

# 基于模糊自抗扰的光储预同步 虚拟同步发电机并网策略

李涛<sup>1,2</sup>, 张春<sup>1,2\*</sup>, 胡添诚<sup>1,2</sup>

- (1. 安徽工程大学电气工程学院, 安徽省 芜湖市 241000;  
2. 高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室, 安徽省 芜湖市 241000)

## Pre-Synchronization Virtual Synchronous Generator Grid-Connection Strategy Based on Fuzzy Active Disturbance Rejection for Photovoltaic Storage

LI Tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Chun<sup>1,2\*</sup>, HU Tiancheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui Province, China; 2. Key Laboratory of Advanced Sensing and Intelligent Control for High-End Equipment, Ministry of Education, Wuhu 241000, Anhui Province, China)

**摘要:**【目的】虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)因其能够调节逆变器并网中的阻尼和惯性而得到广泛应用。但在实际工况下,线路普遍存在阻抗以及离/并网预同步过程中容易出现电压电流畸变。为此,对VSG的控制结构和预同步方法进行了优化。【方法】采用光伏发电系统和混合储能代替传统的直流源用于模拟实际情况,并在传统VSG模型中增加虚拟有功和虚拟电流来补偿并网过程中存在的相位差和幅值差,以实现频率和电压的调节。针对传统线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)系统中的PD控制参数选定问题,采用模糊控制在线自适应整定PD控制参数,并将LADRC引入有功环进行二次调频,以增加系统的鲁棒性。【结果】通过MATLAB/Simulink的仿真验证了该方法设计的可行性,表明预同步控制系统运行效果优越。【结论】模糊LADRC可以快速实现平滑并网,抑制网侧电流冲击和降低频率振荡,从而提高并网逆变器-电网交互系统的稳定性。

**关键词:** 虚拟同步发电机(VSG); 微电网; 分布式能源; 预同步; 阻抗; 虚拟电流; 模糊线性自抗扰控制; 光储系统

**ABSTRACT:** [Objectives] Virtual synchronous generator (VSG) technology is extensively utilized for its capability to regulate damping and inertia during inverter grid

connection. However, line impedance is commonly present, and voltage and current distortions are prone to occur during the pre-synchronization process of disconnection and grid connection. Therefore, the control structure and pre-synchronization method of VSG are optimized. [Methods] A photovoltaic power generation system and hybrid energy storage are used to replace a traditional DC source, simulating actual conditions. Virtual active power and virtual current are incorporated into the conventional VSG model to compensate for phase and amplitude differences during grid connection, thereby achieving frequency and voltage regulation. To address the issue of selecting PD control parameters in a traditional linear active disturbance rejection control (LADRC) system, fuzzy control is employed to adaptively adjust these PD parameters online. Furthermore, LADRC is introduced into the active power loop for secondary frequency regulation, which enhances system robustness. [Results] The feasibility of the proposed method is verified through MATLAB/Simulink simulation, which demonstrates the excellent performance of the pre-synchronization control system. [Conclusions] The fuzzy LADRC enables rapid and smooth grid connection, suppresses grid-side current surges, and reduces frequency oscillations, thereby improving the stability of the grid-connected inverter-grid interaction system.

**KEY WORDS:** virtual synchronous generator (VSG); microgrid; distributed energy; pre-synchronization; impedance; virtual current; fuzzy linear active disturbance rejection control; photovoltaic storage system

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A20146); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2020-070)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U21A20146); Anhui University Collaborative Innovation Project (GXXT-2020-070).

## 0 引言

随着可再生能源技术的快速发展，分布式能源在电力系统中的接入数量剧增，但多数可再生能源具有间歇性和不可预测性等特点，会给电力系统的稳定性和可靠性带来挑战<sup>[1-5]</sup>，且大功率的输出容易导致逆变器退出并网运行，对电网造成二次伤害<sup>[6-7]</sup>。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)逆变器技术可以模拟同步发电机的电压和频率响应，具有更好的电网支持能力和惯性特性，提高了分布式能源系统的稳定性<sup>[8-11]</sup>。

尽管VSG技术的相关研究进展迅速，但在并网过程中容易出现功率波动和电流冲击<sup>[12-13]</sup>，此外，电网存在线路阻抗，给微电网中孤岛和并网2种运行模式的平滑切换带来很大的挑战<sup>[14-15]</sup>。传统的预同步控制方法通常使用锁相环(phase-locked loop, PLL)与电网进行同步，然而引入过多的PLL会对预同步控制的精度和速度产生一定影响<sup>[16-17]</sup>。为了解决这些问题，一些学者提出了新的方法。文献[18]采用虚拟功率模拟二次调频和调压的方式来解决平滑切换和系统阻抗问题，输出值经惯性环节调节，以补偿有功和无功的损失。文献[19-20]利用VSG自身产生的相位，对电网电压的相位和幅值进行追踪，简化了预同步并网的过程。文献[21-22]提出了动态虚拟电流前馈的预同步技术，通过动态虚拟电流补偿功率耦合时产生的功率冲击及功率稳态偏差。文献[23]利用采集VSG输出电压和电网侧电压，随后经控制单元计算出两侧相位差信息，然后将得到的相位差作为预同步中频率相位同步单元的输入。通过调节对角频率，修改相位差，以减少对PLL的依赖。文献[24]首先使用电网电压的幅值和频率作为VSG输出电压的参考值；然后根据本地负载功率调整其输出功率参考值，以确保VSG输出电压的频率、幅值与电网电压同步；最后，通过相位偏差的反馈控制实现相位同步。尽管以上方法都对预同步模块进行了改进，但仅解决了预同步时系统的稳定性问题，未从VSG本身结构出发考虑减少预同步所需的时间和加快系统的响应速率。

本文用光储系统代替直流源，以模拟VSG技术实际工作情况。为消除线路阻抗对并网稳定性的影响，先把虚拟功率代入相位差计算公式得出相位补偿，再将励磁电动势和电网电压有效值的差与虚拟阻抗相结合，进而转化为虚拟电流以补偿电压幅值。针对VSG控制工作特性和线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)参数整定困难问题<sup>[24]</sup>，采用模糊控制整定LADRC中比例微分控制参数，并在有功环上加入模糊LADRC控制器，以加快预同步时的频率追踪速率，减小并网冲击电流，从而优化系统并网性能。最后，通过仿真验证模糊LADRC控制策略的可行性。

