DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.145 **中图分类号**：TM933 **文献标志码**：A

储能 VSG 环流抑制及电压稳定控制策略研究

李祥柱，徐永海
(华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206)

摘要：在储能换流器 PCS(power conversion system)中采用模拟同步电机旋转及励磁特性的虚拟同步机 VSG(virtual synchronous generator)控制，实现储能在电力系统调频领域中的应用。在调频工况电化学电池频繁充放电，常需要 PCS 减载运行，其功率差异会引起 VSG 功角、电压的变化，造成设备环流，因此提出 1 种耦合功率变化率的可变参数虚拟阻抗方案，使等效阻抗与 PCS 功率变化相匹配，针对储能功率变化造成输出电压抗扰动能力变差问题，提出 1 种包含误差鲁棒积分跟踪模块的二阶线性自抗扰控制方法，实现储能输出电压稳定。PSCAD 仿真结果表明：可变参数虚拟阻抗匹配 PCS 功率变化，对设备环流可以有效抑制，二阶线性自抗扰控制可有效提升电压控制环节对电压波动抑制的能力，提升储能 VSG 控制系统的鲁棒性。

关键词：储能；虚拟同步机；可变参数虚拟阻抗；线性自抗扰观测器

Research on Circulating Current Suppression and Voltage Stability Control Strategy for Energy Storage VSG

LI Xiangzhu, XU Yonghai
(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The power conversion system (PCS) for energy storage uses a virtual synchronous generator (VSG) control system that simulates the rotation and excitation characteristics of synchronous motors, so as to achieve the applications of energy storage in the field of power system frequency regulation. Under frequency modulation conditions, electrochemical batteries frequently charge and discharge, and they often require the PCS to operate under reduced load. In this case, the power difference can cause changes in the power angle and voltage of the VSG, resulting in circulating current within the equipment. A variable-parameter virtual impedance scheme coupled with the power change rate is proposed to match the equivalent impedance with the variation in PCS power. In response to the problem of poor output voltage anti-interference capability caused by changes in the energy storage power, a second-order linear auto-disturbance rejection control method including an error robust integral tracking module is put forward, so as to achieve the stable output voltage from the energy storage. Simulation results based on PSCAD show that the matching of variable-parameter virtual impedance with the power variation of PCS can effectively suppress circulating current within the equipment, and the second-order linear auto-disturbance rejection control can effectively improve the voltage control link's capability of suppressing voltage fluctuations, thereby enhancing the robustness of the energy storage VSG control system.

Keywords: Energy storage; virtual synchronous generator (VSG); variable-parameter virtual impedance; linear auto-disturbance rejection observer

随着可再生能源大规模并网，其出力波动随机性势必会给电力系统频率稳定增加潜在风险[1-2]。目前电力系统调频主要依靠火电、水电机组，但是常规发电机因为旋转特性，无法做到频率快速、无

收稿日期：2023-09-04；**修回日期**：2023-10-10；**录用日期**：2023-10-19；**网络首发日期**：2023-12-20
基金项目：国家电网公司总部科技项目(5400-202258419A-2-0-ZN)
This work is supported by State Grid Corporation of China Headquarters Science and Technology Project under the grant 5400-202258419A-2-0-ZN

差调节[3-4]。目前广泛采用磷酸铁锂电池作为储能设备，采用储能换流器 PCS(power conversion system)作为换流装置，可以实现功率毫秒级响应，有效消除区域电网频率偏差，维持电力系统频率稳定[5-6]。为了使储能系统具备类似同步发电机的阻尼和惯性，目前广泛在储能 PCS 中采用模拟同步发电机暂态特性的虚拟同步机 VSG(virtual synchronous generator)控制策略，实现储能设备对电力系统频率的主动支撑[7-10]。

储能设备并网运行、PCS 之间无功功率分配与等效阻抗耦合、VSG 控制参数不同及外接输电线路感抗效应，造成 VSG 输出电压矢量不能匹配 VSG 功率变化，引起设备之间的环流[11]。文献[12]针对储能低压组网形式提出 1 种负序虚拟阻抗控制策略，使 PCS 输出有功、无功独立解耦，根据线路电阻计算传输压降，改善 PCS 交流侧电压不平衡造成的环流现象，但只针对低压组网形式，不适用于高压级联形式新型储能电站。文献[13]将环流分为稳态环流和动态环流，构建含有定阻抗和可变阻抗的可变参数虚拟阻抗，在降低电压跌落的基础上提高功率分配精度，但没有考虑电压恢复阶段虚拟阻抗配置方案。文献[14]在 VSG 无功控制环节增加无功负反馈环节，在外接输电线路参数不匹配情况下，VSG 控制系统能够按照 PCS 既定功率进行无功分配，起到抑制 VSG 稳态运行环流的作用，但该方案没有考虑恒功率输出工况，适用范围有限。

在储能 VSG 控制系统中，采用电压、电流双闭环比例-积分 PI(proportional integral)作为底层控制，传统 PI 控制不具备处理强非线性、多耦合系统参数摄动的能力，难以保证母线电压稳定，造成储能 VSG 控制系统抗扰动能力较差[15-17]。文献[18]针对传统储能 PCS 电压 PI 控制环节进行改进，提出 1 种模糊 PI 控制方案，以电压偏差微分作为反馈信号，提高控制系统电压抗扰动能力，对传统 PI 进行改进，效果有限。文献[19]提出 1 种线性扩张观测器，分析该观测器对电压信号的跟踪能力，克服高增益对误差的累计效应，提升控制系统鲁棒性，该观测器性能与控制参数设定关系较大，适用性较差。文献[20]在电压控制系统中引入非线性扰动观测器，增加观测带宽，实现积分环节的快速无差响应，避免相位滞后对控制系统延时的影响，但无法执行小扰动精确抑制。

在储能参与电力系统调频过程中，储能常工作于不同充放电倍率，磷酸铁锂电池电化学反应剧烈，存在单体电压越限、温升过大等隐患，导致 PCS 减载运行，PCS 减载运行功率差异会引起 VSG 功角、电压变化不一致，造成设备环流。储能交流侧母线电压在负荷变化情况下常常存在波动和超调现象，无法保持稳定，导致磷酸铁锂电池频繁充放电，对电池寿命造成极大影响。基于此并结合参考文献，本文提出 1 种储能 VSG 环流抑制及电压稳定控制方法。首先在储能 PCS 中建立 VSG 控制系统，对 VSG 输出功率进行特性分析；然后研究储能 PCS 减载控制对 VSG 功角、电压的影响，得出等效阻抗与 VSG 功率关系，提出 1 种耦合功率变化率的可变参数虚拟阻抗方案，增加控制系统环流抑制能力；接着分析储能输出电压波动问题，提出 1 种含有误差鲁棒积分跟踪模块的二阶线性自抗扰控制方法，实现储能输出电压稳定；最后通过仿真验证所提方案的有效性和可行性。

