boundary analysis of operation parameters of microgrid VSG considering SOC characteristics[J]. Power System Technology，2018，42(5)：1451-1457.

[6] 张常友，朱作滨.基于储能协调的光储微网VSG控制策略研究[J].电气工程学报，2023，18(1)：228-234.
ZHANG Changyou，ZHU Zuobin. Research on VSG control strategy of optical storage networks based on energy storage coordination [J]. Journal of Electrical Engineering，2023，18(1)：228-234.

[7] ALIPOOR J，MIURA Y，ISE T，et al. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2018，9(2)：1462-1471.

[8] 邱彬，胡善华，苏小平，等.基于SOC特性边界条件下VSG在光伏发电中最优控制策略研究[J].电子测量与仪器学报，2019，33(9)：33-40.
QIU Bin，HU Shanhua，SU Xiaoping，et al. Research on optimal control strategy of VSG in photovoltaic generation based on SOC characteristic boundary condition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument，2019，33(9)：33-40.

[9] 郭建祎，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.

[10] 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/OL].电力系统及其自动化学报：(2023-06-30)[2023-07-18].https：//doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001287.
LU Shengyang，ZHU Yu，CHEN Tao，et al. Damping inertia adaptive control strategy based on improved particle swarm optimization [J/OL]. Journal of Power Systems and Automation：(2023-06-30)[2023-07-18].https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001287.

[11] MENG Anbo，GE Jiafei，YIN Hao，et al. Wind speed forecasting based on wavelet packet decomposition and artificial neural networks trained by crisscross optimization algorithm[J]. Energy Conversion and Management，2016，114(1)：75-88.

[12] 殷豪，丁伟锋，陈顺，等.基于长短时记忆网络-纵横交叉算法的含高比例新能源电力市场日前电价预测[J].电网技术，

(下转第20页)

LIU Chuang, KOU Lei, CAI Guowei, et al. Review for AI-based open-circuit faults diagnosis methods in power electronics converters[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2957-2970.

[7] 马铭遥，凌峰，孙雅蓉，等. 三相电压型逆变器智能化故障诊断方法综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(23)：7683-7699.
MA Mingyao, LING Feng, SUN Yarong, et al. Review of intelligent fault diagnosis methods for three-phase voltage-mode inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7683-7699.

[8] 张振坤. 三电平四象限电驱系统故障诊断及其容错控制[D]. 济南：山东大学，2021.
ZHANG Zhenkun. Fault diagnosis and tolerant control of three level four quadrant motor drive systems[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[9] HAN P, HE X, REN H, et al. Fault diagnosis and system reconfiguration strategy of a single-phase three-level neutral-point-clamped cascaded inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3863-3876.

[10] 崔江，王强，龚春英. 结合小波与Concordia变换的逆变器功率管故障诊断技术研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(12)：3110-3116.
CUI Jiang, WANG Qiang, GONG Chunying. Inverter power switch fault diagnosis technique eesearch based on wavelet and concordia transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3110-3116.

[11] XUE Z Y, XIAHOU K S, LI M S, et al. Diagnosis of multiple open-circuit switch faults based on long short-term memory network for DFIG-based wind turbine systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(3): 2600-2610.

[12] ZHANG M, ZHANG Z, LI Z, et al. A simple and effective open-circuit-fault diagnosis method for grid-tied power converters—a new technique based on tellegen′s theorem[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 11(2): 2203-2213.

[13] 许水清，黄文展，何怡刚，等. 基于自适应滑模观测器的中点钳位型三电平并网逆变器开路故障诊断[J]. 电工技术学报，2023，38(4)：1010-1022.
XU Shuiqing, HUANG Wenzhan, HE Yigang, et al. Open-circuit fault diagnosis method of neutral point clamped three-level grid-connected inverter based on adaptive sliding mode observe [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 1010-1022.

[14] ZHOU D, TANG Y. A model predictive control-based open-circuit fault diagnosis and tolerant scheme of three-phase AC - DC rectifiers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 7(4): 2158-2169.

[15] SHI T, HE Y, WANG T, et al. An improved open-switch fault diagnosis technique of a PWM voltage source rectifier based on current distortion[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12212-12225.

[16] 黄凯，邱颖宁，秦伟等. 基于实时电流幅值的风电整流器故障诊断方法[J]. 电力工程技术，2019，38(2)：25-31.
HUANG Kai, QIU Yingning, QIN Wei, et al. Fault diagnosis algorithm for wind power rectifier based on real-time current amplitude[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 25-31.

[17] ZHANG X, LI Z, ZHANG Z, et al. Neural network based open-circuit fault diagnosis for three-level neutral-point-clamped back-to-back converters[C]//2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), IEEE, 2021: 748-752.

收稿日期：2023-07-31
修改稿日期：2023-12-21

（上接第10页）

2022, 46(2): 472-480.
YIN Hao, DING Weifeng, CHEN Shun, et al. Day-ahead electricity price forecasting of electricity market with high proportion of new energy based on LSTM-CSO model[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 472-480.

[13] 杨苓，黄泽杭，陈璟华，等. 基于纵横交叉算法的直流微电网趋优稳定性分析[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4632-4641.
YANG Ling, HUANG Zehang, CHEN Jinghua, et al. Optimal stability analysis of DC microgrid based on crisscross optimization algorithm[J]. High Voltage Technology, 2023, 49(11): 4632-4641.

[14] ZHANG Qian, LI Yan, DING Zhuwei, et al. Self-adaptive secondary frequency regulation strategy of micro-grid with multiple virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 6007-6018.

[15] 杨赟，梅飞，张宸宇，等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备，2019，39(3)：125-131.
YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Collaborative coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.

[16] 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.

收稿日期：2023-07-18
修改稿日期：2023-11-15