## 1 光储VSG系统设计

### 1.1 光储VSG并网拓扑结构

光储VSG微网控制系统结构如图1所示。本文的光储系统由光伏发电系统、蓄电池和超级电容组成，三者都采用DC/DC进行能量交换。图1中：MPPT为最大功率点跟踪策略；PCC为公共耦合点，即预同步信号控制并网的开关节点；mod为取模运算；SVPWM为空间矢量脉宽调制； $U_{DC}$ 为直流母线电压； $C_{DC}$ 为直流侧的电压调节电容； $S_1-S_6$ 为开关管； $R$ 为支路电阻； $P_o$ 为VSG输出功率； $Q_{ref}$ 和 $Q$ 分别为逆变器的无功功率参考值和实际输出无功功率； $L_f$ 、 $C_f$ 分别为滤波部分的定子电感、电容； $I_{abc}$ 、 $U_{abc}$ 分别为VSG三相输出电流、电压； $\theta$ 为VSG参考电压相角； $U_{ga}$ 、 $U_{gb}$ 、 $U_{gc}$ 分别为电网侧的a、b、c相电压； $\omega$ 为VSG输出的角频率； $\omega_n$ 为额定角频率； $D$ 为虚拟阻尼系数； $J$ 为虚拟惯量； $s$ 为拉普拉斯算子； $P_m$ 为机械功率； $P_{ref}$ 为有功功率参考值； $k_\omega$ 为功频调节系数； $E$ 和 $E_0$ 分别为VSG机端实际输出电压和计算出的电压参考值； $D_q$ 为惯性系数； $U$ 为VSG输出电压的有效值； $U_{ref}$ 为额定电压； $k_U$ 为无功-电压调节系数。

VSG控制策略中转子运动方程和原动机调节方程共同构成有功-频率(以下简称“功频”)下垂调节器，功频调节方程为：

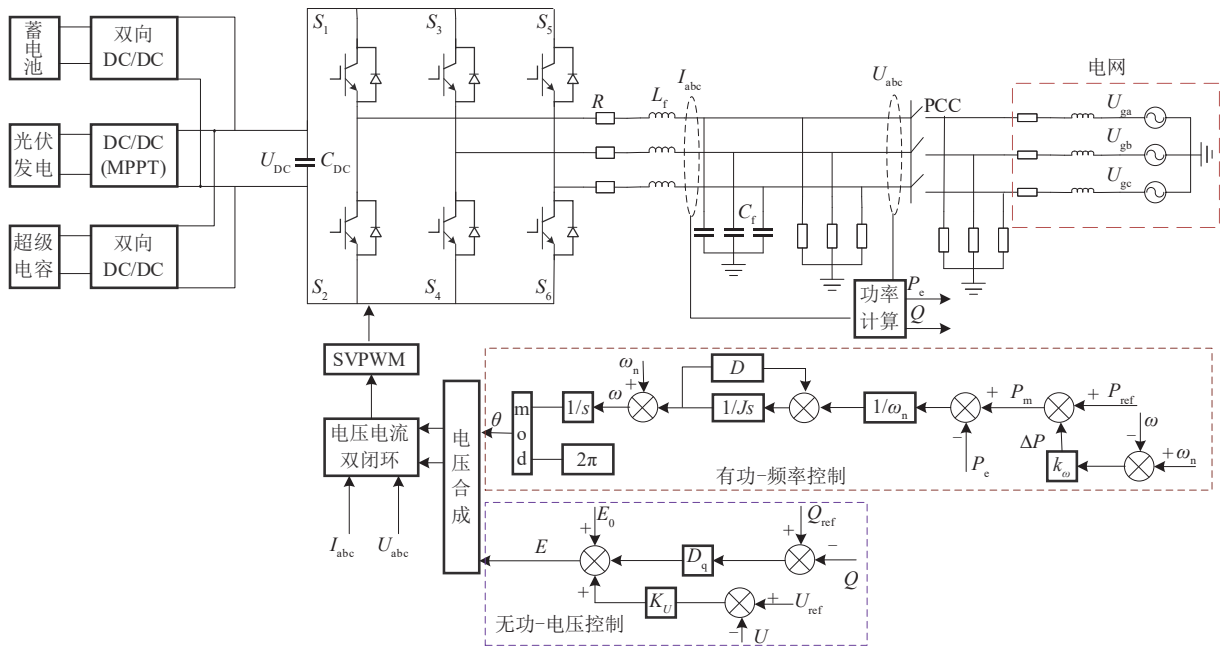


图 1 光储 VSG 微网控制系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of photovoltaic storage VSG microgrid control system

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_c}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n) \\ P_m = P_{ref} + k_\omega (\omega - \omega_n) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_n \end{cases} \quad (1)$$

式中  $t$  为时间。通过功频调节方程可得到图 1 中功频控制部分。

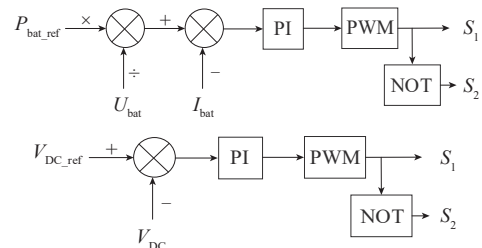
通过功频控制可使光储系统并网时进行有功的合理分配，转子运动方程为控制系统提供了惯性和阻尼。相较于原同步发电机复杂的励磁系统，VSG 的电压幅值调节只依据无功-电压下垂控制特性设计，使系统具备调压功能，其数学模型为

$$E = E_0 + k_U (U_{ref} - U) + D_q (Q_{ref} - Q) \quad (2)$$

### 1.2 光储系统设计

由图 1 可知，本系统采用了直流微电网结构，光伏电池通过 MPPT 控制方法使光伏发电系统一直处于最大功率点，经 Boost 变换器并入母线上。蓄电池和超级电容通过双向 Buck/Boost 变换器与直流母线相连，完成能量的相互传输和储存。由于光伏发电系统在部分环境中容易产生功率波动，对母线电压有很强的干扰性，所以只能通过混合储能来平衡功率波动和稳定母线电压<sup>[25-28]</sup>。结合蓄电池储能效果好、寿命短<sup>[29-30]</sup>和超级电容响应速度快、寿命长<sup>[31-32]</sup>的特点，本文对蓄电池采用恒功率