1 储能 VSG 控制及功率特性

1.1 VSG 控制

储能 VSG 控制是在储能 PCS 中模拟同步机外特性的 1 种控制方法，使储能系统具备虚拟惯量及虚拟阻尼，可以实现储能并网运行，具备调频、调压能力，有效提高储能接入适应性。储能 PCS 拓扑结构及 VSG 控制框图如图 1 所示。图中：C_{dc} 为储能直流侧滤波电容；R_f、L_f、C_f 分别为滤波电路中的电阻、电感、电容；e_a、e_b、e_c 与 i_{abc} 分别为 VSG 输出的三相交流电压与电流；u_a、u_b、u_c 为 PCS 并网点三相电压，即网侧电压；L_g、R_g 分别为线路电感、电阻；P_e、Q_e、P_{ref}、Q_{ref} 分别为储能 VSG 输出/吸收有功、无功功率的实际值和输出/吸收有

功、无功功率的目标值；P_{m}为 VSG 输出虚拟机械功率；δ、ω 分别为 VSG 虚拟功角、虚拟电角速度；E 为储能 VSG 输出三相电压的幅值；U 为并网点电压 u_{abc}的幅值；U_{ref}为并网点参考电压；i_{ref}为电压外环的输出参考电流。

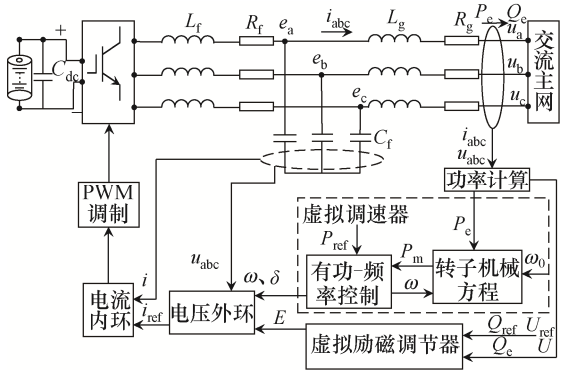


图 1　储能 PCS 拓扑结构及 VSG 控制框图

Fig. 1 Topological structure of energy storage PCS, and control block diagram of VSG

VSG 功率控制可以分为有功、无功控制环节，有功控制环节包括虚拟调速器和虚拟转子机械方程，虚拟调速器具有调速器外特性，模拟有功-频率下垂特性，控制方程为

$$P_{\mathrm{m}}=P_{\mathrm{ref}}+m(\omega-\omega_{\mathrm{n}}) \tag{1}$$

式中：m 为有功下垂系数；ω_{n}为 VSG 虚拟额定电角速度。虚拟转子方程通过功率调节进行虚拟转矩控制实现 VSG 频率调节。引入虚拟惯量 J 和虚拟阻尼 D 模拟同步电机旋转特性，可表示为

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{e}}-D(\omega-\omega_{\mathrm{n}}) \\ \dfrac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}=\omega-\omega_{\mathrm{n}} \end{cases} \tag{2}$$

虚拟惯量 J 使得储能 PCS 在功率-频率调节中具有了惯性，虚拟阻尼 D 提高了 VSG 系统阻尼，使得储能 PCS 在功率调节中具有了功率振荡抑制能力。VSG 无功功率环节即虚拟励磁调节器通过模拟同步电机电磁特性实现无功-电压调节，可表示为

$$E=E_0+n\left(Q_{\mathrm{ref}}-Q_{\mathrm{e}}\right)+k_{\mathrm{v}}(U_{\mathrm{ref}}-U) \tag{3}$$

式中：E_0为 VSG 输出空载电压幅值；n 为无功下垂系数；k_{v}为无功电压比例系数。

1.2 VSG 输出功率特性

本文以 2 台储能 PCS 并联为例建立 VSG 功率传输模型，如图 2 所示。图中：$E_1\angle\delta_1$、$E_2\angle\delta_2$、$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$分别为第一、第二储能 PCS 的输出电压矢量、电流矢量；X_1、X_2 分别为第一、第二储能 PCS 的线路感抗；$U_{\mathrm{pcc}}\angle0^\circ$为输电线路母线电压矢量；$Z_{\mathrm{eq1}}$、$Z_{\mathrm{eq2}}$为第一、第二储能 PCS 等效电阻；$Z_{\mathrm{line1}}$、$Z_{\mathrm{line2}}$为第一、第二储能 PCS 所连输电线路阻抗；$Z_1$、$Z_2$为第一、第二储能 PCS 及输电线路合并阻抗；$Z_{\mathrm{L}}$为负载电阻。储能 PCS 输出/吸收功率可表示为

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix}=\frac{E_i^2-E_iU_{\mathrm{pcc}}\cos\delta_i}{Z_i^2}\begin{bmatrix} R_i \\ X_i \end{bmatrix}+\frac{E_iU_{\mathrm{pcc}}\sin\delta_i}{Z_i^2}\begin{bmatrix} X_i \\ -R_i \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，i 表示第 i 个储能 PCS。储能 PCS 在升压箱变低压侧耦合，线路阻抗为阻感性，为了实现有功、无功功率解耦，引入虚拟阻抗使 VSG 等效阻抗呈感性（$X_i\gg R_i$）。因此式(4)可简化为

$$\begin{cases} P_i=\dfrac{E_iU_{\mathrm{pcc}}}{X_i}\sin\delta_i \\ Q_i=\dfrac{E_iU_{\mathrm{pcc}}-U_{\mathrm{pcc}}^2}{X_i} \end{cases} \tag{5}$$

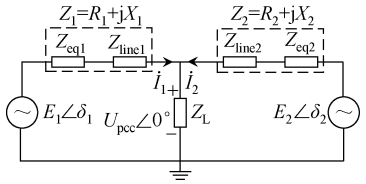


图 2　PCS 并联示意

Fig. 2 Schematic of PCSs connected in parallel

储能 VSG 输出电流可表示为

$$\dot{I}_1=\frac{E_i\cos\delta_i-U_{\mathrm{pcc}}+\mathrm{j}E_i\sin\delta_i}{R_i+\mathrm{j}X_i} \tag{6}$$

