DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.161 中图分类号：TM464 文献标志码：A

构网储能 VSG 参数整定与无缝切换策略

孙逸斐[1]，周京华[1,2](中国电源学会高级会员)，陈莎莎[1]
(1.北方工业大学储能科学与工程学院，北京 100144；2.新型储能技术北京实验室，北京 100144)

摘要：传统电力系统中电力电子设备多以跟网型控制为主导，然而随着可再生能源占比逐步提高，新型电力系统面临缺乏惯性与阻尼的问题，威胁系统稳定性。基于虚拟同步发电机VSG(virtual synchronous generator)的构网储能技术可模拟传统同步发电机，主动支撑系统电压/频率，提升系统稳定性，因此该策略被诸多学者广泛关注。目前已有多种VSG控制策略，不同控制策略导致VSG参数整定难以统一，甚至构网能力不符合标准要求。首先，基于此，按照国家标准与电力行业标准进行参数整定，建立有功/无功小信号模型，确保所设计参数符合国家构网标准要求。接着，为减少并网电流冲击，在应用层面构网储能VSG需具备无缝切换功能。然后，基于消除相角跳变的方式提出一种新型预同步策略，该策略具备简单、易于工程实现等优点。最后，通过仿真与实验验证所提参数设计的可行性以及无缝切换策略的有效性。

关键词：虚拟同步发电机；无缝切换；小信号建模；储能变流器；构网变换器

Parameter Tunning for Grid-forming Energy Storage VSG and Seamless Switching Strategy

SUN Yifei[1], ZHOU Jinghua[1,2], *Senior Member*, *CPSS*, CHEN Shasha[1]
(1. School of Energy Storage Science and Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
2. Beijing Laboratory of New Energy Storage Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: In traditional power systems, power electronic devices are predominantly governed by grid-following control. However, with the increasing share of renewable energy, new power systems face issues such as a lack of inertia and damping, which threatens the system stability. The grid-forming energy storage technology based on virtual synchronous generator (VSG) can simulate traditional synchronous generator and actively support the system voltage and frequency, thereby enhancing the system stability. As a result, this strategy has attracted widespread attention from scholars. At present, various VSG control strategies have been developed. However, different control strategies result in challenges in unified parameter tuning, and the grid-forming capability may not meet standard requirements in some cases. Firstly, on this basis, parameter tuning is carried out according to national and power industry standards, and an active/reactive power small-signal model is established to ensure that the designed parameters meet national grid-forming standards. Subsequently, grid-forming energy storage VSG need to have seamless switching functionality at the application level, so as to reduce the impact of grid-connected current. Then, a novel pre-synchronization strategy based on eliminating phase-angle jumps is proposed, featuring advantages such as simplicity and ease of engineering implementation. Finally, simulations and experiments validated the feasibility of the proposed parameter design, as well as the effectiveness of the seamless switching strategy.

Keywords: Virtual synchronous generator (VSG); seamless switching; small signal modeling; power conversion system; grid-forming converter

收稿日期：2024-07-19；**修回日期：**2024-10-14；**录用日期：**2024-11-03；**网络首发日期：**2025-02-19
基金项目：北京市高水平创新团队建设计划资助项目(IDTH20180502)；北方工业大学毓杰团队资助项目(107051360024XN155)
This work is supported by Beijing High Level Innovation Team Construction Plan under the grant IDTH20180502; North China University of Technology Yujie Team under the grant 10705136 0024XN155

随着可再生能源的应用与发展，电力电子变换器大规模接入电网，新型电力系统逐步呈现“低

惯性”“低阻尼”的特征，已成为阻碍新能源渗透的关键因素。构网技术可提升新型电力系统稳定性，有望成为未来“源-网-荷”友好交互的有效控制手段之一，从而实现 100%新能源渗透[1]。构网算法包含虚拟振荡器控制 VOC(virtual oscillator control)[2]、下垂(droop)控制[3]、虚拟同步发电机 VSG(virtual synchronous generator)控制[4]，其中 VSG 控制算法通过模仿同步发电机为系统提供惯量与阻尼，可主动支撑系统电压/频率，被广泛应用于储能变流器 PCS (power conversion system)[5]。