控制策略，对超级电容采用直流电压恒定控制策略。混合储能控制策略如图 2 所示，其中： $P_{bat\_ref}$  为电池的额定功率； $U_{bat}$  和  $I_{bat}$  分别为电池的输出电压和电流； $V_{DC\_ref}$  为直流母线电压设定值； $V_{DC}$  为超级电容输出的电压。



PWM 表示脉冲宽度调制；NOT 表示取反。

图 2 混合储能控制策略

Fig. 2 Hybrid energy storage control strategy

混合储能控制策略可以加强直流母线电压的稳定性，而稳定的直流电压能够保证直流微电网系统在孤岛、并网运行下稳定工作。

## 2 光储预同步控制策略

### 2.1 基于虚拟功率和电流的预同步控制

图 3 为预同步控制策略框图，其中： $U_{gabc}$  为网侧三相电压； $\Delta\theta$  为电网侧相角  $\theta_g$  和 VSG 侧相角  $\theta$  的差值； $U_{gabc\_d}$  为网侧电压  $d$  轴的值； $U_g$  为网

侧电压的有效值； $i_s$ 为虚拟电流； $Z_v$ 为虚拟阻抗。

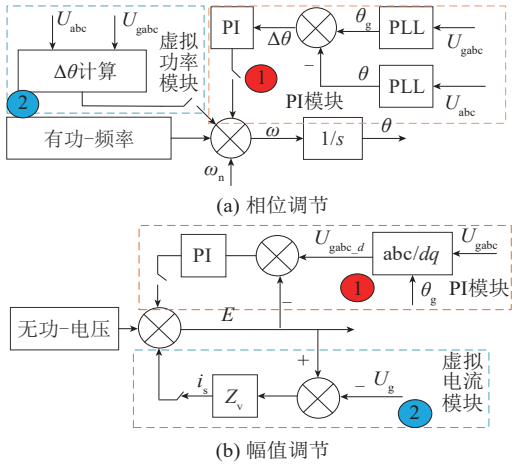


图3 预同步控制策略框图

Fig. 3 Block diagram of pre-synchronization control strategy

传统的预同步是在VSG结构上加入相位PI调节模块和幅值PI调节模块，结构如图3中①部分所示。一般来说，系统相关线路普遍存在阻抗，并网时会出现明显的功率耦合问题，从而影响系统的稳态性能。为减小并网时的不平衡阻抗，假设在VSG机端与电网间存在虚拟阻抗，使线路阻抗近似呈现感性。根据文献[33]提出的VSG有功功率理论，可推出虚拟阻抗计算公式为：

$$\begin{cases} P_v = \frac{UU_g \cos(\varphi_v - \theta)}{Z_v} - \frac{U_g^2}{Z_v} \cos \varphi_v \\ Z_v = \sqrt{(\omega L_v)^2 + R_v^2} \\ \varphi_v = \arctan\left(\frac{\omega L_v}{R_v}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_v$ 为虚拟功率； $L_v$ 和 $R_v$ 分别为并网虚拟电阻和虚拟电感； $\varphi_v$ 为虚拟阻抗角。

计算出虚拟功率后，可根据文献[22]提出的新型相位补偿角计算式得到 $\Delta\theta$ 。其表达式为

$$\Delta\theta = \arccos\left(\frac{U^2 - \frac{P_v Z_v}{3}}{UU_g}\right) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知，当 $U = U_g$ 且 $\varphi_v = \theta = 0^\circ$ 时，虚拟阻抗 $Z_v$ 和 $\Delta\theta$ 均为0，此时相位达到并网条件。该方法对于阻抗的考虑更加符合实际，对实际系统的问题解决十分有意义。

虚拟电流模块首先将VSG生成的感应电动势

和电网电压作差；然后将其与虚拟阻抗结合，得出虚拟电流 $i_s$ ；最后将 $i_s$ 输入到VSG控制器上，从而调节VSG输出电压，确保逆变器输出电压与电网电压同步。该方法可以更快地调整虚拟同步机的输出，快速响应电网变化，提高系统的动态响应速度。预同步的整体结构如图3中②部分所示。

### 2.2 二阶线性自抗扰控制器

二阶LADRC控制器由线性扩展状态观测器(linear extended state observer, LESO)<sup>[34-36]</sup>和线性状态误差反馈(linear state error feedback, LSEF)组成，无需处理过渡过程的PD环节，且LESO可以把总扰动看作是被观测系统的可变状态之一。二阶LADRC结构如图4所示。其中： $r$ 为额定角频率输入； $u_0$ 为LSEF计算出的虚拟控制量； $b_0$ 为系统增益； $u$ 为系统控制量； $y$ 为系统输出，即 $\omega$ ； $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 分别为系统输出 $x_1$ 、系统输出的微分项 $x_2$ 和总扰动 $x_3$ 的估计值； $G(s)$ 为被控对象。

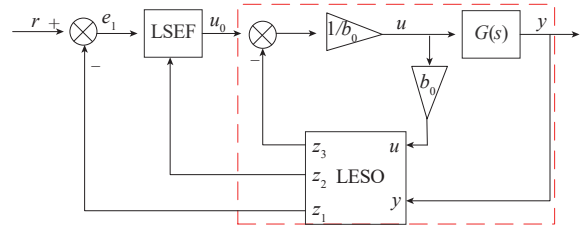


图4 二阶LADRC结构框图

Fig. 4 Block diagram of second-order LADRC

设 $f$ 表示系统的总扰动函数，则被控对象的二阶线性系统模型可表示为

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + b_0 u \quad (5)$$

式中： $\dot{y}$ 为输出 $y$ 的一阶微分； $w$ 为系统扰动。

令 $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = f, h = \dot{f}$ ，则扩展状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = h \\ y = x_1 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ h \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于 $\dot{f}$ 是系统校正项估计出来的，在设计状态观测器时可以把其消去。假设存在一个矩阵 $L = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$ ，使 $z_1 \rightarrow x_1, z_2 \rightarrow x_2, z_3 \rightarrow x_3$ ，其中 $\rightarrow$ 表示无线接近，则LESO模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \beta_1 \\ b_0 & \beta_2 \\ 0 & \beta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\hat{y} = z$$