2　可变参数虚拟阻抗方案

在储能电站中，储能 PCS 电压并联运行，在参与电力系统调频过程中，储能常工作于不同充放电倍率，VSG 控制系统减载运行功率差异会引起 δ_i、E_i变化，导致输出/吸收功率不能按实际容量

进行精确匹配，引起 PCS 之间环流。

2.1 VSG 控制系统减载环流

图 2 中，2 套储能 VSG 输出电流矢量可表示为

$$\begin{cases}\dot{I}_1=\dfrac{1}{1+k}\dfrac{U_{\rm pcc}\angle 0^\circ}{Z_{\rm L}\angle\varphi_{\rm L}}+\dot{I}_{\rm c}\\ \dot{I}_2=\dfrac{k}{1+k}\dfrac{U_{\rm pcc}\angle 0^\circ}{Z_{\rm L}\angle\varphi_{\rm L}}-\dot{I}_{\rm c}\end{cases}\tag{7}$$

式中：k 为第一套、第二套储能的 VSG 容量比；$\varphi_{\rm L}$ 为负载阻抗相角；$\dot{I}_{\rm c}$ 为 PCS 之间的环流。结合式(6)、式(7)可以得到环流表达式为

$$\dot{I}_{\rm c}=\frac{k}{1+k}\frac{E_1\sin\delta_1}{X_1}-\frac{1}{1+k}\frac{E_2\sin\delta_2}{X_2}+ {\rm j}\frac{k}{1+k}\frac{U_{\rm pcc}-E_1}{X_1}+{\rm j}\frac{1}{1+k}\frac{E_2-U_{\rm pcc}}{X_2}\tag{8}$$

为了得到环流与 VSG 输出/吸收功率的关系，将式(5)代入式(8)中可以得到

$$\dot{I}_{\rm c}=\frac{kP_1-P_2}{(1+k)U_{\rm pcc}}-{\rm j}\frac{kQ_1-Q_2}{(1+k)U_{\rm pcc}}\tag{9}$$

根据式(9)可知，储能 PCS 间的环流是由有功功率、无功功率输出/吸收差异造成的。有功功率对应环流实部，无功功率对应环流虚部。为了得到 δ_i、E_i 变化与环流的关系，根据式(2)、式(3)及式(5)建立功率变化量模型为

$$\begin{cases}\Delta P_i=(J\omega_{\rm n}+m+D\omega_{\rm n})\Delta\omega_i\approx\dfrac{E_iU_{\rm pcc}}{X_i}\Delta\delta_i\\ \Delta Q_i=\left(\dfrac{1}{k_{\rm v}}s+1\right)n\Delta E_i\approx\dfrac{U_{\rm pcc}}{X_i}\Delta E_i\end{cases}\tag{10}$$

式中，$\Delta\delta_i=\int_{t_1}^{t_2}\Delta\omega_i{\rm d}t=\Delta\omega_i(t_2-t_1)$，$t_1$、$t_2$ 分别为储能减载运行的开始时间和结束时间。

根据式(10)可知：有功、无功功率变化会引起功角、电压变化，储能 VSG 控制系统减载运行时，输出/吸收功率无法匹配 VSG 容量，功角、电压同样会因为不同 VSG 之间功率不匹配和差异较大，造成储能 PCS 设备之间环流。

2.2 可变参数虚拟阻抗

为了使储能 VSG 控制系统减载运行时，不同 PCS 之间功角变化量、电压变化量保持一致，本文提出 1 种新型可变参数虚拟阻抗策略，根据功率变化率设置不同虚拟阻抗，使等效阻抗自适应变化，匹配不同功率变化，避免 PCS 设备之间环流的产生。可变参数虚拟阻抗 $Z_{{\rm V}i}$ 可表示为

$$\begin{cases}Z_{{\rm V}i}=R_{{\rm V}i}+{\rm j}\omega L_{{\rm V}i}\\ R_{{\rm V}i}=\left(K_{{\rm PR}i}+\dfrac{K_{{\rm IR}i}}{s}\right)(P_{\rm av}-P_i)\\ L_{{\rm V}i}=L_{\rm V}+K_{\rm QL}(Q_{\rm av}-Q_i)\end{cases}\tag{11}$$

式中：$R_{{\rm V}i}$ 为动态虚拟电阻，用储能 VSG 有功功率变化表征，对应虚拟阻抗实部；$L_{{\rm V}i}$ 为动态虚拟电感，用储能 VSG 无功功率变化表征；$K_{{\rm PR}i}$ 为有功变化比例系数；$K_{{\rm IR}i}$ 为有功变化积分系数；$P_{\rm av}$ 为储能 PCS 并联运行时，储能能量管理系统 EMS (energy management system)下达的有功功率指令；$L_{\rm V}$ 为虚拟电感初始值，是为了弥补 VSG 等效阻抗不匹配设置的初始虚拟电感，对应虚拟阻抗虚部；$K_{\rm QL}$ 为无功变化比例系数；$Q_{\rm av}$ 为储能 PCS 并联运行时，EMS 系统下达的无功功率指令。$R_{{\rm V}i}$ 采用有功功率变化 PI 控制，因为储能减载时有功功率调节范围较大，需要采用 PI 控制避免参数大范围变化对控制系统稳定性的影响。$L_{{\rm V}i}$ 主要是为了使无功功率均分，因此只需要采用比例控制维持无功功率动态平衡。

将可变参数虚拟阻抗引入储能电压电流闭环控制环节，可以得到控制框图如图 3 所示。图中：$E_{\rm ref}$ 为 VSG 输出参考电压；i_L 为流经滤波电感的电流；$u_{\rm o}$、$i_{\rm o}$ 分别为双闭环输出电压、电流信号；$K_{\rm PWM}$ 为 PWM 变换增益系数；$G_{\rm u}(s)$为电压比例积分 PI 控制环节；$G_{\rm I}(s)$为电压比例 P 控制环节。

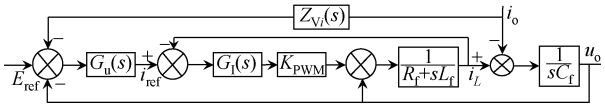


图 3 含有可变参数虚拟阻抗的闭环控制框图

Fig. 3 Block diagram of closed-loop control with variable-parameter virtual impedance

根据图 3 可知，引入虚拟阻抗后的传递函数为

$$u_{\rm o}=G(s)E_{\rm ref}-[G(s)Z_{{\rm V}i}(s)+Z_{0i}(s)]i_{\rm o}=G(s)E_{\rm ref}-Z_{{\rm eq}i}(s)i_{\rm o}\tag{12}$$