VSG 已衍生出单环有效值控制[6-7]、双闭环控制[8]、自适应惯量与阻尼[9]、附加解耦项[10]及附加虚拟阻抗[11]等多种控制结构。国家标准[12-14]对 VSG 参数整定与测试制定指南与规范，标准[14]指出，构网储能 VSG 需具备并/离网切换功能，以缓解并网瞬时电流的冲击，在并网转离网时刻，其本身呈现电压源特性，可实现无缝切换。因此，合理的预同步策略是实现构网储能 VSG 无缝切换的关键手段。文献[15]提出了基于相角补偿的无锁相环预同步方法，与传统预同步相比，减少了 1 个比例积分 PI(proportional integral)控制器；文献[16]仿照虚拟同步机在定子回路中的思路，在转子回路中加入虚拟阻尼，使用 2 个 PI 控制器完成预同步控制，但增加了预同步控制复杂度；文献[17]将电网电压幅值/频率作为 VSG 输出电压/频率的参考值，该设计大大简化了预同步算法，但未对预同步逻辑进行设计；文献[18]提出一种孤岛/并网模式切换策略，但未考虑频率预同步环节，且未给出电网频率偏离额定的预同步结果。

本文基于双闭环控制的 VSG 方案，建立构网储能 VSG 有功/无功小信号模型，提出一种构网储能 VSG 参数设计流程，确保构网储能 VSG 给出符合标准的阻尼、惯量、响应时间与功率控制误差。此外，基于无缝切换策略的预同步环改进，从相位、频率、幅值预同步 3 个方面，提出一种新型预同步策略。该策略具有结构简单、易于工业实现等优势。

1 基本原理

PCS 的并网示意如图 1 所示，该系统由电池、直流开关、智能功率模块 IPM(intelligent power module)与相应驱动模块、LC 滤波器及交流开关组成。图中：i、i_o 分别为桥臂电流与输出电流；u_o、u_g 分别为交流开关内侧电压与外侧电压。电网经过线路阻抗 Z_{line} 到达并网点，电网电压记为 $U_g\angle 0$，构网储能 VSG 控制输出电压记为 $U_o\angle 0$，构网储能 VSG 内电动势记为 $E\angle\delta$。

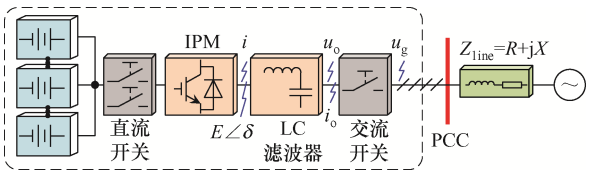


图 1 PCS 并网示意

Fig. 1 Schematic of PCS grid-connection

传统构网储能 VSG 控制框图如图 2 所示，由

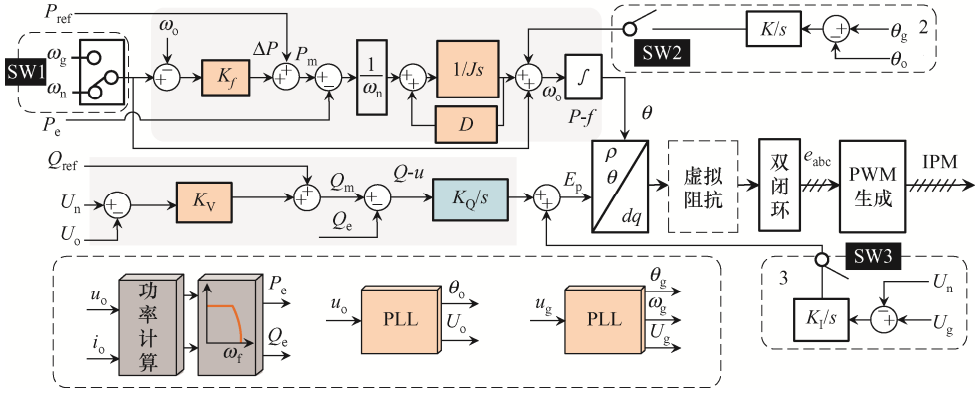


图 2 VSG 控制框图

Fig. 2 Control block diagram of VSG

功率计算与滤波、锁相环 PLL(phase-locked loop)、预同步与相关逻辑、*P-f* 环路、*Q-u* 环路、双闭环及脉宽调制 PWM(pulse width modulation)发波模块构成。

P-f 环路中，通过模拟同步发电机调速器特性(有功频率下垂特性)执行一次调频功能，其表达式为

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

式中：P_{m} 为 VSG 的机械功率；P_{ref} 为参考有功功率；K_f 为有功调频系数；ω_{n} 和 ω_{o} 分别为 VSG 额定角频率和输出角频率。借鉴同步发电机组转子运动方程可得到 *P-f* 环路的传递函数表达式为

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = T_{\mathrm{m}} - T_{\mathrm{e}} - D(\omega_{\mathrm{o}} - \omega_{\mathrm{n}}) \tag{2}$$

