

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231633

# 融合储能的光伏发电系统并网逆变器建模与稳定性分析

沈赋<sup>1</sup>, 李施伟<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>, 付玉<sup>1</sup>, 杨光兵<sup>1</sup>, 张微<sup>1</sup>, 翟苏巍<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 以新能源为主体的新型电力系统中, 大量电力电子器件接入系统, 导致其暂态行为改变且拓扑结构状态变量阶数变高。针对上述问题, 基于下垂控制方法建立了融合储能的光伏发电系统并网逆变器模型, 采用奇异摄动降阶理论与变量梯度法构建了其李雅普诺夫函数。然后, 将构建的李雅普诺夫函数与等面积法则相结合, 分析了储能系统的接入对新能源系统功角稳定的影响, 同时验证了储能系统对光伏系统出力支撑以及出力波动的抑制能力。最后, 基于 Matlab 仿真结果对融合储能的新能源系统特性进行了分析和验证。

**关键词:** 光储融合; 并网逆变器; 奇异摄动; 李雅普诺夫函数; 功角稳定

## Modeling and stability analysis of a photovoltaic grid-connected inverter integrated with an energy storage system

SHEN Fu<sup>1</sup>, LI Shiwei<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, FU Yu<sup>1</sup>, YANG Guangbing<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHAI Suwei<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** When a large number of power electronic devices are connected to a system, this results in changes in their transient behavior and an increase in the order of the topological structure state variables in a new power system dominated by new energy. A grid-connected inverter model for photovoltaic generation systems incorporating energy storage based on droop control methodology is established, and its Lyapunov function is constructed using singular perturbation reduction theory and the variable gradient method. Then, the influence of energy storage system integration on the power angle stability of new energy systems is analyzed by combining the constructed Lyapunov function with the equal area criterion. Additionally, the capability of energy storage systems to support system output and suppress fluctuations in photovoltaic system output is verified. Finally, the characteristics of integrated energy storage in new energy systems are analyzed and validated based on Matlab simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52107097).

**Key words:** PV integrated with energy storage; grid-connected inverter; singular perturbation; Lyapunov function; power angle stability

## 0 引言

新能源发电具有波动性的特点, 风电、光伏等新能源大规模集中并网对电网的规划、运行都将提出新的挑战。为平抑新能源的功率波动, 储能技术受到了越来越多的重视。根据电能转换方式的不同,

储能技术分为机械、电磁和化学储能三大类, 其中电池储能系统(battery energy storage system, BESS)具有动态吸收能量并适时释放的特点, 可以平滑风能、太阳能等新能源输出功率的波动性, 是间歇性可再生能源发电设备必要的补充<sup>[1-6]</sup>。同时, 新能源系统的并网会导致大量的电力电子装置接入电网, 使电力系统面临设计复杂、系统稳定运行分析困难等问题<sup>[7]</sup>。

为促进储能与光伏、风电等新能源系统结合应用, 国家出台了一些政策给予支持。2021年7月, 国家发改委和能源局联合指出 2025 年新型储能装

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52107097); 云南省兴滇英才支持计划项目资助(KKRD202204021); 云南省应用基础研究计划项目资助(202101BE070001-061, 202201AU070111); 昆明理工大学高层次人才平台建设项目资助(KKZ7202004004)

机规模目标为 30 GW；同年 10 月，在《2030 年前碳达峰行动方案通知》中强调优化基础设施用能结构，采用直流供电、分布式储能和“光伏+储能”等模式，以实现多样化能源供应，提高非化石能源消费比重<sup>[8-9]</sup>。各省份在电源侧与电网侧积极推进“新能源+储能”项目模式，提升资源消纳，促进能源应用，有效平抑新能源独立运行并网所引起的波动性问题<sup>[10-12]</sup>。而在储能结合光伏发电系统这一应用场景下，需要建立光储融合系统模型来分析储能对光伏系统的影响。文献[13]建立了基于戴维南等效电路的储能系统模型，通过多时间尺度的储能系统仿真模型验证了所建立的储能系统模型具有良好的适用性；文献[14]针对间歇性电源并网出力波动的问题，提出一种有效抑制功率波动的光储融合发电模型，并采用外环功率与内环电流控制策略，通过仿真验证说明所提风光储融合发电模型及控制策略可有效地抑制风光系统功率波动；文献[15-16]为提升光储混合系统的稳定运行，均提出了 MPPT 与其他方法进行统一，通过实验验证该控制方法能够改善系统的控制性能，提升能量利用效率；文献[17]基于独立光储系统，提出基于稳压控制的控制策略，通过仿真验证所提控制策略能够维持光储系统稳定输出；文献[18]为研究储能电池对电网的影响，提出了一种电池储能系统的多时间尺度仿真模型，通过仿真验证得出储能系统对电网稳定性有改善作用且能够抑制新能源发电系统的功率波动；储能系统应用于新能源系统，能够有效地抑制新能源系统的出力波动并且提升系统的电能质量。

光储融合系统进行并网，逆变器起着关键的作用，而电力电子装置的接入会影响系统的暂态稳定性。文献[19]阐述了当大量电力电子设备接入后，采用机电暂态与电磁暂态相结合的混合仿真能够提升对系统的分析能力；文献[20]基于微分代数系统稳定性分析了新能源发电系统暂态稳定问题，暂态过程中系统发生暂态电压失稳时新能源发电系统的功率平衡方程无解，通过仿真验证得出系统失稳时存在由同步机的功角失稳变为风电主导的电压失稳的情况；文献[21]将电力电子化电力系统的暂态稳定性分析划分为三个层次，研究了电力电子化电力系统与传统电力系统的暂态稳定性分析的差异，提出了分析电力电子化电力系统暂态稳定性的方法；文献[22]分析了电力电子变换装备暂态特性以及电力电子化电力系统暂态过程特征的基本特征，总结了电力电子化电力系统多尺度非线性暂态问题分析的基本挑战与初步研究思路。逆变器的建模是电力电子化系统稳定性分析工作的关键，其根据电网结构可构

建具有 L 型滤波器或考虑电网阻抗的三相模型<sup>[23-24]</sup>，也可构建低阶数的逆变器小信号模型<sup>[25-26]</sup>，从而分析系统参数对稳定性的影响以及系统的小信号稳定；为了分析系统的暂态稳定，采用等面积法则可分析在大扰动下逆变器的稳定性，或是分析逆变器的暂态功角稳定<sup>[27-28]</sup>。但是在电力电子化的系统中，电力电子器件的模型往往呈现出高阶性，模型降阶有助于简化问题的求解过程，提高计算效率。其中，采用奇异摄动降阶法能够将高阶微分方程系统降阶为更简单的形式，避免直接求解高阶微分方程而导致计算复杂度的增加<sup>[21,29-30]</sup>；在分析电力电子化系统的稳定性时，能量函数法能够直观地评估系统的稳定性，通常采用变量梯度法、克拉索夫斯基法和线性矩阵不等式法构造能量函数，其中变量梯度法适用于线性和非线性系统，具有灵活性和高效的收敛性，可快速确定系统的稳定点<sup>[21,31]</sup>；当光储联合系统并网时，通常采用下垂控制来调节有功与无功的控制系数，进而调整电网的电压和频率以平衡各系统的出力<sup>[32-33]</sup>，满足电网稳定运行的需求。

目前，新能源系统的出力具有较强的不确定性，其并网后会影响到系统的稳定运行状态，储能系统的应用能够抑制新能源系统出力的波动，但是储能系统和新能源系统的应用会导致大量电力电子装置并入电网，随着电力电子器件的动作，电网的拓扑结构非线性程度增强、结构变得复杂，同时导致系统模型状态方程阶数更高，这些特点给光储融合并网后系统的稳定性分析带来了挑战。针对以上问题，首先，本文采用基于下垂控制的逆变器模型，分析了储能对新能源出力的支撑与抑制波动的能力，基于此模型构建了其状态空间方程；其次，采用奇异摄动法对逆变器状态空间方程进行降阶处理，简化稳定性分析计算过程；最后，基于逆变器的低阶状态空间方程，采用变量梯度法构建了其李雅普诺夫函数，分析储能接入后对光伏系统功角稳定的影响，求解在不同的运行状态下系统的功角稳定域。