式中：$Z_{0i}(s)$、$Z_{eqi}(s)$为添加虚拟阻抗前、后 VSG 及线路的等效阻抗；$G(s)$为系统传递增益函数，可表示为

$$G(s)=\frac{\left(K_{Pu}+\frac{K_{Iu}}{s}\right)K_{PI}K_{PWM}}{L_fC_fs^2+K_{Iu}K_{PI}K_{PWM}(C_fs+1)+\frac{1+K_{Pu}K_{PI}K_{PWM}}{s}} \tag{13}$$

式中：K_{Pu}、K_{Iu}分别为电压 PI 控制比例系数、积分系数；K_{PI}为电流 P 控制比例系数。

为了减少系统传递增益函数 $G(s)$对可变参数虚拟阻抗精确调节的影响，需要保持 $G(s)\approx 1$，根据式(13)可知比例系数需满足

$$K_{Pu}K_{PI}K_{PWM}\gg 1 \tag{14}$$

$Z_{eqi}(s)$可表示为

$$Z_{eqi}(s)=\frac{R_{eqi}+sL_{eqi}+K_{PI}K_{PWM}}{1+C_fs(L_{eqi}s+R_{eqi})+\left[C_fs+\left(K_{Pu}+\frac{K_{Iu}}{s}\right)\right]K_{PI}K_{PWM}} \tag{15}$$

式中，$\begin{cases}R_{eqi}=R_{0i}+R_{Vi}\\L_{eqi}=L_{0i}+L_{Vi}\end{cases}$，其中 R_{0i}、L_{0i}分别为原系统等效电阻、电感。

在式(15)中，设置不同虚拟电阻、电感代入式(13)中，根据仿真参数，分别设置未添加虚拟阻抗(即 R_{Vi}=0 Ω、X_{Vi}=0 Ω)，引入虚拟电阻、未引入虚拟电感(即 R_{Vi}=0.2 Ω、X_{Vi}=0 Ω)，虚拟电阻保持不变、虚拟电感增大(即 R_{Vi}=0.2 Ω、X_{Vi}=0.03 Ω，R_{Vi}=0.2 Ω、X_{Vi}=0.06 Ω)，可以得到储能 VSG 控制系统等效阻抗幅频、相频特性曲线如图 4 所示。

由图 4(a)可知，未添加虚拟阻抗时，储能 VSG 等效阻抗在工频处幅值较小，引入虚拟电阻后幅值增大，随着虚拟感抗的增大，工频增益相应减小。由图 4(b)可知，添加虚拟电阻后，等效虚拟阻抗相位会变化到第二象限，呈现负阻性。为了使添加虚拟阻抗后 VSG 控制系统稳定运行，虚拟电阻取值不宜过大。随着虚拟感抗的增大，相位会减小，可降低等效阻抗中原有电感的分量，减少因为储能设备功率减载造成的电压降。

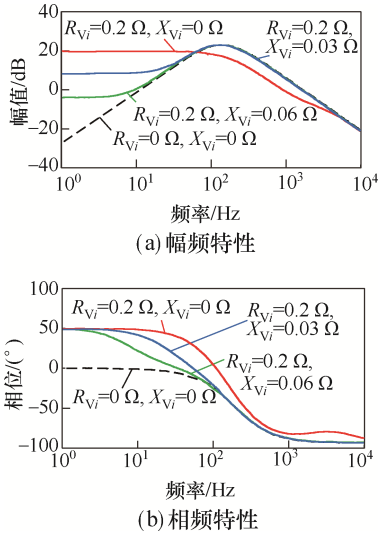


图 4　储能 VSG 控制系统等效阻抗伯德图

Fig. 4 Bode diagram of equivalent impedance of energy storage VSG control system

3　电压自抗扰控制方案

调频工况下，储能吸收/释放功率频繁变化，尤其是出现 PCS 减载运行工况时，电压波动明显，传统电压 PI 控制无法实现对电压指令的准确跟踪，VSG 控制系统抗扰动能力不足。基于此，本文提出 1 种包含误差鲁棒积分跟踪模块的二阶线性自抗扰控制方法，实现储能输出电压稳定。

3.1　二阶线性自抗扰控制

二阶线性自抗扰控制系统包含线性扩展状态观测器及线性状态误差反馈模块。线性扩展状态观测器是将包含系统内部和外部扰动的总扰动进行观测；线性状态误差反馈模块是获取扰动信号，对误差进行反馈补偿。二阶线性自抗扰控制通用状态控制方程可表示为

$$\begin{cases}\dot{x}_1(t)=x_2(t)\\\dot{x}_2(t)=x_3(t)+b_0u(t)\\\dot{x}_3(t)=f(t)\\y(t)=x_1(t)\end{cases} \tag{16}$$

式中：$x_1(t)$、$x_2(t)$为二阶状态变量；$x_3(t)$为扩张状态变量；b_0、$u(t)$分别为二阶线性自抗扰控制增

益、输出；$f(t)$ 为总扰动。

将式(16)与储能 VSG 并网数学模型对应，可以得到储能 VSG 二阶线性自抗扰控制中状态变量及总扰动表达式为

$$\begin{cases} x_2(t)=\begin{bmatrix} e_d & e_q \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\ f(t)=-\dfrac{1}{L_{\mathrm{f}}C_{\mathrm{f}}}\begin{bmatrix} R_{\mathrm{f}}i_d+e_d \\ R_{\mathrm{f}}i_q+e_q \end{bmatrix}-\dfrac{1}{C_{\mathrm{f}}}\begin{bmatrix} \dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix}+ \\ \qquad \omega_{\mathrm{n}}\begin{bmatrix} \dfrac{\mathrm{d}e_q}{\mathrm{d}t}+\dfrac{i_q}{C_{\mathrm{f}}} \\ \dfrac{\mathrm{d}e_d}{\mathrm{d}t}+\dfrac{i_d}{C_{\mathrm{f}}} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{17}$$

式中，e_d、e_q 和 i_d、i_q 分别为 dq 坐标系下的输出交流电压和电流，$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{abc}\to dq0}\begin{bmatrix} e_{\mathrm{a}} \\ e_{\mathrm{b}} \\ e_{\mathrm{c}} \end{bmatrix}$，$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{abc}\to dq0}\begin{bmatrix} i_{\mathrm{a}} \\ i_{\mathrm{b}} \\ i_{\mathrm{c}} \end{bmatrix}$。其中，$\boldsymbol{T}_{\mathrm{abc}\to dq0}$ 为 Park 变换矩阵。