式中： $\hat{y}$ 为输出向量； $z$ 为观测器的状态向量。

加入估计变量 $z_3$ 后可得

$$u = (u_0 - z_3) / b_0 \quad (8)$$

系统稳态时， $z_3 \approx f$ ，则有  $\dot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + b_0(u_0 - z_3) / b_0 = u_0$ ，此时系统可简化为双积分器串联型系统。

根据状态估计，LSEF 的构成原理可表示为

$$u_0 = k_p(r - z_1) - k_d z_2 \quad (9)$$

式中 $k_p$ 和 $k_d$ 均为系统的增益，都是未知参数。

由文献[8]可知，LSEF 的参数设计一般为：

$$\begin{cases} k_p = \omega_c^2 \\ k_d = 2\zeta\omega_c \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\omega_c$ 为固有频率； $\zeta$ 为阻尼比。

由式(6)和式(7)可得估计误差：

$$\dot{x} - \dot{z} = (A - L)(x - z) \quad (11)$$

式中： $\dot{x} = [\dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_3]^T$ ； $\dot{z} = [\dot{z}_1 \ \dot{z}_2 \ \dot{z}_3]^T$ ； $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ ； $A$ 为式(6)中矩阵 $x$ 的系数矩阵。

根据现代控制理论可知，系统若稳定，则  $(A - L)$  的特征值 $\lambda$ 小于等于0。则有

$$|\lambda I - (A - L)| = \lambda^3 + \beta_1 \lambda^2 + \beta_2 \lambda + \beta_3 = (\lambda + \omega_0)^3 \quad (12)$$

式中： $\omega_0$ 为LESO的带宽； $I$ 为单位矩阵。

根据控制器的特性，本文提出一种将LADRC与VSG有功-频率相结合的控制算法。把VSG控制策略作为LADRC的控制对象，VSG系统频率作为LADRC的输入反馈，从而提升整个系统的防干扰能力和反应速率。

通常VSG产生的功率都存在一定的谐波分量，其值都需要经一阶滤波器处理才能得到平稳的输出功率 $P_{e\_new}$ ，其计算式如下：

$$P_{e\_new} = P_e \frac{1}{\tau s + 1} \quad (13)$$

式中： $P_e$ 为VSG输出功率； $\tau$ 为一阶滤波器的时间常数。

结合图1有功环的控制框图，将 $P_e$ 用 $P_{e\_new}$ 替代，得出 $\omega$ 与 $\omega_n$ 、 $P_e$ 、 $P_{ref}$ 的闭环传递函数关系：

$$\omega = \frac{1}{J\omega_n s + (D + k_\omega)\omega_n} P_{ref} + \frac{1}{[J\omega_n s + (D + k_\omega)\omega_n](\tau s + 1)} P_e + \omega_n \quad (14)$$

对式(14)第1项进行拉普拉斯逆变换并进行整理，可得：

$$\frac{d^2 \omega}{dt^2} = \frac{[J\omega_n + (D + k_\omega)\omega_n \tau]}{J\omega_n \tau} \frac{d\omega}{dt} + \frac{P_{ref} - P_e}{J\omega_n \tau} - \frac{D + k_\omega}{J\tau} \omega + \frac{D + k_\omega}{J\tau} \omega_n \quad (15)$$

结合式(5)可知， $b_0 = \frac{D + k_\omega}{J\tau}$ ， $u = \omega_n$ 。

综上所述， $\omega_n$ 会影响系统的稳定，而LADRC控制器能同步VSG输出的反馈值 $\omega$ ，对输入到系统的频率值进行实时调节，使系统能有更好的控制效果，减少预同步需要的时间。鉴于此，有功环可采用如图5所示的LADRC控制结构。

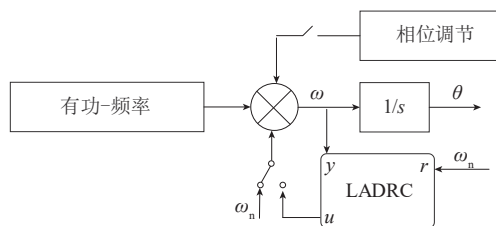


图5 有功环的LADRC控制结构

Fig. 5 LADRC control structure for active power loop

### 2.3 模糊自抗扰控制器

为加强LADRC的控制性能，本文采取模糊算法对LADRC中LSEF的参数进行实时整定。根据上文可知，LSEF主要受 $k_p$ 和 $k_d$ 的参数影响， $k_p$ 越大，越能减少误差，但是会降低快速性； $k_d$ 越大，越增加快速性，但是过大会产生振荡<sup>[33]</sup>，所以PD控制器的参数优化十分重要。本文将角频率偏差 $e$ 和偏差变化率 $n$ 作为模糊控制器的输入变量，而输出经 $\Delta k_p$ 和 $\Delta k_d$ 进行参数修正，以实现在线自适应调整PD控制器的需求，提高控制器控制效果和抗干扰能力。本文先选一组最优的 $k_p^*$ 和 $k_d^*$ 值，在此基础上再调节参数，其表达式为：

$$\begin{cases} k_p = k_p^* + \Delta k_p \\ k_d = k_d^* + \Delta k_d \end{cases} \quad (16)$$

模糊LADRC控制框图如图6所示。模糊控制器中 $e$ 、 $n$ 、 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_d$ 均为模糊变量，其中： $e$ 、 $n$ 为输入量； $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_d$ 为输出修正因子； $k_1$ 、 $k_2$ 为输

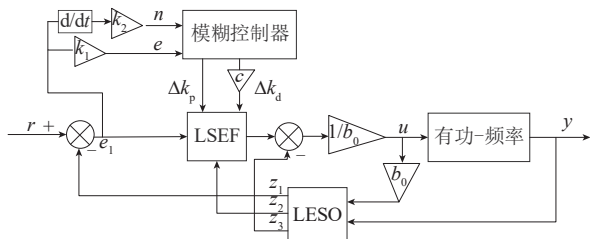


图6 模糊LADRC控制框图

Fig. 6 Block diagram of fuzzy LADRC control

入调节因子； $c$ 为输出调节因子。 $e$ 和 $n$ 的基本论域为 $[-1,1]$ ，若 $e$ 和 $n$ 的变化范围未达到控制器的最优状态，可调节 $k_1$ 、 $k_2$ 的值使控制器高效运行。 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_d$ 的模糊子集论域分别设定为 $[-0.3, 0.3]$ 和 $[-0.05, 0.05]$ 。在模糊论域上设定7个模糊子集，分别为{负大(NB)，负中(NM)，负小(NS)，零(ZO)，正小(PS)，正中(PM)，正大(PB)}。模糊控制器输入变量的隶属度函数为{负大(NB)，正大(PB)}的用平滑的高斯型函数，其余灵敏度高的用三角形函数，输出变量隶属度函数全用三角形隶属度函数。