## 1 光储融合系统模型

### 1.1 光伏并网模型

并网型光伏发电系统主要由光伏阵列、控制器、并网逆变器和电网组成，基本结构如图 1 所示。

在光伏发电系统中，光伏是核心部件，该部件通过光伏打效应将光能转化为电能，但单体的太阳能电池所输出的电压、电流和功率较小，不能达到作为电源的要求。所以在实际运行中将太阳能电池进行组合，使光伏系统输出的电压和功率能够达到作为电源的要求，即光伏阵列。此外，根据不同的需求

可变换光伏阵列的规模, 可将光伏进行串并联组合。

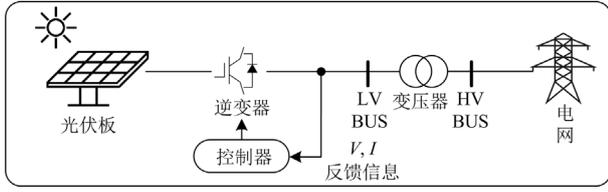


图1 光伏发电系统基本结构图

Fig. 1 Basic structure diagram of photovoltaic power generation system

光伏系统的输出功率如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{PV} = \frac{3}{2}(U_{gd}I_d + U_{gq}I_q) \\ Q_{PV} = \frac{3}{2}(U_{gd}I_q - U_{gq}I_d) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{PV}$ 、 $Q_{PV}$  分别为光伏系统输出的有功功率和无功功率;  $U_{gd}$ 、 $U_{gq}$  和  $I_d$ 、 $I_q$  分别为光伏系统并网点的  $d$ 、 $q$  轴电压、电流分量。若式(1)中存在电网电压与  $U_{gd}$  相同的情况, 则式(1)中  $U_{gq}$  为 0, 此时可将式(1)转换为

$$\begin{cases} P_{PV} = \frac{3}{2}U_{gd}I_d \\ Q_{PV} = \frac{3}{2}U_{gd}I_q \end{cases} \quad (2)$$

为描述光伏发电系统的特性, 本文建立了如图2所示的光伏发电系统的动态等效模型。其中:  $U_{dc}$  为光伏侧直流电压;  $I_{pv}$  为光伏侧输出电流;  $V_i$  为逆变器出口电压;  $I_1$  为并网电流;  $U_g$  为并网电压。

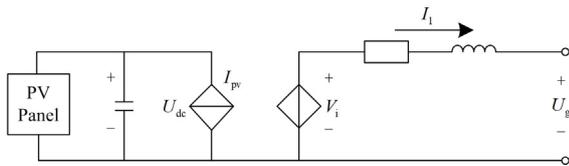


图2 光伏发电系统动态等效模型

Fig. 2 Dynamic equivalent model of photovoltaic power generation system

光伏发电系统动态模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L}(U_{id} - U_{gd} - I_d R) - \omega_0 I_q \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L}(U_{iq} - U_{gq} - I_q R) + \omega_0 I_d \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{pv} - 1.5s_d I_d - 1.5s_q I_q) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $U_{dc}$  为光伏直流侧电压;  $L$  为等值电感;  $C$  为光伏发电系统直流侧电容;  $\omega_0$  为电网角频率;  $I_{pv}$  为光伏侧输出电流;  $s_q$  和  $s_d$  分别为开关量在同步坐标轴下的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $U_{id}$ 、 $U_{iq}$  分别为逆变器出口电压的  $d$ 、 $q$  轴分量。

## 1.2 储能模型

电力系统安装储能主要是为了应对可再生能源的消纳和频率波动问题。储能根据其工作原理可分为物理储能、电化学储能和电磁储能, 目前, 一般利用超导材料和超级电容作为储能。在储能电池等效模型中, 戴维南等效模型使用较多, 等效电路如图3所示。其中: 理想电压源  $E_b$  为电池开路电压, 与电池荷电状态(state of charge, SOC)有关; 电阻  $R_c$  与电容  $C$  组成过电势网络表示电池极化反应;  $R_s$  为电池中电极板、电解液和间隔板的电阻。

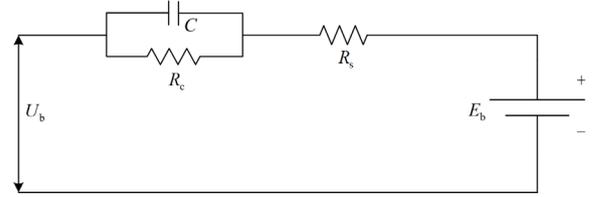


图3 储能电池的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of energy storage battery

为了将储能与光伏发电模型进行联立, 储能电池模型可等效为

$$S_{SOC} = S_0 - \frac{1}{Q_n} \int P_{es} dt \quad (4)$$

式中:  $S_{SOC}$  为电池的储能容量;  $S_0$  为 SOC 初始值;  $Q_n$  为电池储能的额定值;  $P_{es}$  为储能电池的功率输出。

将储能电池模型转换为功率模型, 如式(5)所示。

$$P_{es} = Q_n (S_0 - S_{SOC}) \quad (5)$$

## 1.3 光储融合并网模型

光储融合并网等效模型如图4所示。光伏发电系统向逆变器传输的有功功率和无功功率如式(2)所示, 储能系统向逆变器传输的功率如式(5)所示。光伏发电系统、储能系统和逆变器三者之间的能量传输关系如式(6)所示。

$$P_{inv} = P_{pv} + P_{es} \quad (6)$$

式中,  $P_{inv}$  为逆变器输出功率。

光储融合系统中, 光伏系统与储能系统通过逆变器进行协同工作, 采用复杂的功率控制以协调两个系统的功率输出, 实现对系统整体效率、稳定性和灵活性的提高<sup>[34-35]</sup>。因此, 并网型逆变器的建模

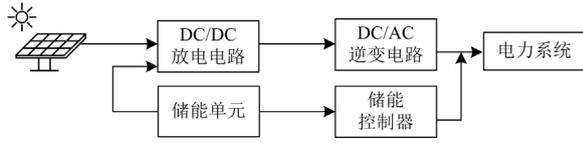


图4 光储融合并网等效模型

Fig. 4 Equivalent model of optical storage joint grid connection

在光储融合并网中起着重要作用。在实际生产中，系统主要由光伏提供电能并对储能系统进行充电，当光伏的出力受到环境和天气因素影响时，储能系统能够对系统进行供电，给予光伏发电系统电能支撑。光伏系统和储能系统向电网传输电能需要通过逆变器进行传输，而新能源的接入会引起电网系统的不稳定，此时逆变器需采用合理的控制方式对光储系统输出功率进行灵活调节，以提升新能源发电系统并网后电网的稳定性。

## 2 并网型逆变器的李雅普诺夫模型

对电力电子化系统进行稳定性分析需将电力电子器件模型转变为李雅普诺夫函数，而在稳定性分析中电力电子器件模型可分为以下3种：状态空间模型、分段线性模型和离散时间模型。其中状态空间模型在建模复杂程度、适用性以及复杂系统扩展性等方面均优于其他两种建模方法且更适用于构建李雅普诺夫函数。在光储融合系统中，采用下垂控制的逆变器可为系统提供电压和频率的支撑，且能够通过其动态模型直接构建状态空间方程，便于构建稳定性分析时所需的李雅普诺夫函数。