线性扩展状态观测器可表示为

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t)=z_2(t)-\alpha_1\left[z_1(t)-y(t)\right] \\ \dot{z}_2(t)=z_3(t)-\alpha_2\left[z_1(t)-y(t)\right]+b_0u(t) \\ \dot{z}_3(t)=-\alpha_3\left[z_1(t)-y(t)\right] \end{cases} \tag{18}$$

式中：$z_1(t)$、$z_2(t)$ 和 $z_3(t)$ 分别为 $x_1(t)$、$x_2(t)$ 和 $x_3(t)$ 的估计值；α_1、α_2 和 α_3 为线性扩展状态观测器增益，取值需满足观测误差最小，闭环特征根位于根平面的左半部分，基于此，本文设置为 $\alpha_1=3\omega_0$、$\alpha_2=3\omega_0^2$、$\alpha_3=\omega_0^3$，其中 ω_0 为线性扩展状态观测器带宽。线性状态误差反馈模块传递函数可表示为

$$u_0(t)=k_{\mathrm{p}}[v(t)-z_1(t)]-k_{\mathrm{d}}z_2(t) \tag{19}$$

式中：$v(t)$ 为线性状态误差反馈模块输入；k_{p}、k_{d} 为反馈增益，通过带宽参数优化得到，本文设置 $k_{\mathrm{p}}=\omega_{\mathrm{c}}^2$、$k_{\mathrm{d}}=2\omega_{\mathrm{c}}$，其中 ω_{c} 为线性状态误差反馈模块带宽。

3.2 误差鲁棒积分跟踪模块

储能响应调频过程中需频繁充放电，VSG 输出功率调节范围较大，且存在 PCS 减载时功率突减的情况。在自抗扰控制中可以看作扰动项具有非线性、强扰动的特征。本文提出用误差鲁棒积分跟踪模块代替线性状态误差反馈模块，实现对储能电压鲁棒控制。误差鲁棒积分跟踪模块中跟踪误差变量定义为

$$\begin{cases} e_1(t)=v(t)-y(t) \\ e_2(t)=\beta_1e_1(t)+\dot{e}_1(t)+x_2(t)-z_2(t)-\dot{v}(t) \\ s(t)=\dot{e}_2(t)+\beta_2e_2(t) \end{cases} \tag{20}$$

式中：$e_1(t)$ 和 $e_2(t)$ 为跟踪误差变量；β_1 和 β_2 为误差鲁棒积分跟踪模块增益；$s(t)$ 为调控误差变量。将 $e_2(t)$ 及其导数 $\dot{e}_2(t)$ 代入调控误差变量 $s(t)$ 中并求导，可得

$$\begin{aligned} \dot{s}(t)=&\beta_1^3e_1(t)-(\beta_1^2+\beta_2^2+\beta_1\beta_2)e_2(t)+ \\ &(\beta_1+\beta_2)s(t)-\dot{u}_{0\mathrm{L}}(t)+f(t) \end{aligned} \tag{21}$$

式中，$\dot{u}_{0\mathrm{L}}(t)$ 为误差鲁棒积分跟踪模块传递函数的导数。借助稳定性判据 Lyapunov 函数可得

$$\begin{aligned} V=&\frac{1}{2}[e_1^2(t)+e_2^2(t)+s^2(t)]-\int_0^t s(t)[f(t)- \\ &\sigma\,\mathrm{sgn}\,e_2(t)]\mathrm{d}t \end{aligned} \tag{22}$$

式中，σ 为判据函数增益。对式(22)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}=&-\beta_1^2e_1^2(t)+[\beta_1^3s(t)+\dot{v}(t)-x_2(t)+z_2(t)]e_1(t)- \\ &\beta_2e_2^2(t)+[1-(\beta_1^2+\beta_2^2+\beta_1\beta_2)]s(t)e_2(t)+ \\ &e_1(t)e_2(t)+(\beta_1+\beta_2)s^2(t)+\sigma\,\mathrm{sgn}\,e_2(t)s(t)- \\ &\dot{u}_{0\mathrm{L}}(t)s(t) \end{aligned} \tag{23}$$

为了使 $\dot{V}\leqslant 0$，设置误差鲁棒积分跟踪模块传递函数的导数为

$$\begin{aligned} \dot{u}_{0\mathrm{L}}(t)=&(\beta_1+\beta_2)s(t)+\sigma\,\mathrm{sgn}\,e_2(t)+\beta_1^3e_1(t)+ \\ &[1-(\beta_1^2+\beta_2^2+\beta_1\beta_2)]e_2(t) \end{aligned} \tag{24}$$

对式(24)求积分，可以得到误差鲁棒积分跟踪模块传递函数为

$$\begin{aligned} u_{0\mathrm{L}}(t)=&(\beta_1+\beta_2)[e_2(t_{\max})-e_2(0)]+\int_0^{t_{\max}}\beta_1^3e_1(t)\mathrm{d}t+ \\ &\int_0^{t_{\max}}\sigma\,\mathrm{sgn}\,e_2(t)+[1-(\beta_1^2+\beta_2^2+ \\ &\beta_1\beta_2)]e_2(t)\mathrm{d}t \end{aligned} \tag{25}$$

式中，$t_{\max}$ 为最大时间常数。

根据上述分析，建立储能电压自抗扰控制系统，其控制框图如图 5 所示。

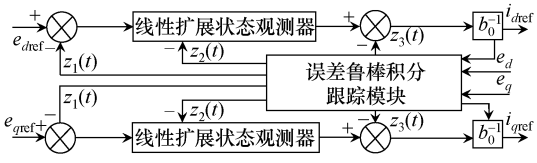


图 5 储能电压自抗扰控制框图

Fig. 5 Block diagram of energy storage voltage auto-disturbance rejection control

4　PSCAD 仿真研究

为了验证本文所提储能 VSG 环流抑制及电压稳定控制策略的有效性，在 PSCAD 中搭建 2 台储能 PCS 并联仿真模型，如图 6 所示。

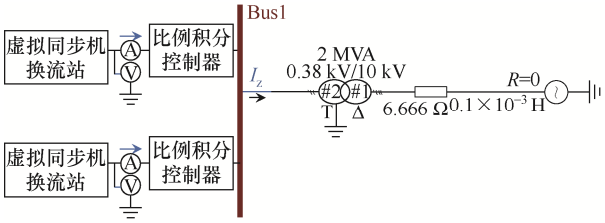


图 6　2 台储能 PCS 并联仿真模型

Fig. 6 Simulation model of two energy storage PCSs connected in parallel

参考实际工程案例，硬件仿真参数见表 1，根据储能额定功率选择相应 PCS，结合本文所提控制策略，控制系统参数见表 2。

表 1　新能源储能微电网仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of new-energy energy storage microgrid