根据LADRC设计经验和反复实验，模糊规则设计如表1所示。

表1 模糊规则

Tab. 1 Fuzzy rules

$e$	$n$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/PB	PB/PB	PB/PB	PB/NB	PS/NB	ZO/NM	NS/NS
NM	PB/PB	PB/PB	PM/PM	PM/NM	ZO/ZO	NS/PS	NM/PM
NS	PB/PB	PM/PM	PM/PM	PS/NS	NS/PM	NM/PB	NB/PB
ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO
PS	NB/PM	NM/PB	NS/PM	PS/NS	PM/PM	PM/PM	PB/PB
PM	NM/PM	NS/PS	ZO/ZO	PM/NM	PB/PM	PB/PB	PB/PB
PB	NS/NS	ZO/NM	PS/NB	PB/NB	PB/PB	PB/PB	PB/PB

### 3 仿真结果与实验分析

#### 3.1 系统参数调试

为了验证模糊LADRC预同步并网控制策略的可行性，在MATLAB/Simulink仿真平台上搭建了光储VSG预同步的仿真模型。根据文献[37]提出的单输入单输出VSG小信号模型和式(3)，进而得出逆变器输入输出有功功率的传递函数：

$$G(s) = \frac{P(s)}{P_{ref}(s)} = \frac{1}{s^2 + (\frac{D}{J} + \frac{K_\omega \omega}{J\omega_n})s + \frac{1}{J\omega_n} \frac{EU}{Z}} \quad (17)$$

式(17)为典型的二阶传递函数，其中 $Z$ 为系统阻抗。通过式(17)可求出系统特征方程和系统等效开环传递函数。然后根据建立的等效开环传递函数绘制出不同参数变化时的根轨迹图，选择能让系统达到最佳稳定性和动态性的 $J$ 、 $D$ 、 $k_\omega$ 。本文所选的系统仿真参数如表2所示。

表2 系统仿真参数

Tab. 2 System simulation parameters

参数	数值	参数	数值
直流母线参考电压/V	1500	逆变器负荷/kW	40
蓄电池输出功率/kW	30	网侧负荷/kW	40
惯性系数	0.003 1	有功参考值/kW	80
虚拟惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.5	滤波电感/mH	5
虚拟阻尼/(N·m·s/rad)	20	滤波电容/μF	0.2
额定频率/Hz	50	开关频率/kHz	20

#### 3.2 系统抗干扰性

设定光伏(photovoltaic, PV)模块的光照强度在0.2 s时从1000 W/m<sup>2</sup>降到800 W/m<sup>2</sup>，0.8 s时再升到1200 W/m<sup>2</sup>；0.2 s时打开预同步模块开关，1.0 s时下达关闭并网指令。在此背景下，系统功率变化曲线和直流母线电压变化曲线分别如图7、8所示。

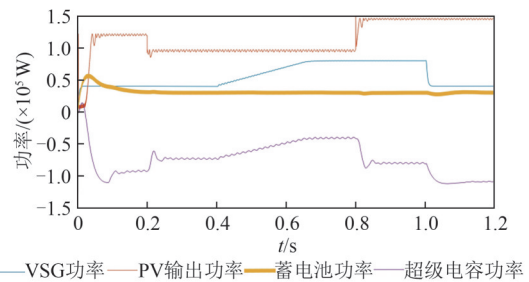


图7 系统功率变化曲线

Fig. 7 System power variation curves

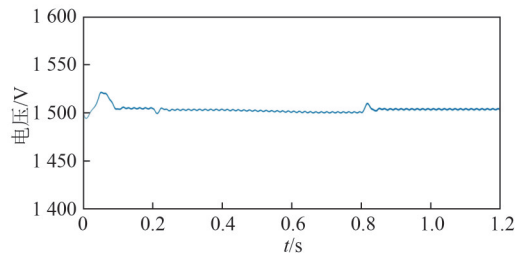


图8 直流母线电压变化曲线

Fig. 8 DC bus voltage variation curve

由图7、8可知，光伏发电系统光照强度发生波动和逆变器输出功率发生变化时，系统能量的变化始终符合光伏输出功率+电池输出功率+超级电容输出功率=VSG输出功率，即  $P_{pv} + P_{bat} + P_{sc} = P_e$ 。在系统光照强度变化时，通过混合储能系统的灵活调节，可以有效地维持电网母线电压在合适的范围内波动。这种调节使得电网在面临外部干扰时产生的波动降至最低，并且在恢复稳定状态时耗时极短。该策略不仅有助于提高电网的稳定性和可靠性，确保电力系统正常运行，同时也展现了系统设计的优越性。

### 3.3 预同步仿真

打开预同步开关后，网侧电压和VSG机端输出电压的幅值、相位及频率误差随着时间不断减小，直至达到系统并网要求。预同步电压波形和电网两端电压差值分别如图9、10所示。

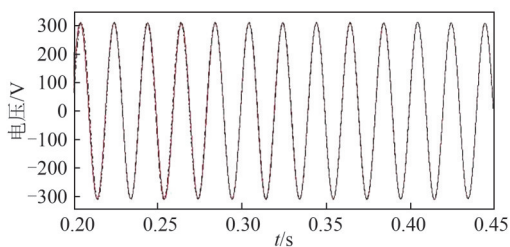


图9 预同步电压波形

Fig. 9 Pre-synchronization voltage waveform

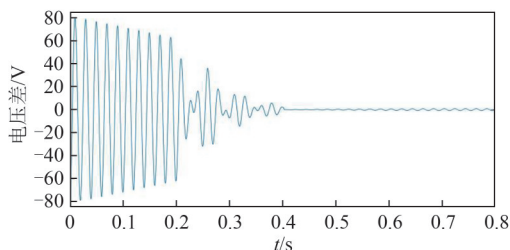


图10 电网两端电压差值

Fig. 10 Voltage difference between two ends of network

由图9、10可知，在0.2s时采用本文改进后的预同步算法，电网两端的电压差快速缩小，VSG输出的电压相位和幅值能快速跟踪上电网电压相位和幅值，在0.403s时系统达到并网条件。此时并网两侧电压幅值和相位基本相同，系统从离网状态成功切换到并网状态，且并网后系统并未再出现波动，展现出较好的稳定性。图11展现了常规VSG、LADRC和模糊LADRC 3种控制的