### 2.1 下垂控制的逆变器模型

下垂控制方法如下：由电压、电流传感器和调理电路组成的测量单元对逆变器输出的电压电流进行同步采样，由下垂控制中的功率计算单元计算出逆变器输出的有功功率和无功功率的平均值，通过P-f和Q-V的下垂特性方程计算出电压和频率指令，参考电压环节将电压和频率指令合成在d,q轴上的电压给定送入电压电流闭环控制环节，双闭环控制环节经PI调节获得SVPWM所需要的参量。下垂控制三相逆变器系统结构图如图5所示。其中： $U_{0abc}$ 和 $I_{0abc}$ 分别为逆变器输出电压与电流的采样值； $P$ 、 $Q$ 分别为计算出的逆变器输出有功功率和无功功率的平均值； $f$ 、 $U_0$ 分别为下垂方程计算电压与频率； $U_{ref}$ 为参考电压。

下垂控制框图如图6所示。其中： $k_p$ 、 $k_q$ 分别为有功功率和无功功率的下垂控制系数； $P_s$ 、 $Q_s$ 分别为有功功率和无功功率设定值。

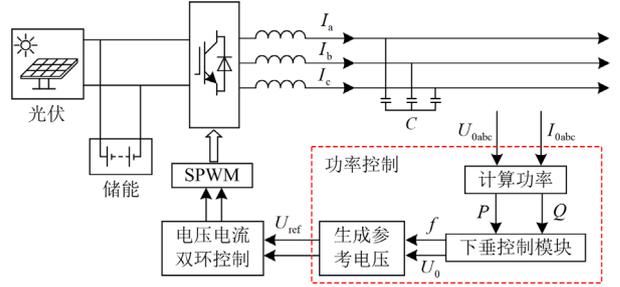


图5 下垂控制三相逆变器系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of droop control three-phase inverter system

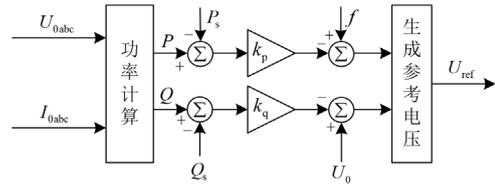


图6 下垂控制框图

Fig. 6 Block diagram of droop control

基于下垂控制的逆变器动态数学模型如式(7)所示<sup>[28,36-38]</sup>。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \omega_1 \omega_0 - \omega_1 \omega - \omega_1 k_p (P - P_s) \\ \dot{E} = \omega_1 U_m - \omega_1 E - \omega_1 k_q (Q - Q_s) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P = \frac{EU}{X_s} \sin \delta \\ Q = \frac{EU}{X_s} \cos \delta - \frac{U^2}{X_s} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\delta$ 为逆变器虚拟功角； $\omega$ 、 $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 分别为逆变器输出端口的角频率、电网角频率和滤波器角频率； $E$ 、 $U$ 、 $U_m$ 分别为逆变器的输出电压、电网电压和参考电压幅值； $X_s$ 为线路的等效电抗。将式(7)与式(8)结合后可以得出逆变器的三阶非线性模型，如式(9)所示。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \omega_1 \omega_0 - \omega_1 \omega - \omega_1 k_p \left( \frac{EU}{X_s} \sin \delta - P_s \right) \\ \dot{E} = \omega_1 U_m - \omega_1 E - \omega_1 k_q \left( \frac{EU}{X_s} \cos \delta - \frac{U^2}{X_s} - Q_s \right) \end{cases} \quad (9)$$

并网逆变器系统的参数如下：电网频率为50 Hz，工频电压为5773.5 V， $P_s$ 、 $Q_s$ 分别为50 kW和0 var，有功下垂系数 $k_p$ 与无功下垂系数 $k_q$ 为 $1 \times 10^{-4}$ ，滤波电感为0.4 mH，滤波电容为0.5 mF，

截止频率为 355 Hz。可将式(9)改写为式(10)。

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = x_2 - 314.16 \\ \dot{X}_2 = 711891.9 - 2230.5x_2 - 9680.4x_3 \sin x_1 \\ \dot{X}_3 = 55750000 - 2230.5x_3 - 9680.4x_3 \cos x_1 \end{cases} \quad (10)$$

将系统的状态变量表示为  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3]^T = [\delta, \omega, E]$ 。经过求解得到系统的平衡点为  $\mathbf{X}_0 = [0.000046, 314.16, 24989.39]$ 。

将模型由平衡点向原点平移可以得到如式(11)所示的状态空间方程。

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = z_2 \\ \dot{Z}_2 = 11158.02 - 2230.5z_2 - 241907291 \sin z_1 - \\ \quad 9680.4z_3 \sin z_1 - 0.078z_3 \sin z_1 - 194.22 \cos z_1 \\ \dot{Z}_3 = 11165.6 - 2230.5z_3 - 241907291 \cos z_1 - \\ \quad 9680.4z_3 \cos z_1 + 0.078z_3 \sin z_1 + 194.22 \sin z_1 \end{cases} \quad (11)$$

系统由平衡点向原点平移后的状态变量由  $\mathbf{Z}$  进行表示,  $\mathbf{Z} = [z_1, z_2, z_3]^T = [\delta + \delta_0, \omega + \omega_g, E + E_0]^T$ , 其中  $\delta_0$ 、 $\omega_g$ 、 $E_0$  分别为系统平衡出的逆变器虚拟功角、电网角频率和逆变器的输出电压。

## 2.2 奇异摄动法降阶

为简化稳定性分析中的计算过程, 本文采用奇异摄动法对式(11)所示的三阶状态空间方程进行分解, 将其拆分为两个或多个低阶系统进行求解<sup>[21,39-40]</sup>。

三阶系统表达式如式(12)所示。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, z) \\ \frac{dy}{dt} = g(x, y, z) \\ \frac{dz}{dt} = h(x, y, z) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为系统状态变量。

基于奇异摄动法的三阶系统降阶步骤如下<sup>[23]</sup>: 首先计算全阶系统的平衡点, 将系统全阶模型向平衡点移动; 其次引入变量  $\varepsilon$  作为缩放参数, 该参数用于衡量系统中快速和慢速变化之间的差异, 并定义新的时间变量  $\tau = \varepsilon t$  用于描述系统的快慢速变化; 最后将系统分解为快速和慢速变化两部分, 其表达式如式(13)所示。

$$\begin{cases} x = x_0(\tau, t) + \varepsilon x_1(\tau, t) + \varepsilon^2 x_2(\tau, t) \\ y = y_0(\tau, t) + \varepsilon y_1(\tau, t) + \varepsilon^2 y_2(\tau, t) \\ z = z_0(\tau, t) + \varepsilon z_1(\tau, t) + \varepsilon^2 z_2(\tau, t) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $x_0$ 、 $y_0$  和  $z_0$  是慢速变化部分;  $x_1$ 、 $y_1$  和  $z_1$  是

快速变化部分;  $x_2$ 、 $y_2$  和  $z_2$  是更高阶的快速变化部分。其中, 系统一阶和二阶快慢速变化方程见附录 A 中式(A1)和式(A2)。

通过摄动展开后求解快速变量的表达式并代入慢速变化方程中消除快速变量, 可得到二阶的系统状态方程。采用奇异摄动法对式(11)降阶后为

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = z_2 \\ \dot{Z}_2 = 11158.02 - 2230.5z_2 - \\ \quad 241907291 \sin z_1 - 194.22 \cos z_1 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)化简为

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = z_2 \\ \dot{Z}_2 = -2230.5z_2 + f(z_1) \\ f(z_1) = 11158.02 - 241907291 \sin z_1 - 194.22 \cos z_1 \end{cases} \quad (15)$$

## 2.3 李雅普诺夫函数构造

在电力系统的暂态稳定性分析中, 等面积法则利用系统在故障前、中、后的 3 条功角特性曲线计算加速与减速的面积。此外, 电力系统中主要受到两种类型的扰动: 连续性扰动, 受到扰动后电力系统会进入新的平衡状态; 短暂性扰动, 受到扰动后电力系统会在清除扰动后恢复到原来的平衡状态。