参数	数值
储能额定功率/MW	0.5
PCS 滤波电感/mH	0.6
PCS 额定电压/V	380
PCS 滤波电容/μF	1 450
PCS 滤波电阻/Ω	0.01
储能 SOC 区间	10%~90%
直流母线电压/V	800
输电线路长度/km	35

表 2　并网换流器控制系统参数

Tab. 2 Parameters of grid-connected converter control system

参数	数值
虚拟惯量/kg·m^2	0.5
阻尼系数	1.1
虚拟电感初始值/mH	1
无功下垂系数	0.05
无功电压比例系数	0.002
有功变化比例系数	0.001 2
有功变化积分系数	0.011
线性扩展状态观测器带宽	1 750
无功变化比例系数	0.000 2
线性状态误差反馈模块带宽	350

为了验证本文所提可变参数虚拟阻抗可以有效减少因为储能 PCS 减载运行造成的设备间环流，设置仿真工况为初始时刻 2 套储能 VSG 以全功率输出运行，5 s 时刻第二套储能 VSG 输出有功功率减半，有功功率输出波形如图 7 所示，图中 DG1 和 DG2 分别为第一套和第二套储能 VSG。。

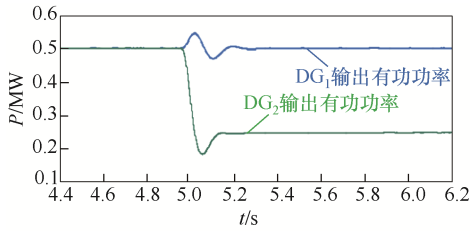
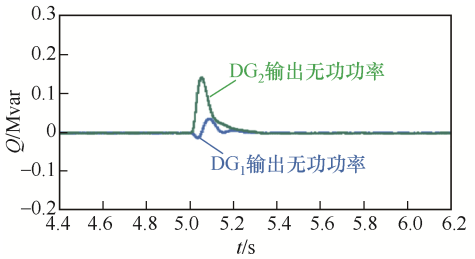


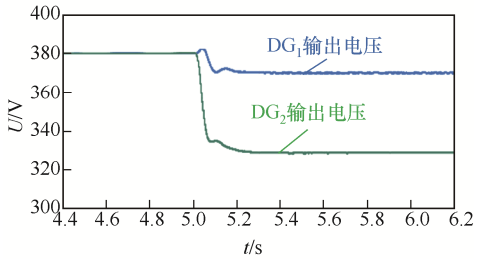
图 7　VSG 输出有功功率波形

Fig. 7 Waveforms of VSG output active power

根据图 7 可知，当 DG_2 输出有功功率减半时，VSG 控制系统可以执行功率调节指令，对于有功功率调节精确。无虚拟阻抗的 VSG 输出波形如图 8 所示。



(a) 无功功率



(b) 并网点电压幅值

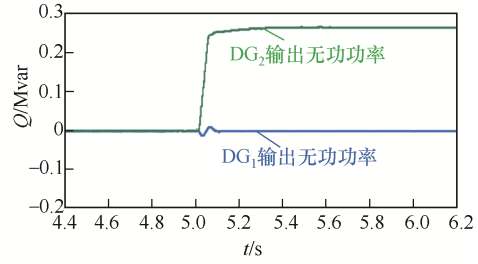
图 8　无虚拟阻抗的 VSG 输出波形

Fig. 8 Waveforms of VSG output without virtual impedance

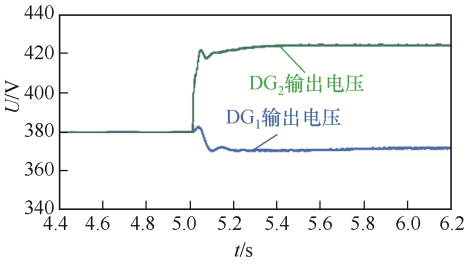
根据图 8 可知，当传统 VSG 控制策略面对 DG_2 输出功率减半工况时，无法做到无功功率按照有功功率调节量进行合理分配，不具备无功跟随电压参考值调节能力。储能 PCS 输出功率减半会造成输出电压跌落，因为无改进措施，所以无法实现电压偏差调节，DG_1、DG_2 之间的电压偏差最大达到

45 V，且电压偏差一直存在，引起设备之间环流问题，不利于储能系统稳定运行，严重影响储能设备的循环寿命。

参考文献[6]设定虚拟阻抗为固定值 Z_V = 0.28 + j0.05，虚拟电阻根据有功功率最大调节设定，虚拟电感设置为初始值，采用虚拟阻抗的 VSG 输出波形如图 9 所示。



(a) 无功功率



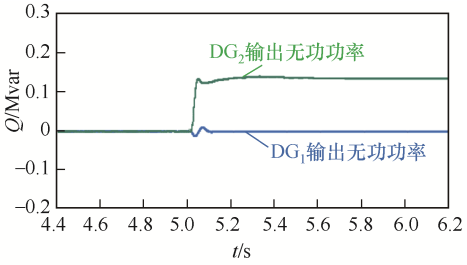
(b) 并网点电压幅值

图 9 固定虚拟阻抗的 VSG 输出波形

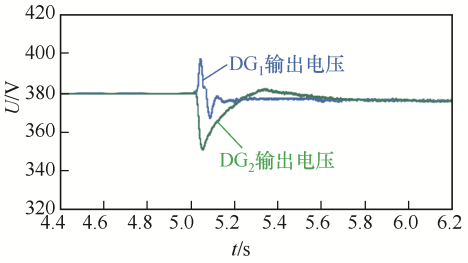
Fig. 9 Waveforms of VSG output with fixed virtual impedance

根据图 9 可知，在储能 VSG 电压控制环节增加虚拟阻抗对无功功率调节及电压调节具有一定的作用，无功功率可以按照有功功率调节量进行分配，DG_2 输出无功功率增加响应 PCS 减载，但是因为采用固定虚拟阻抗，无法根据功率调节量精确调节并网点电压，虚拟阻抗在 PCS 减载时，可以提供 DG_2 输出电压支撑，但存在明显超调，最大电压超调量达到 38 V，造成 DG_1、DG_2 之间存在电压偏差，仍会造成设备环流。采用本文所提可变参数虚拟阻抗的 VSG 输出无功功率、电压波形如图 10 所示。