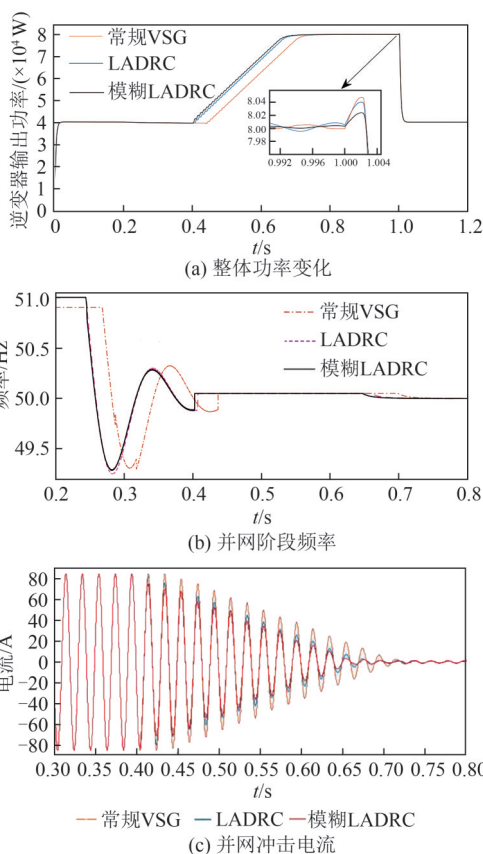


图11 常规VSG、LADRC和模糊LADRC 3种控制的预同步仿真波形对比

Fig. 11 Comparison of pre-synchronization simulation waveforms of conventional VSG, LADRC, and fuzzy LADRC controls

预同步仿真波形对比。

由图11(a)和11(b)可知，本文所提模糊LADRC在输出功率和频率方面能够更快达到系统设定值，显著加速了预同步过程，使得并网过程更加迅速；此外，输出频率波动较小，基本保持了系统的无差调节，增强了系统的稳定性。为了更加明显地比较3种算法的相关输出特性，本文给出了并网时3种算法的仿真结果，如表3所示。

根据表2的系统仿真参数可以得出，VSG在

表3 3种算法仿真结果比较

Tab. 3 Comparison of simulation results for three algorithms

参数	常规VSG	LADRC	模糊LADRC
并网时间/s	0.437	0.407	0.403
频率振荡最大范围/Hz	1.029 0	1.041 5	0.995 8
并网时电流平均峰值/A	56.942 5	44.938 1	39.213 4
离网功率波动峰值/W	80 478.5	80 402.7	80 237.7

并网时为电网侧提供负载功率，网侧电流因此会减小。由表3可知，相较于其他2种算法，本文所提策略在并网时产生的冲击电流最小，并网期间电流的平均峰值分别只有常规VSG预同步的68.4%和加入LADRC预同步的86.7%，这一特性有助于提高系统的稳定性并保护电力元器件。在1.0 s时，系统从并网状态切换到离网状态，本文改进策略的功率振荡最低，对系统的并/离网转换具有良好的适应性。综上可以看出，模糊LADRC控制策略相较于常规VSG和LADRC控制策略能够增强控制器的性能，对有功环的调节有更强的自适应能力，且具有跟踪速度快、调节能力强等特点。

### 3.4 并网运行仿真

设置无功指令值为10 kV·A，当系统并网运行时，系统在1.0 s时电网频率下降到49.95 Hz，1.4 s时电网频率上升到50.05 Hz，1.8 s时电网电压上升5 V，2.2 s时电网电压和频率恢复正常。在此背景下，系统并网运行仿真波形所图12所示。

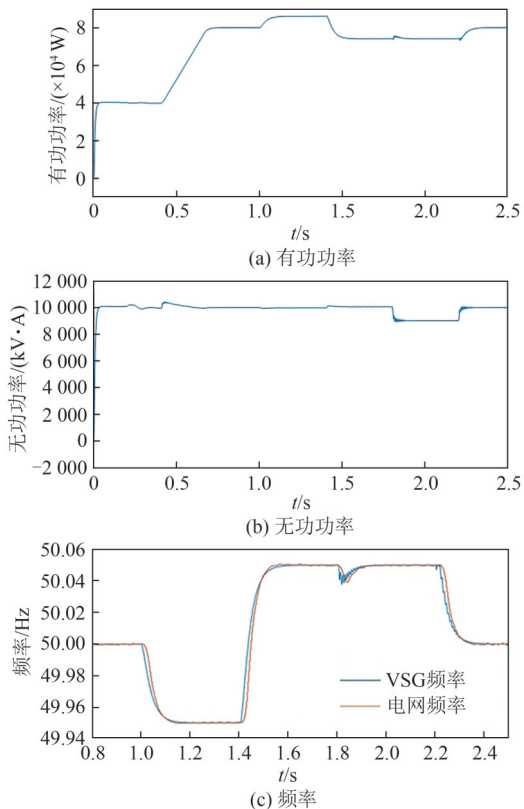


图12 系统并网运行仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of system grid-connected operation

由图12可知，在并网状态下，模糊LADRC控制策略对电网频率和电压的变化有很强的适应性。系统刚开始运行时，有功和无功功率能快速且精准地达到设定值，说明系统有很好的惯性调节能力，在0.2 s时开始预同步，0.25 s时系统完成了有功和无功功率补偿。在1.0 s和1.4 s电网频率发生变化时，无功功率变化幅度较小，VSG的功率控制部分会自动调节逆变器输出的有功功率和频率，使逆变器的频率实时追踪电网频率，从而减小两者误差，达到系统稳定的效果。当电网电压波动时，本文所提策略会调节逆变器输出的无功功率，以提供电网所需的无功补偿，虽然有功和无功会短暂出现波动，但会快速恢复正常，确保电网稳定运行。综上可知，本文所提策略会根据电网的变化来调整其功率，面对一定程度的波动可快速响应以维持系统的稳定。