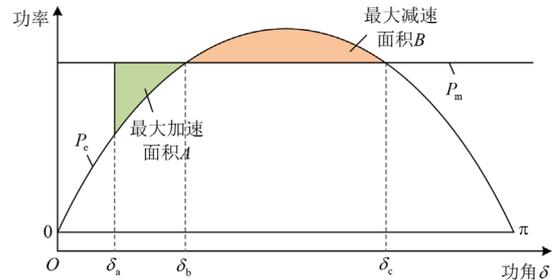


图 7 等面积法则示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the law of equal areas

如图 7 所示, 若面积  $A <$  面积  $B$ , 系统处于稳定状态; 反之若面积  $A >$  面积  $B$  时, 系统则处于不稳定状态; 若两部分面积相等, 系统则处于临界稳定。其中:  $P_e$  为等效电磁功率;  $P_m$  为等效机械功率;  $\delta_a$  为故障前功角;  $\delta_b$  和  $\delta_c$  为电磁功率和机械功率相等时的功角<sup>[27]</sup>。

而逆变器发生失稳的机理较为复杂, 通过构建逆变器的李雅普诺夫函数模型分析光伏发电系统融合储能系统后的功角稳定较为困难。当逆变器的有功功率参考值大于电网的最大传输能力时, 会致使系统失稳。而系统输入的功率也会随着光伏发电系统的渗透率逐渐增加而增加, 这将导致逆变器的传

输功率超出极限而引发失稳。通过对逆变器进行建模,将光伏发电系统与储能系统相结合对系统进行稳定性分析。非线性系统可能存在局部稳定平衡态和不稳定平衡态,稳定性的分析比线性系统复杂,可采用线性矩阵不等式法、克拉索夫斯基法和变量梯度法构造李雅普诺夫函数来分析其稳定性。其中,采用克拉索夫斯基法所构造的系统李雅普诺夫函数推导过程见附录 B,所构建的系统李雅普诺夫函数如式(16)所示;采用线性矩阵不等式方法(linear matrix inequality, LMI)所构造的系统李雅普诺夫函数推导过程见附录 C,所构建的系统李雅普诺夫函数如式(17)所示。

$$V(z) = z_2^2 + (2230.5z_1 + 194.229 \cos z_1 + 241907291 \sin z_1 - 11158.02)^2 \quad (16)$$

$$V(z) = \delta^2(z_1 + z_2 + 2z_1z_2) \quad (17)$$

而变量梯度法具有较优的灵活性与收敛性,采用变量梯度法进行构造,其中变量梯度  $\Delta V(x)$  为

$$\Delta V(x) = \frac{\delta v(x)}{\delta x} = \begin{bmatrix} \frac{\delta v(x)}{\delta x_1} \\ \frac{\delta v(x)}{\delta x_2} \\ \vdots \\ \frac{\delta v(x)}{\delta x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_1(x) \\ \Delta V_2(x) \\ \vdots \\ \Delta V_n(x) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中,  $x$  为系统状态变量。

$$\frac{dv(x)}{dt} = \frac{\delta v(x)}{\delta x_1} \frac{\delta x_1}{\delta t} + \dots + \frac{\delta v(x)}{\delta x_n} \frac{\delta x_n}{\delta t} = \left( \frac{\delta v(x)}{\delta x_1}, \dots, \frac{\delta v(x)}{\delta x_n} \right) \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \quad (19)$$

$$[\Delta V(x)]^T \dot{X} = \text{grad}V \cdot \dot{X}$$

向量函数  $\Delta V(x)$  是数量函数的梯度,式(19)可转换为如式(20)所示的雅可比矩阵  $M$ 。

$$M = \begin{pmatrix} \frac{\delta v_1}{\delta x_1} & \frac{\delta v_2}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta v_n}{\delta x_1} \\ \frac{\delta v_1}{\delta x_2} & \frac{\delta v_2}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta v_n}{\delta x_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta v_1}{\delta x_n} & \frac{\delta v_2}{\delta x_n} & \dots & \frac{\delta v_n}{\delta x_n} \end{pmatrix} \quad (20)$$

若雅可比矩阵  $M$  为对称矩阵,则

$$\Delta V(x) = \begin{bmatrix} \frac{\delta v(x)}{\delta x_1} \\ \vdots \\ \frac{\delta v(x)}{\delta x_n} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n \end{pmatrix} \quad (21)$$

式中,  $a_{ij}$  为待定的系数。

根据稳定性的需求对梯度进行约束,可表示为

$$\frac{dv(x)}{dt} < 0 \quad (22)$$

利用势场的理论可得

$$\frac{\delta v_j(x)}{\delta x_i} = \frac{\delta v_i(x)}{\delta x_j} \quad (23)$$

将式(21)与式(23)结合可以求解出变量梯度法中的系数矩阵。

根据求解出的梯度  $\Delta V(x)$  进行李雅普诺夫函数构造,可得式(24)。

$$V(x) = \int_0^{v(x)} dv(x) = \int_0^x \frac{dv(x)}{dx} dv(x) = \int_0^x [\Delta v(x)]^T \dot{x} dt = \int_0^x [\Delta v(x)]^T dx = \int_0^x [\Delta v_1(x), \dots, \Delta v_n(x)] \begin{bmatrix} dx_1 \\ \vdots \\ dx_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

将式(24)简化可得式(25)。

$$V(x) = \int_0^{x_1(x_2=\dots=x_n=0)} \Delta V_1(x) dx_1 + \int_0^{x_2(x_1=\dots=x_n=0)} \Delta V_2(x) dx_2 + \dots + \int_0^{x_{n-1}(x_1=\dots=x_{n-2}=x_n=0)} \Delta V_{n-1}(x) dx_{n-1} + \int_0^{x_n(x_1=\dots=x_{n-1}=0)} \Delta V_n(x) dx_n \quad (25)$$

将式(15)按照上述方法进行计算,可构造出满足条件的梯度系数:

$$\begin{cases} a_{11} = (2230.5^2 f(z_1))/z_1 \\ a_{12} = 2230.5 \\ a_{21} = 2230.5 \\ a_{22} = 2 \end{cases} \quad (26)$$

构造并网逆变器的李雅普诺夫函数及其导数为

$$V(x) = \int_0^{x_1(x_2=\dots=x_n=0)} \Delta V_1(x) dx_1 + \int_0^{x_n(x_1=\dots=x_{n-1})} \Delta V_n(x) dx_n = \int_0^{z_1(x_2=0)} (a_{11}z_1 + a_{12}z_2) dz_1 + \int_0^{z_2(z_1=z_1)} (a_{21}z_1 + a_{22}z_2) dz_2 \quad (27)$$

$$\dot{V}(Z) = (\text{grad}V)^T \dot{Z} \quad (28)$$

将式(27)化简可得到并网逆变器的李雅普诺夫函数如式(29)所示。

$$V(z) = 0.5(2230.5z_1 + z_2)^2 + \begin{pmatrix} 11158.02 - 194.22\sin z_1 + \\ 241907291\cos z_1 - 241970291 \end{pmatrix} \quad (29)$$

当系统稳定运行时, 李雅普诺夫函数需满足式(30)和式(31)所示的条件。

$$V(z) \geq 0 \quad (30)$$

$$\dot{V}(z) \leq 0 \quad (31)$$

### 3 算例分析

#### 3.1 算例介绍

本文基于 Matlab/Simulink 构建了光储融合的并网发电系统, 其中包含光伏与储能单元、下垂控制单元、负荷等, 仿真模型简图如图 8 所示, 以验证光伏储能联合并网系统的稳定性。

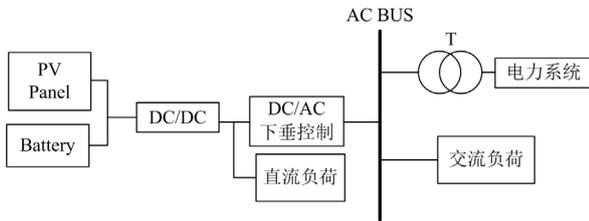


图 8 光储融合并网发电系统仿真模型图

Fig. 8 Simulation model diagram of photovoltaic storage combined grid connected power generation system