根据图 10 可知，当本文所提可变参数虚拟阻抗的储能 VSG 控制系统面对减载工况时，可以实时匹配功率变化，无功功率按照有功功率调节量合理分配，可变参数虚拟阻抗添加到电压控制环节，精确调节 PCS 输出电压，减少 DG_2 与 DG_1 之间的



(a) 无功功率

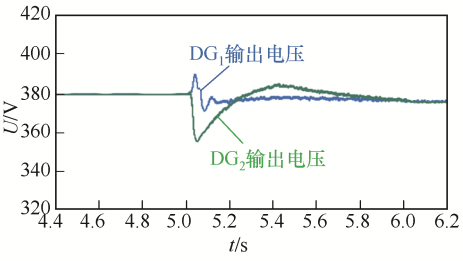


(b) 并网点电压幅值

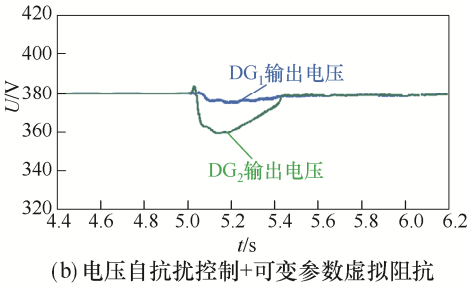
图 10 可变参数虚拟阻抗的 VSG 输出波形

Fig. 10 Waveforms of VSG output with variable-parameter virtual impedance

电压偏差，使 DG_1、DG_2 之间电压差为 0，避免环流的产生。但在调节过程中，可变参数虚拟阻抗因为采用 PI 控制方案，存在超调现象。采用一阶自抗扰控制+可变参数虚拟阻抗和采用本文所提电压自抗扰控制+可变参数虚拟阻抗得到的 VSG 输出电压对比波形如图 11 所示。



(a) 一阶自抗扰控制+可变参数虚拟阻抗



(b) 电压自抗扰控制+可变参数虚拟阻抗

图 11 不同自抗扰控制+可变参数虚拟阻抗的 VSG 输出电压对比波形

Fig. 11 Comparative waveforms of VSG output voltage with different auto-disturbance rejection control and variable-parameter virtual impedance

根据图 11 可知，对比图 10(b)，采用一阶自抗扰控制+可变参数虚拟阻抗对电压超调有一定抑制作用，但仍存在调节偏差与电压振荡现象；而采用本文所提电压自抗扰控制+可变参数虚拟阻抗控制，在面对 DG_2 输出功率减半时，不仅可以调节 DG_2 输出电压与 DG_1 一致，而且在调节过程中可以有效减少超调量，相较于无电压自抗扰控制，电压超调量减少 8 V，调节时间缩短 0.4 s，电压调节振荡明显减少，可以更快稳定至目标电压，因此本文所提电压自抗扰控制+可变参数虚拟阻抗控制对电压控制性能更优。

为了验证电压自抗扰控制对功率频繁变化引起电压波动的抑制能力，设定仿真工况为储能换流器输出有功功率在 0.2~0.7 MW 范围内随机波动，功率波动波形如图 12 所示，储能 PCS 输出电压对比波形如图 13 所示。

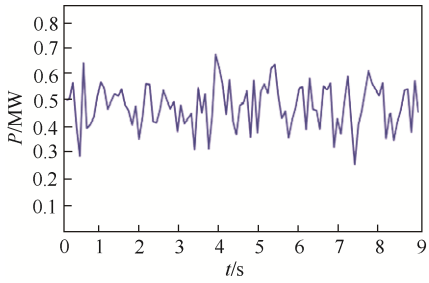


图 12　输出功率随机波动，功率变化波形

Fig. 12 Waveform of varying power under random fluctuation of output power

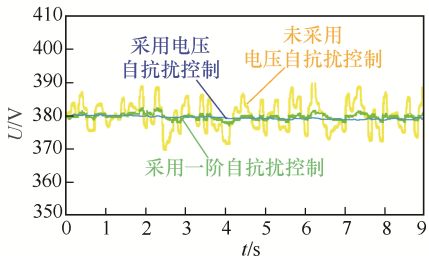


图 13　储能 PCS 输出电压对比波形

Fig. 13 Comparative waveforms of output voltage from energy storage PCS

根据图 12 和图 13 可知，当储能输出功率随机波动时，PCS 输出电压也会出现频繁调节现象，未采用电压自抗扰控制策略时，电压存在±12 V 的波动；采用一阶自抗扰控制对电压波动可以有效抑制，但还是存在±4 V 的波动；采用本文所提电压自抗扰控制策略时，电压几乎维持在 380 V，储能输出电压稳定，电压波动明显减小，控制系统鲁棒性能高，更适合于化学储能功率频繁调节。

5　结论

本文为了提升储能 VSG 环流抑制能力及电压控制鲁棒性，提出 1 种含有可变参数虚拟阻抗及二阶线性自抗扰控制的储能 VSG 控制方案，根据功率变化率设置不同虚拟阻抗使等效阻抗自适应变化，匹配不同功率变化，避免 PCS 设备之间环流产生。采用包含误差鲁棒积分跟踪模块的二阶线性自抗扰控制方法可以实现储能 PCS 输出电压稳定。

仿真结果表明，本文所提可变参数虚拟阻抗策略可以在储能减载工况下实时匹配功率变化并进行无功功率合理分配，精确调节储能 PCS 输出电压，减少 PCS 之间的电压偏差，避免环流现象产生。所提电压自抗扰控制策略可以减少电压调节过程中的超调量和调节时间，面对功率频繁调节工况，也可以维持 PCS 输出电压稳定在一定范围内，提升储能 VSG 控制系统鲁棒性。本文所提方法同样适用于多机储能控制领域，可提升储能电站整体电压控制水平。

参考文献：

[1] 李秉宇, 杜旭浩, 唐芬, 等. 储能变流器低频振荡机理研究及其抑制[J]. 电源学报, 2022, 20(2): 115-121.
Li Bingyu, Du Xuhao, Tang Fen, et al. Mechanism of low-frequency oscillations in energy storage converter and its suppression [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(2): 115-121. (in Chinese)

[2] 江风云. 考虑环流抑制的微网并联多逆变器稳定运行控制研究[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 41-47.
Jiang Fengyun. Research on stable operation control of parallel multi-inverter in microgrid considering circulating current suppression [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 41-47. (in Chinese)

[3] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J].