## 4 结论

在MATLAB/Simulink仿真平台上搭建了光储VSG预同步的仿真模型，通过分析电压、电流、功率和输出频率等一些参数，得出了模糊LADRC对VSG预同步的影响，具体结论如下：

1) 通过对生成角频率的有功环进行小信号模型分析，得出模糊LADRC对VSG产生的频率可实时调节，减小频率的误差，加强系统的响应速度、精度和稳定性，优化了对外输出特性。

2) 与常规VSG和LADRC策略相比，使用模糊LADRC策略时，有功功率几乎没有振荡，并网瞬间的冲击电流只有常规VSG预同步的68.4%和只加入LADRC预同步的86.7%，较小的冲击电流对电力电子元器件有较好的保护，此外，系统从并网切换到离网时，混合储能系统也可以减小电压和电流的冲击，从而实现系统的平稳运行和高效能输出。

3) 模糊LADRC策略实现了并/离网的平滑切换，在面对电网电压和频率突变等状况时，系统可快速做出反应，保证系统并网运行的稳定性和安全性。

综上可知，模糊LADRC策略面对母线端的电压变化和电网的冲击都有很好的自适应能力，且自

身具有很好的并/离网能力。但该策略是在理想电路下的仿真结果,现实中面对电网的复杂性和元器件之间的干扰,实验结果可能存在差异。

## 参考文献

- [1] 李佳蔚, 张冠宇. 大规模分布式新能源接入对省级电网稳定性影响[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 174-180.  
LI J W, ZHANG G Y. Impact of large scale distributed new energy access on provincial power grid stability[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 174-180.
- [2] 周勤勇, 李根兆, 秦晓辉, 等. 能源革命下的电力系统范式转换分析[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 1-11.  
ZHOU Q Y, LI G Z, QIN X H, et al. Analysis of power system paradigm shift under energy revolution[J]. Electric Power, 2024, 57(3): 1-11.
- [3] 刘洪波, 刘坤诚, 盖雪扬, 等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 151-161.  
LIU H B, LIU S C, GAI X Y, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 151-161.
- [4] 冀肖彤, 杨东俊, 方仍存, 等. “双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 37-48.  
JI X T, YANG D J, FANG R C, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 37-48.
- [5] 兰天楷, 孙华东, 王琦, 等. 考虑分布式新能源的有源综合负荷模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(23): 7365-7378.  
LAN T K, SUN H D, WANG Q, et al. Active synthesis load model considering distributed renewable energy source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(23): 7365-7378.
- [6] 柴秀慧, 张纯江, 赵晓君, 等. 并网储能逆变器的混合型VSG控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(11): 74-76.  
CHAI X H, ZHANG C J, ZHAO X J, et al. Research on hybrid VSG control strategy of grid-connected energy storage inverter[J]. Power Electronics, 2023, 57(11): 74-76.
- [7] 纪君奇, 杨黎晖, 马西奎. 基于虚拟同步发电机控制的并网逆变器切换型振荡及其非光滑分岔特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7860-7873.  
JI J Q, YANG L H, MA X K. Switched oscillation and its non-smooth bifurcation characteristics in grid-connected inverter based on virtual synchronous generator control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24): 7860-7873.
- [8] 杨旭红, 杨一矜, 潘宇, 等. 基于RBF-LADRC的虚拟同步发电机控制策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 319-325.  
YANG X H, YANG Y J, PAN Y, et al. RBFNN based linear active disturbance rejection control for virtual synchronous generator control strategy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(3): 319-325.
- [9] 陆永耕, 李建刚, 黄禹铭, 等. 高渗透率分布式电源控制方法[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 103-114.  
LU Y G, LI J G, HUANG Y M, et al. High-permeability distributed power control method[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 103-114.
- [10] 乔鹏, 汪海宁. 电网频率偏差下虚拟同步发电机改进控制研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(6): 89-95.  
QIAO P, WANG H N. Improved control strategy of virtual synchronous generator under grid frequency deviation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(6): 89-95.
- [11] 李亚楼, 赵飞, 樊雪君. 构网型储能及其应用综述[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 386-398.  
LI Y L, ZHAO F, FAN X J. Review of grid-forming energy storage and its applications[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 386-398.
- [12] 卢栩舜, 朱金荣, 王磊. 基于虚拟同步发电机的并网控制策略优化[J]. 电子设计工程, 2023, 31(13): 156-162.  
LU X S, ZHU J R, WANG L. Optimization of grid-connected/islanded control strategy based on virtual synchronous generator[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(13): 156-162.
- [13] 靳金, 王昊睿. 基于虚拟同步机的微网并网无缝切换策略[J]. 电工技术, 2020(9): 165-167.  
JIN J, WANG H R. Seamless switching strategy for grid-connection and off-grid modes of microgrid based on virtual synchronous machine[J]. Electric Engineering, 2020(9): 165-167.
- [14] 徐化博, 赵艳雷, 路茂增, 等. 孤岛微电网电流同步U-I下垂控制方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 190-197.  
XU H B, ZHAO Y L, LU M Z, et al. Current synchronous U-I droop control strategy for islanded microgrids[J]. Electrical Measurement &