仿真具体设置如下。

##### 1) 输电系统参数

输电系统中基准相电压为 10 kV, 系统频率为 50 Hz, 系统采用三相串联 RLC 阻抗设置其有功功率为 280 kW。

##### 2) 光储融合系统参数

光储融合并网系统中采用三相并网型逆变器和 LC 型滤波器。其中, 电感为 0.4 mH, 电容为 0.0005 F。储能电池采用以锂离子电池为基础的通用模型, 该类模型能够指定温度和老化程度。光伏阵列和储能容量等参数设置如表 1 所示。光伏阵列的 I-V、P-V 曲线如附录 D 图 D1 所示。

表 1 光储融合系统初始参数设置

Table 1 Initial parameter settings for optical storage joint system

参数	数值
光伏并联数量/个	45
光伏串联数量/个	50
开路电压 $V_{oc}/V$	44.28
短路电流 $I_m/A$	8.56
储能容量/Ah	200

#### 3.2 算例分析

##### 1) 储能系统电能支撑能力

验证光伏发电系统在低渗透率的状态下, 储能系统接入后提升新能源系统出力的能力。设置光伏发电系统的渗透率为 10%, 储能系统的容量为 200 Ah, 根据所设置参数进行对比。通过获取并网逆变器出口处的有功功率, 对比分析不同运行状态下系统的有功出力。光伏发电系统单独运行时并网逆变器出口处的有功功率变化如图 9 中红色曲线所示, 光伏储能联合运行时并网逆变器出口处的有功功率变化如图 9 中蓝色曲线所示。

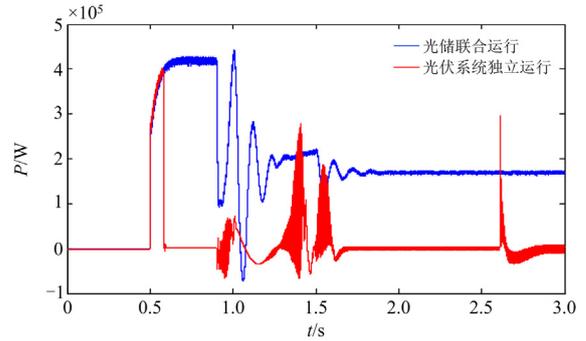


图 9 储能提升系统出力对比图

Fig. 9 Comparison diagram of energy storage and improvement system output

通过分析图 9 可知, 当光伏发电系统以较低的渗透率运行时, 向电网输入的功率过低, 而储能系统的接入能够提升新能源系统在低渗透率情况下系统的出力, 能够提供有效的电能支撑。

##### 2) 储能系统功率波动抑制能力

根据所构建的光储融合仿真系统, 设置系统参数如表 1 进行对比仿真, 验证储能系统抑制新能源发电系统出力波动的能力。获取并网逆变器出口处的有功功率, 对比分析不同运行状态下系统的有功出力。光伏发电系统单独运行时并网逆变器出口处的有功功率变化如图 10 中蓝色曲线所示, 光伏储能联合运行时并网逆变器出口处的有功功率变化如图 10 中红色曲线所示。表 2 为二阶系统的性能指标。其中:  $t_p$  为有功功率第一次到达峰值的时间;  $H(t_p)$  为有功功率的峰值;  $H(\infty)$  为有功功率的稳定值;  $\delta$  为超调量, 超调量越小其输出越平稳。

如图 10 所示, 在接入储能系统运行后系统所输出的有功功率波动比光伏系统单独运行时小。且根据表 2 所求参数分析可知, 接入储能系统后输出的有功功率到达峰值时间  $t_p$  比光伏系统独立运行时所需时间短, 且峰值更高; 接入储能系统后超调量  $\delta$  比光伏系统单独运行时小, 其有功功率输出较光伏系

统单独运行时波动小。

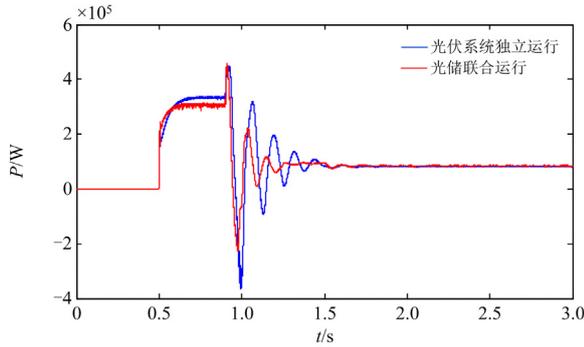


图 10 未融合与融合储能系统有功功率对比  
Fig. 10 Comparison of active power without/with energy storage systems

表 2 系统输出有功功率参数对比

Table 2 Comparison of system output active power parameters

系统运行类型	$t_p/s$	$H(t_p)/W$	$H(\infty)/W$	$\delta/rad$
光伏系统独立运行	0.9188	$4.51 \times 10^5$	$8.06 \times 10^4$	4.5955
光储融合运行	0.9085	$4.61 \times 10^5$	$8.35 \times 10^4$	4.5209

### 3) 系统功角稳定

验证在 3 种李雅普诺夫函数建模方法下储能系统的接入对系统稳定性的影响，对比接入和未接入储能系统时系统的功角变化，分析储能系统对系统功角的影响。设置光伏发电系统渗透率为 30%，储能容量为 200 Ah。

根据 Lyapunov 稳定性理论，当系统稳定运行时，需要满足式(30)和式(31)所示的要求。在相同的设置条件下，根据式(16)，采用 Matlab 工具仿真计算绘制基于克拉索夫斯基法的并网逆变器的李雅普诺夫函数如图 11 所示，光伏发电系统独立运行时李雅普诺夫函数如图 11 中蓝色曲线所示，光储融合运行时李雅普诺夫函数如图 11 中红色曲线所示，系统的  $\dot{V}(z)$  如图 11 中黑色曲线所示。同时，根据式(29)，通过仿真计算绘制采用变量梯度法和线性矩阵不等式的并网逆变器的李雅普诺夫函数如图 12 所示，其中基于变量梯度法时，光伏发电系统独立运行时李雅普诺夫函数如图 12 中蓝色曲线所示，光储融合运行时李雅普诺夫函数如图 12 中红色曲线所示，系统的  $\dot{V}(z)$  如图 12 中黑色曲线所示；基于线性矩阵不等式法时，光伏发电系统独立运行时李雅普诺夫函数如图 12 中蓝色曲线所示，光储融合运行时李雅普诺夫函数如图 12 中绿色曲线所示，系统的  $\dot{V}(z)$  如图 12 中青色曲线所示。

通过观察图 11 可知，根据式(30)和式(31)的条

件约束，在相同的渗透率下，储能系统接入系统后通过基于克拉索夫斯基法的李雅普诺夫函数求解系统的功角稳定域，在光伏独立运行和光储融合运行两种状态下，系统李雅普诺夫函数无明显变化且系统的功角稳定域一致，无法通过此方法求解系统具体的功角稳定域。而根据式(30)和式(31)所示的稳定条件，求解出如表 3、表 4 所示的系统功角稳定域。