中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8, 前插 1.
Liu Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8, 前插 1. (in Chinese)

[4] 谢楠, 杨沛豪, 何萍, 等. 风光储微电网−火电机组黑启动全过程储能控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 75-82, 93.
Xie Nan, Yang Peihao, He Ping, et al. Research on energy storage control strategy during whole black start process of wind-PV-energy storage microgrid and thermal power unit [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(2): 75-82, 93. (in Chinese)

[5] 许傲然, 戴菁, 谷彩莲, 等. 基于 WOA 优化扩展卡尔曼算法的锂离子电池 SOC 估算研究[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 232-239.
XU Aoran, DAI Jing, GU Cailian, et al. Research on SOC Estimation of Lithium-ion Battery Based on WOA Optimized Extended Kalman Algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 232-239. (in Chinese)

[6] 郭向伟, 王晨, 钱伟, 等. 电池储能系统均衡方法研究综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4204-4225.
Guo Xiangwei, Wang Chen, Qian Wei, et al. A review of equalization methods for battery energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4204-4225. (in Chinese)

[7] Wang Wei, Lei Xiaoben, Wei Bin, et al. Research on adaptive droop control strategy of DC active power and voltage in DC microgrid [C]// 2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA). Nanjing, China, 2023: 627-632.

[8] 邓鹏, 杨沛豪. 混合储能虚拟同步机频率优化调节研究[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 142-151.
Deng Peng, Yang Peihao. Research on frequency optimal regulation of hybrid energy storage virtual synchronous generator [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 142-151. (in Chinese)

[9] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4274-4285.
Pan Zixun, Yang Xiaofeng, Zhao Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274-4285. (in Chinese)

[10] 孙钢虎, 王恩南, 贺婷, 等. 基于自适应暂态下垂控制的光伏频率快速响应方案[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 94-100.
Sun Ganghu, Wang Ennan, He Ting, et al. Fast response scheme of photovoltaic frequency based on self-adaptive transient droop control [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 94-100. (in Chinese)

[11] 郝翊帆, 郭昆丽, 郝翊彤, 等. 微网储能动态虚拟同步机控制及超级电容单元配置研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 110-117.
Hao Yifan, Guo Kunli, Hao Yitong, et al. Research on control of dynamic virtual synchronizer and configuration of super capacitor unit for micro grid energy storage [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6): 110-117. (in Chinese)

[12] 许立, 董成哲. 基于虚拟阻抗的低压微网多逆变器环流抑制研究[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 161-168.
Xu Li, Dong Chengzhe. Study on circulating current suppression of multi inverter in low-voltage microgrid based on virtual impedance [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 161-168. (in Chinese)

[13] 卢星升, 张继红, 谢波, 等. 自适应虚拟阻抗的不平衡负载功率均分控制[J]. 电力电子技术, 2023, 57(6): 61-65, 108.
Lu Xingsheng, Zhang Jihong, Xie Bo, et al. Unbalanced load power sharing control based on adaptive virtual impedance [J]. Power Electronics, 2023, 57(6): 61-65, 108. (in Chinese)

[14] 崔健, 房建军. 虚拟直流电机技术参数分析及虚拟惯量自适应控制[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 192-202.
Cui Jian, Fang Jianjun. Parameters analysis and virtual inertia adaptive control of virtual DC motor technique [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 192-202. (in Chinese)

[15] 魏妍萍, 王军, 李南帆, 等. 适用于微网中储能变换器的并网开关控制策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 156-163.

(下转第 232 页)

21(1): 168-176. (in Chinese)

[25] Saha B, Goebel K. Battery Data Set. NASA Ames Prognostics Data Repository [DS/OL]. Moffett Field, http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-datarepository.

[26] Severson K A, Attia P M, Jin N, et al. Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation [J]. Nature Energy, 2019, 4(5): 383-391.

[27] Wu Ji, Zhang Chenbin, Chen Zonghai. An online method for lithium-ion battery remaining useful life estimation using importance sampling and neural networks [J]. Applied Energy, 2016, 173: 134-140.



宁雪峰

作者简介：

宁雪峰(1980—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：大规模储能技术，新能源与分布式发电。E-mail：754082537@qq.com。

石正禄(1996—)，男，中国电源学会会员，博士研究生。研究方向：大规模储能技术。E-mail：zlshi0305@hnu.edu.cn。

许加柱(1980—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：交直流电能变换新技术。E-mail：xjz@hnu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)

(上接第 154 页)

Wei Yanping, Wang Jun, Li Nanfan, et al. Grid-connected switch control strategy suitable for energy storage converter in microgrid [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 156-163. (in Chinese)

[16] Ju Zeli, Lü Xinliang, Wu Biao, et al. Advanced model predictive control for three-phase inverter circuit based on disturbance observer [C]// 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Xi'an, China, 2019: 900-904.

[17] 郑昊, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 混合储能双向DC/DC变换器线性自抗扰控制研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56(9): 80-83.

Zheng Hao, Du Guiping, Lei Yanxiong, et al. Research on linear active disturbance rejection control of hybrid energy storage bidirectional DC/DC converter [J]. Power Electronics, 2022, 56(9): 80-83. (in Chinese)

[18] 赵耀, 赵毅君, 周扬. 基于模糊 PI 控制的双级式储能变流器运行特性仿真分析[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2023, 33(1): 16-22.

Zhao Yao, Zhao Yijun, Zhou Yang. Simulation analysis of operating characteristics of two-stage power conversion system based on fuzzy PI control [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 33(1): 16-22. (in Chinese)

[19] 赵峰, 帅智康, 彭也伦, 等. 含电流限幅器的逆变器暂态稳定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2245-2255.

Zhao Feng, Shuai Zhikang, Peng Yelun, et al. Evaluation method for transient stability of inverter containing current limiter [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2245-2255. (in Chinese)

[20] 荆哲, 米珂, 张浩淼, 等. 基于抗扰动观测器的光储反相均流 DC-DC 变换电路控制策略[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 71-77.

Jing Zhe, Mi Ke, Zhang Haomiao, et al. Control strategy of inverse current sharing DC-DC converter based on anti disturbance observer [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 71-77. (in Chinese)



李祥柱

作者简介：

李祥柱(1999—)，男，硕士。研究方向：新能源电力系统技术研究。E-mail：13681392657@163. com

徐永海(1966—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源电力系统技术研究。E-mail：yonghaixu@263.net

(责任编辑：孙美菊)