- Instrumentation, 2024, 61(5): 190-197.
- [15] 宋昕一, 徐永海, 袁敞, 等. 孤岛直流微电网的多储能SOC稳定均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 49-59.  
SONG X Y, XU Y H, YUAN C, et al. Multi-storage SOC stabilization and equalization control strategy for islanded DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 49-59.
- [16] 王秀云, 刘国钦, 梁晓龙, 等. 基于改进虚拟同步发电机的预同步并网控制研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 92-98.  
WANG X Y, LIU G Q, LIANG X L, et al. Research on pre-synchronous grid-connection control based on improved virtual synchronous generator[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(1): 92-98.
- [17] 杨洋, 丁树业, 徐峥嵘, 等. 基于PLL的VSG并网控制研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2020, 20(1): 20-24.  
YANG Y, DING S Y, XU Z R, et al. Research on grid-connected control of VSG based on PLL[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2020, 20(1): 20-24.
- [18] 吴丹丹, 葛强, 徐金, 等. 基于虚拟功率的VSG并网控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 458-463.  
WU D D, GE Q, XU J, et al. Grid-connected control strategy of virtual synchronous generator based on virtual power[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(4): 458-463.
- [19] 沈志雨, 董哲, 李俊洁. 基于VSG的无PLL光储并网预同步控制策略[J]. 电工技术, 2022(8): 46-49.  
SHEN Z Y, DONG Z, LI J J. Pre-synchronization control strategy for PLL free optical storage VSG grid-connected[J]. Electric Engineering, 2022(8): 46-49.
- [20] 高永军, 孙向东, 周兆吉. 基于虚拟阻抗功率的无锁相环并网预同步控制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(4): 99-102.  
GAO Y J, SUN X D, ZHOU Z J. Grid-connected pre-synchronization control based on virtual impedance power without PLL[J]. Power Electronics, 2021, 55(4): 99-102.
- [21] 李旭枫, 陆立民, 成乐祥, 等. 基于自适应虚拟阻抗改进无功环路的虚拟同步功率解耦控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3752-3760.  
LI X F, LU L M, CHENG L X, et al. Power decoupling control strategy in virtual synchronous generator with improved reactive power loop based on adaptive virtual impedance[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3752-3760.
- [22] 戚军, 李袁超, 童辉, 等. 基于动态虚拟电流前馈的预同步VSG功率二阶解耦策略[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3556-3565.  
QI J, LI Y C, TONG H, et al. Second-order power decoupling control in pre-synchronized VSG based on dynamic virtual current feedforward control[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3556-3565.
- [23] WANG J F, RAMLI N, AZIZ N H A. Pre synchronization control strategy of virtual synchronous generator (VSG) in micro-grid[J]. IEEE Access, 2023, 11: 139004-139016.
- [24] 邢鹏翔, 贾璇悦, 许长清, 等. 基于功率匹配和自适应惯性的VSG预同步控制方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(3): 69-75.  
XING P X, JIA X Y, XU C Q, et al. Pre-synchronization control method for virtual synchronous generator based on power matching and self-adaptive inertia[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(3): 69-75.
- [25] 陶奕嘉, 杨秀, 张美霞, 等. 基于MPC的直流微电网混合储能改进下垂控制策略研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(11): 89-97.  
TAO Y J, YANG X, ZHANG M X, et al. Improved droop control strategy for hybrid energy storage in DC microgrid based on MPC[J]. Smart Power, 2024, 52(11): 89-97.
- [26] 李怡, 李永丽, 李松, 等. 基于VSG的光伏及混合储能系统功率分配与虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 27-34.  
LI Y, LI Y L, LI S, et al. Power distribution and virtual inertia control of photovoltaic and hybrid energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 27-34.
- [27] 周科, 文贤馗, 邓彤天, 等. 光伏发电-超级电容储能并网的直流母线电压稳定控制[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(2): 47-55.  
ZHOU K, WEN X K, DENG T T, et al. A study on the DC-bus voltage stability control of photovoltaic power generation-supercapacitor energy storage grid-connected systems[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2): 47-55.
- [28] 陈景文, 王媛, 王福强, 等. 光储直流微电网多运行工况稳定性分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 15-23.  
CHEN J W, WANG Y, WANG F Q, et al. Stability analysis of optical storage DC microgrid under multiple operating conditions[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 15-23.

- [29] 王力, 胡佳成, 曾祥君, 等. 基于混合储能的交直流混联微电网功率分级协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2311-2324.  
WANG L, HU J C, ZENG X J, et al. Hierarchical coordinated power control strategy for AC-DC hybrid microgrid with hybrid energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2311-2324.
- [30] 田博文, 张志禹, 杨梦飞. 基于多次滑动均值滤波的混合储能功率分配与定容研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1548-1564.  
TIAN B W, ZHANG Z Y, YANG M F. Research on hybrid energy storage power allocation and capacity determination based on multiple moving average filtering [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1548-1564.
- [31] 袁昊, 刘宇航, 孙洁, 等. “双碳”背景下新能源并网储能容量优化配置方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(9): 134-140.  
YUAN H, LIU Y H, SUN J, et al. Energy storage capacity optimization allocation methods for grid-connected new energy under dual-carbon background[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(9): 134-140.
- [32] 曹宇, 胡鹏飞, 蔡婉琪, 等. 基于MMC的超级电容与蓄电池混合储能系统及其混合同步控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 78-89.  
CAO Y, HU P F, CAI W Q, et al. MMC based super capacitor and battery hybrid energy storage system and hybrid synchronous control strategy[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 78-89.
- [33] 熊保星, 甘文洋, 陈铭治, 等. 基于模糊线性自抗扰的水下机器人定深控制[J/OL]. 控制工程, 2024: 1-9. (2024-01-23)[2024-07-11]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230172>.  
XIONG B X, GAN W Y, CHEN M Z, et al. Depth control of underwater vehicle based on fuzzy linear active disturbance rejection[J/OL]. Control Engineering of China, 2024: 1-9. (2024-01-23) [2024-07-11]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230172>.
- [34] 陈伟国, 曾江. 基于改进LESO的电力电子负载自抗扰控制研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 176-185.  
CHEN W G, ZENG J. Research on active disturbance rejection control strategy of power electronic load based on improved LESO[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 176-185.
- [35] 张敏, 温涛, 王怀远. 基于重复控制的改进电压谐波线性自抗扰控制研究[J]. 广东电力, 2024, 37(5): 1-9.  
ZHANG M, WEN T, WANG H Y. Research on improved voltage harmonic linear active disturbance rejection control based on repetitive control[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(5): 1-9.
- [36] 周杰, 皇金锋, 黄红杰, 等. T型三电平储能变流器直流母线电压改进自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 81-91.  
ZHOU J, HUANG J F, HUANG H J, et al. DC bus voltage improved active disturbance rejection control of a T-type three-level energy storage converter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 81-91.
- [37] 张鑫. 基于VSG的微电网频率稳定控制方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.  
ZHANG X. Research on control method of microgrid frequency stability based on VSG[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.

收稿日期: 2025-01-04.

修回日期: 2025-02-19.

作者简介:



李涛

李涛(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电、光储逆变器, 1292669241@qq.com;



张春

张春(1972), 男, 硕士, 教授, 研究方向为智能控制理论与应用、智能微电网系统, 本文通信作者, chzhang@ahpu.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)