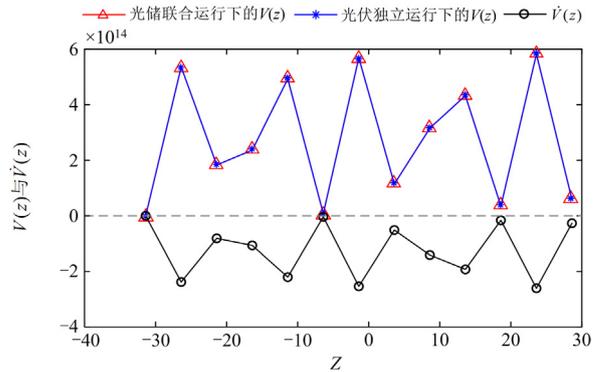


图 11 基于克拉索夫斯基法的李雅普诺夫函数  
Fig. 11 Lyapunov function based on Krasovskiy method

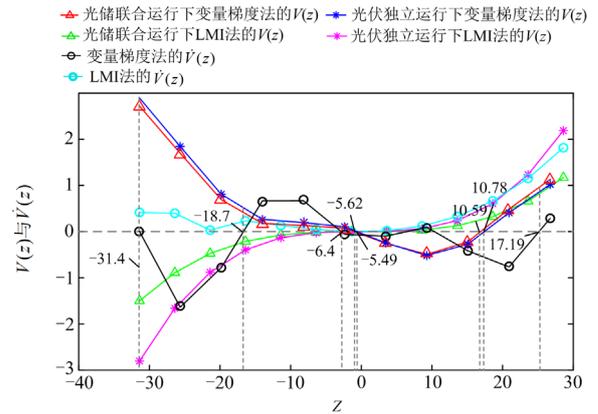


图 12 不同方法下李雅普诺夫函数功角求解  
Fig. 12 Solving the power angle of Lyapunov function with different methods

表 3 不同方法下李雅普诺夫函数功角稳定域

Table 3 Stable domain of Lyapunov function power angle with different methods

建模方法	系统运行类型	功角稳定域/rad		
变量梯度法	光伏系统独立运行	[-31.4, -18.7]	[-6.4, -5.49]	[10.78, 17.19]
	光储融合运行	[-31.4, -18.7]	[-6.4, -5.62]	[10.59, 17.19]
线性矩阵不等式法	光伏系统独立运行	0	0	0
	光储融合运行	0	0	0

表 4 不同方法下李雅普诺夫函数功角稳定域差值

Table 4 Difference in the stable region of Lyapunov function power angle with different methods

建模方法	系统运行类型	功角稳定域差值/rad
变量梯度法	光伏系统独立运行	20.02
	光储融合运行	20.08
线性矩阵不等式法	光伏系统独立运行	0
	光储融合运行	0

根据式(30)和式(31)的条件约束, 通过分析图 12 和表 3、表 4 可知, 在相同的渗透率下, 储能系统接入系统后基于变量梯度法的李雅普诺夫函数呈现出不同的运行状态, 并且光储融合运行下系统的功角稳定域大于光伏独立运行时的功角稳定域。在相同条件下, 采用基于线性矩阵不等式法的李雅普诺夫函数的功角稳定域在光伏系统独立运行和光储融合运行两种状态下均为 0, 采用此方法无法求解出功角稳定域。因此, 相较于克拉索夫斯基法和线性矩阵不等式法, 基于变量梯度法构建的李雅普诺夫函数更适用于求解功角稳定域。

同时设置光伏渗透率由 0%变化至 30%, 储能容量由 0 Ah 变化至 200 Ah, 对系统功角进行求解, 其变化如图 13 所示, 逆变器出口电压变化如图 14 所示。

由图 13 可知, 在 0%~30%的光伏渗透率下, 储能容量在 0~120 Ah 变化时, 系统功角的较小变化范围为 $[0.0392314, 0.0395538]$  rad; 当在 0%~30%的光伏渗透率下, 储能容量在 120~200 Ah 变化时, 系统功角的较大变化范围为 $[0.738671, 0.740563]$  rad, 由此可见系统功角受到储能容量的影响较大。同时, 由图 14 可知, 在 0~200 Ah 的储能容量下, 光伏渗透率在 0%~10%变化时, 系统逆变器出口电压的较

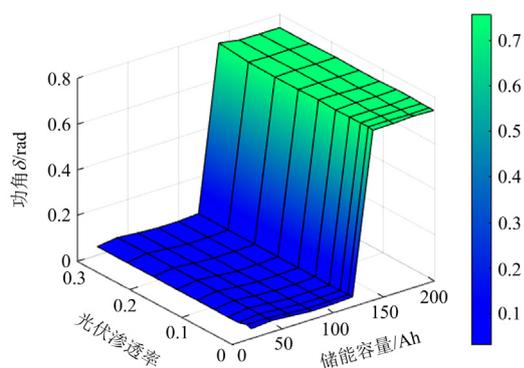
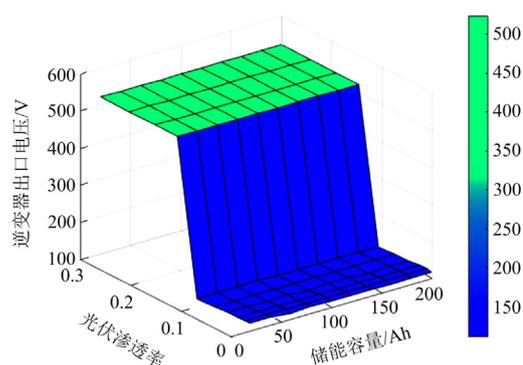


图 13 不同渗透率与储能容量下系统功角变化

Fig. 13 Changes of system power angle under different permeability and energy storage capacity

图 14 不同渗透率与储能容量下系统逆变器出口电压变化  
Fig. 14 Voltage change of system inverter outlet under different permeability and energy storage capacity

小变化范围为 $[110.4165, 121.9570]$  V; 当在 0~200 Ah 的储能容量下, 光伏渗透率在 10%~30%变化时, 系统逆变器出口电压的较小变化范围为 $[520.5686, 523.5078]$  V, 由此可见系统逆变器出口电压受到光伏渗透率的影响较大。

## 4 结论

本文基于变量梯度法构建了融合光伏和储能的并网逆变器李雅普诺夫函数模型, 分析了储能系统的接入对新能源系统的影响, 得到以下结论。

1) 当并网逆变器采用下垂控制时, 相较于克拉索夫斯基法和线性矩阵不等式法构造的函数, 通过变量梯度法构造的李雅普诺夫函数结构更为简单, 易于分析。在稳定条件下, 与变量梯度法相比, 克拉索夫斯基法和线性矩阵不等式法无法有效求解系统的功角稳定域。

2) 光伏发电系统的出力较低时, 储能系统的接入能够有效提升新能源系统的有功出力, 提升新能源系统接入电网时的电能支撑能力。

3) 当新能源发电系统的有功功率波动较大时, 通过接入储能系统能够有效降低新能源系统的有功功率波动, 将新能源系统有功功率的超调量  $\delta$  由 4.737%降低至 4.596%, 新能源系统能够更快地向电网传输稳定的电能。

4) 储能系统的接入能够有效增大系统的功角稳定域, 光伏系统独立运行时系统的功角稳定域为 $[-31.4, -18.7]$  rad、 $[-6.4, -5.49]$  rad、 $[10.78, 17.19]$  rad, 光储融合运行时系统的功角稳定域为 $[-31.4, -18.7]$  rad、 $[-6.4, -5.62]$  rad、 $[10.59, 17.19]$  rad, 增大了系统的功角稳定范围。

## 附录 A

快速和慢速变化的一阶和二阶方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_{1(0)} = x_{2(0)} \\ \dot{x}_{2(0)} = 11658.02 - 2230.5x_{2(0)} - 17475x_{3(0)} \sin x_{1(0)} - \\ \quad 202.76 \cos x_{1(0)} - 0.0259x_{3(0)} \cos x_{1(0)} - \\ \quad 137000000 \sin x_{1(0)} \\ \dot{x}_{3(0)} = 158000000 - 2230.5x_{3(0)} - 17475x_{3(0)} \cos x_{1(0)} + \\ \quad 0.0259x_{3(0)} \sin x_{1(0)} - 137000000 \cos x_{1(0)} + \\ \quad 202.76 \sin x_{1(0)} \end{cases} \quad (\text{A1})$$

式中,  $x_{1(0)}$ 、 $x_{2(0)}$ 、 $x_{3(0)}$  为系统的慢速变化部分。

$$\begin{cases} \dot{x}_{1(1)} = x_{2(1)} \\ \dot{x}_{2(1)} = 11658.02 - 2230.5x_{2(1)} - 17475x_{3(1)} \sin x_{1(1)} - \\ \quad 0.0259x_{3(1)} \cos x_{1(1)} - 137000000 \sin x_{1(1)} - \\ \quad 202.76 \cos x_{1(1)} \\ \dot{x}_{3(1)} = 158000000 - 2230.5x_{3(1)} - 17475x_{3(1)} \cos x_{1(1)} + \\ \quad 0.0259x_{3(1)} \sin x_{1(1)} - 137000000 \cos x_{1(1)} + \\ \quad 202.76 \sin x_{1(1)} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

式中,  $x_{1(1)}$ 、 $x_{2(1)}$ 、 $x_{3(1)}$  为系统的快速变化部分。

## 附录 B

将系统描述为式(B1)所示。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (\text{B1})$$

式中:  $\mathbf{x}$  为  $n$  维状态变量, 对所有  $t \in [0, \infty)$  有  $f(0) = 0$ , 即状态空间原点  $x = 0$  为系统孤立平衡状态。  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})]^T$ , 进而可以确定出系统的雅可比矩阵。

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \frac{\delta \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\delta \mathbf{x}^T} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1(\mathbf{x})}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_1(\mathbf{x})}{\delta x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta f_n(\mathbf{x})}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_n(\mathbf{x})}{\delta x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{B2})$$

在构建系统的李雅普诺夫函数时需要验证  $\mathbf{F}^T(\mathbf{x}) + \mathbf{F}(\mathbf{x}) < 0$  为负定, 即有  $dV(\mathbf{x})/dt < 0$  为负定。

$$\begin{aligned} \frac{dV(\mathbf{x})}{dt} &= \frac{d\mathbf{f}^T(\mathbf{x})}{dt} \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{f}^T(\mathbf{x}) \frac{d\mathbf{f}(\mathbf{x})}{dt} = \\ &= \left[ \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^T} \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right] \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{f}^T(\mathbf{x}) \left[ \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right] = \\ &= \mathbf{f}^T(\mathbf{x}) [\mathbf{F}^T(\mathbf{x}) + \mathbf{F}(\mathbf{x})] \mathbf{f}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (\text{B3})$$

当式(B3)为负定时, 系统的李雅普诺夫函数可定义为

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x}) \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (\text{B4})$$

根据式(15), 构建系统的雅可比矩阵为

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -194.22 \sin z_1 - 241907291 \cos z_1 & -2230.5 \end{bmatrix} \quad (\text{B5})$$

将系统的雅可比矩阵与其转置矩阵相加为

$$\mathbf{F}^T(\mathbf{x}) + \mathbf{F}(\mathbf{x}) \quad (\text{B6})$$

通过计算表明  $\mathbf{F}^T(\mathbf{x}) + \mathbf{F}(\mathbf{x}) < 0$  为负定。

则根据式(B4)可将系统的李雅普诺夫函数构建为

$$V(z) = z_2^2 + (2230.5z_1 + 194.229 \cos z_1 + 241907291 \sin z_1 - 11158.02)^2 \quad (\text{B7})$$

## 附录 C

采用线性矩阵不等式方法(LMI)构建李雅普诺夫函数, 系统状态方程表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (\text{C1})$$

式中:  $\mathbf{x}$  为状态向量;  $\mathbf{A}$  为系统矩阵。选择一个对称正定矩阵  $\mathbf{P}$  作为李雅普诺夫矩阵, 并根据李雅普诺夫函数定义构造线性不等式矩阵如式(C2)所示。

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} < 0 \quad (\text{C2})$$

式中,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -241907291 & -2230.5 \end{bmatrix}$ , 由此可以求解出矩阵  $\mathbf{P}$ , 并构建系统李雅普诺夫函数如式(C3)所示。

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \quad (\text{C3})$$

将式(15)线性化后可得

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{Z}_1 \\ \delta \dot{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -241907291 & -2230.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Z_1 \\ \delta Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (\text{C4})$$

式中,  $u = 11158.02$ 。

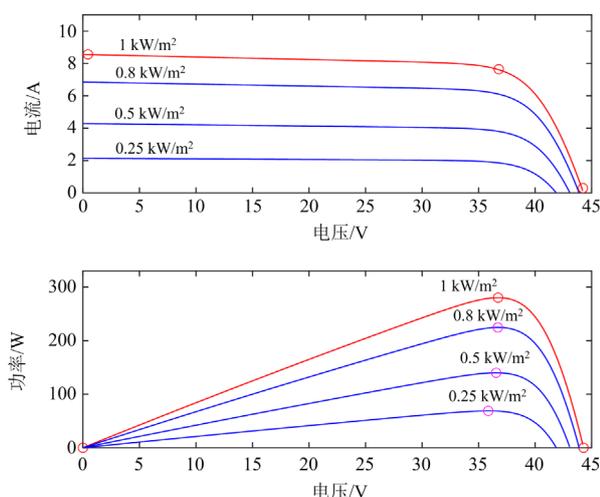
可根据式(C2)求解出矩阵  $\mathbf{P}$  为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C5})$$

根据式(C3)可求解得系统李雅普诺夫函数为

$$V(z) = \delta^2 (z_1 + z_2 + 2z_1 z_2) \quad (\text{C6})$$

## 附录 D

图 D1 光伏阵列  $I-V$ 、 $P-V$  曲线Fig. D1  $I-V$  and  $P-V$  curves of photovoltaic arrays

## 参考文献

- [1] 沈赋, 李施伟, 陈雪鸥, 等. 新型电力系统综合负荷广义离散等值模型[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 18-24.  
SHEN Fu, LI Shiwei, CHEN Xueou, et al. Generalized discrete equivalent model of composite load for new-type power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 18-24.
- [2] 皇金锋, 杨振宇, 李帅杰. 基于混合储能的光储直流微网改进型滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 151-159.  
HUANG Jinfeng, YANG Zhenyu, LI Shuaijie. Improved sliding mode self-disturbance resistance control of an optical storage DC micro-grid based on hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 151-159.
- [3] GUO Z, WEI W, CHEN L, et al. Impact of energy storage on renewable energy utilization: a geometric description[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 874-885.
- [4] ANGIZEH F, BAE J, CHEN J, et al. Impact assessment framework for grid integration of energy storage systems and renewable energy sources toward clean energy transition[J]. IEEE Access, 2023, 11: 134995-135005.
- [5] 陈睿彬, 陆玲霞, 包哲静, 等. 电池储能系统参与用户侧削峰填谷的鲁棒优化调度策略[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 66-76.  
CHEN Ruibin, LU Lingxia, BAO Zhejing, et al. Robust optimal dispatch strategy for battery energy storage system participating in user-side peak load shifting[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 66-76.
- [6] 索克兰, 程林, 许鹤麟, 等. 提升电池储能系统经济性研究方法综述[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 163-178.  
SUO Kelan, CHENG Lin, XU Helin, et al. A review of research methods for improving the economy of battery energy storage system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 163-178.
- [7] 李宇骏, 陆艺源, 牟同鹏, 等. 新能源发电经换流器并网系统的稳定性分析与控制综述[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 79-94.  
LI Yujun, LU Yiyuan, MU Tongpeng, et al. A review of stability analysis and control of renewable energy integration systems via converters[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 79-94.
- [8] 国家发展改革委. 可再生能源发展“十三五”规划[R]. 2016.
- [9] 李建林, 李雅欣, 周喜超, 等. 储能商业化应用政策解析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 168-178.  
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao, et al. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 168-178.
- [10] 李建林, 梁策, 张则栋, 等. 新型电力系统下储能政策及商业模式分析[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 104-116.  
LI Jianlin, LIANG Ce, ZHANG Zedong, et al. Analysis of energy storage policies and business models in new power system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 104-116.
- [11] 李相俊, 马会萌, 姜倩. 新能源侧储能配置技术研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 13-25.  
LI Xiangjun, MA Huimeng, JIANG Qian. Review of energy storage configuration technology on renewable energy side[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 13-25.
- [12] 马速良, 武亦文, 李建林, 等. 面向多服务目标需求的集中式电池储能优化配置方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 75-86.  
MA Suliang, WU Yiwen, LI Jianlin, et al. Research on optimal configuration of centralized battery energy storage for multiple service objectives[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 75-86.
- [13] 陆秋瑜, 胡伟, 郑乐, 等. 多时间尺度的电池储能系统建模及分析应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 86-93.  
LU Qiuyu, HU Wei, ZHENG Le, et al. Modeling and analysis of battery energy storage systems in multi-time scales application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 86-93.
- [14] 蔡国伟, 孔令国, 潘超, 等. 风光储联合发电系统的建模

- 及并网控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 196-204.  
CAI Guowei, KONG Lingguo, PAN Chao, et al. System modeling of wind-PV-ES hybrid power system and its control strategy for grid-connected[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 196-204.
- [15] 任勇, 曾鸣. 独立光储直流微网的稳定运行控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 75-86.  
REN Yong, ZENG Ming. Stable operation control strategy for an independent DC microgrid with photovoltaics and a storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 75-86.
- [16] 刘海涛, 马丙泰, 郝思鹏, 等. 考虑功率限值管理的光储系统建模及控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(11): 100-108.  
LIU Haitao, MA Bingtai, HAO Sipeng, et al. Modeling and control strategy for photovoltaic energy storage system considering power limit management[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(11): 100-108.
- [17] 徐玉琴, 方楠. 基于稳压控制的独立光储微电网控制策略研究及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 67-74.  
XU Yuqin, FANG Nan. Control strategy research and simulation analysis of an independent optical storage microgrid based on voltage stabilizing control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 67-74.
- [18] 叶小晖, 刘涛, 吴国吻, 等. 电池储能系统的多时间尺度仿真建模研究及大规模并网特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2635-2644.  
YE Xiaohui, LIU Tao, WU Guoyang, et al. Multi-time scale simulation modeling and characteristic analysis of large-scale grid-connected battery energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2635-2644.
- [19] 熊家祚, 张能, 翟党国, 等. 大规模电力电子设备接入的电力系统混合仿真接口技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 152-161.  
XIONG Jiazuo, ZHANG Neng, ZHAI Dangguo, et al. Review of hybrid simulation interface technology for power system of large-scale power electronic equipment access[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 152-161.
- [20] 陈磊, 刘永奇, 戴远航, 等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 15-21.  
CHEN Lei, LIU Yongqi, DAI Yuanhang, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 15-21.
- [21] 朱蜀, 刘开培, 秦亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3948-3962, 4273.  
ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3948-3962, 4273.
- [22] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.  
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.
- [23] PERDANA Y S, MUYEEN S M, AL-DURRA A, et al. Direct connection of supercapacitor-battery hybrid storage system to the grid-tied photovoltaic system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1370-1379.
- [24] ZHANG X, XIA D, FU Z, et al. An improved feedforward control method considering PLL dynamics to improve weak grid stability of grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5143-5151.
- [25] 刘倪, 张昌华, 段雪, 等. 并网逆变器小信号建模方法对比及其适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 134-141.  
LIU Ni, ZHANG Changhua, DUAN Xue, et al. Comparison and applicability analysis of small-signal modeling methods for grid-connected inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 134-141.
- [26] JAFARPOUR S, PURBA V, JOHNSON B B, et al. Singular perturbation and small-signal stability for inverter networks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2022, 9(2): 979-992.
- [27] 李锡林, 唐英杰, 田震, 等. 基于改进等面积法则的并网逆变器同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 208-215.  
LI Xilin, TANG Yingjie, TIAN Zhen, et al. Synchronization stability analysis of grid-connected inverter based on improved equal area criterion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 208-215.
- [28] 杨欢红, 焦伟, 黄文焘, 等. 考虑暂态功角稳定和故障限流的并网逆变器下垂暂态控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 59-70.  
YANG Huanhong, JIAO Wei, HUANG Wentao, et al. Droop transient control strategy considering transient power angle stability and fault current limitation of a

- grid-connected inverter[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(23): 59-70.
- [29] 王彤, 李永达, 高洁, 等. 基于受扰轨迹空间解耦的直驱风电机组非线性动态降阶方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(21): 8206-8217.  
WANG Tong, LI Yongda, GAO Jie, et al. Nonlinear dynamic order reduction method of direct driven wind turbine based on disturbed trajectory space decoupling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(21): 8206-8217.
- [30] 马凡, 付立军, 叶志浩, 等. 基于降阶模型的非线性系统稳定性快速评估[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 126-134.  
MA Fan, FU Lijun, YE Zhihao, et al. Fast assessment of nonlinear system stability based on reduced model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 126-134.
- [31] 宋国杰, 李国进, 杨浩, 等. 基于李雅普诺夫函数的微电网下并网逆变器的自适应控制[J]. *高电压技术*, 2020, 46(12): 4454-4463.  
SONG Guojie, LI Guojin, YANG Hao, et al. Adaptive control of grid-connected inverter in microgrid based on Lyapunov function[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(12): 4455-4463.
- [32] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(01): 72-84, 344.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [33] 邹文斌, 韩松, 荣娜, 等. 基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 166-173.  
ZOU Wenbin, HAN Song, RONG Na, et al. Voltage control strategy for a PV inverter based on distributed consensus collaboration[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 166-173.
- [34] 温春雪, 戴惟, 李建林, 等. 光储一体化并联系统优化控制设计分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(5): 150-159.  
WEN Chunxue, DAI Wei, LI Jianlin, et al. Design and analysis for optimal control of integrated with photovoltaic and energy storage parallel system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(5): 150-159.
- [35] 高志刚, 冬雷, 廖晓钟. 一种带储能功能的新型光伏并网逆变器研究[J]. *电网技术*, 2012, 36(11): 36-40.  
GAO Zhigang, DONG Lei, LIAO Xiaozhong. A novel grid-integrating inverter with energy storage capability for PV generation system[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(11): 36-40.
- [36] 戴炜, 苟家波, 李胜, 等. 基于变量梯度法的下垂控制逆变器暂态稳定性分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2022, 55(9): 967-972.  
DAI Wei, GOU Jiabo, LI Sheng, et al. Transient stability analysis of droop control inverters based on variable gradient method[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55(9): 967-972.
- [37] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 8-15.  
WU Meng, HE Zhiyuan, YAN Fayou, et al. Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 8-15.
- [38] 吴中东, 丁石川, 郭小璇, 等. 一种并联逆变器自适应下垂控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(7): 84-94.  
WU Zhongdong, DING Shichuan, GUO Xiaoxuan, et al. An adaptive droop control method for parallel inverters[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(7): 84-94.
- [39] 谈赢杰, 黄莹, 袁智勇, 等. 基于奇异摄动理论的微电网降阶建模方法与对比研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1914-1921.  
TAN Yingjie, HUANG Ying, YUAN Zhiyong, et al. Modeling method and comparison of order reduction for micro-grid based on singular perturbation theory[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1914-1921.
- [40] MALLIK R, MAJMUNOVIĆ B, DUTTA S, et al. Control design of series-connected PV-powered grid-forming converters via singular perturbation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(4): 4306-4322.

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-04-10

作者简介:

沈 赋(1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电力系统建模; E-mail: shenfu@kust.edu.cn

李施伟(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统建模; E-mail: li\_shiwei1998@163.com

王 健(1994—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为综合能源系统建模及可靠性评估。E-mail: jianwangzx@163.com

(编辑 魏小丽)