式中：J 为转动惯量；ω 为系统角频率；D 为阻尼系数；T_{m} 与 T_{e} 分别为 VSG 的机械转矩与电磁转矩，表达式为

$$\begin{cases} T_{\mathrm{m}} = \dfrac{P_{\mathrm{m}}}{\omega} \approx \dfrac{P_{\mathrm{m}}}{\omega_{\mathrm{n}}} \\ T_{\mathrm{e}} = \dfrac{P_{\mathrm{e}}}{\omega} \approx \dfrac{P_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{n}}} \end{cases} \tag{3}$$

式中，P_{e} 为 VSG 的电磁功率。

Q-u 环路通过模拟同步发电机无功-电压下垂特性，执行一次调压功能，其表达式为

$$Q_{\mathrm{m}} = Q_{\mathrm{ref}} + K_{\mathrm{V}}(U_{\mathrm{n}} - U_{\mathrm{o}}) \tag{4}$$

式中：Q_{m} 为 VSG 总无功参考功率；Q_{ref} 为参考无功功率；K_{V} 为无功调压系数；U_{n} 为额定电压幅值；U_{o} 为机端电压幅值。通过模拟同步发电机励磁调节器，可实现构网储能 VSG 对输出电压的控制，其表达式为

$$E_{\mathrm{p}} = K_{\mathrm{Q}}\int(Q_{\mathrm{m}} - Q_{\mathrm{e}})\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中：E_{p} 为 VSG 内部参考电动势幅值；K_{Q} 为 VSG 励磁调节器系数；Q_{e} 为 VSG 实际输出的无功功率。*P-f* 环路的输出角度 θ 与 *Q-u* 环路的输出电压幅值经坐标变化生成 VSG 内部参考电压，后经过双闭环控制生成调制波信号 e_{abc}，继而将其送入 PWM 发波模块与载波进行比较，生成脉冲信号，作用于 IPM。

为避免并网瞬间交流开关内、外侧电压不同步导致的巨大电流冲击，传统预同步环节如图 2 中 SW1、SW2、SW3 所示，由频率预同步、相位预同步与幅值预同步组成。由于传统预同步缺乏逻辑设计与判定，为适应并/离网 2 种工况，需人为给定启/停信号，无法做到任意工况下的一键启动。

2　构网储能 VSG 控制参数整定

构网储能 VSG 控制参数众多，可按照单机/预同步/并网 3 步进行参数整定，具体设计流程如图 3 所示。虚拟阻抗设计需考虑不同短路比 SCR(short circuit ratio)或其余额外功能的开发，此处不讨论虚拟阻抗设计。

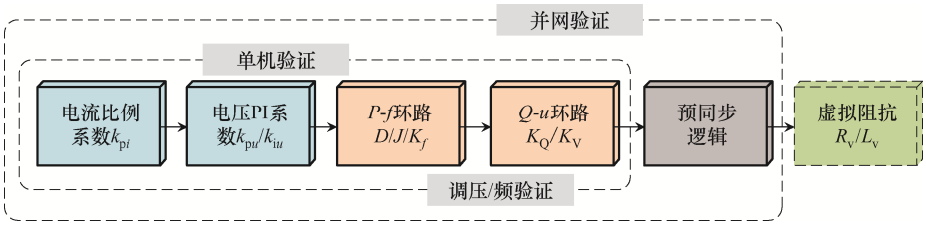


图 3　构网储能 VSG 参数设计流程

Fig. 3 Parameter design process of grid-forming energy storage VSG

2.1　电压电流环路参数设计

电压电流双闭环控制隶属构网储能 VSG 内环，控制方式多样，相域或 *dq* 域下均可进行设计，其本质是三相可控电压源。本文在此不展开电压电流环路设计流程，具体可参阅电力电子与自动控制相关书籍。

2.2　*P-f* 环路参数设计

2.2.1　有功调频系数 K_f

标准[13]规定有功调频系数 K_f 表征有功随频率的变化率，表示为

$$K_f = \pm\frac{\Delta P / P_\mathrm{n}}{\Delta f / f_\mathrm{n}} \tag{6}$$

式中：± 为变流器电流采样方向判定，针对 PCS 一般默认电流采样方向为逆变为正，向电网提供功率为正功率，本文沿用正号；ΔP 为虚拟同步机有功功率变化量；Δf 为虚拟同步机频率变化量；P_n 与 f_n 分别为虚拟同步机额定有功功率与频率，默认单位分别为 kW 与 Hz。相关标准给出 K_f 范围宜为 20~50。

2.2.2 虚拟同步机转动惯量 J

标准[12]定义惯量 J 为表征电化学储能电站模拟传统同步发电机转动惯量的特征参数，单位为 kg·m^2；定义表征电化学储能电站模拟传统同步发电机时间常数的特征参数 T_j 为

$$T_\mathrm{j} = \frac{J\omega_\mathrm{n}^2}{P_\mathrm{n}} \tag{7}$$

式中，P_n 单位为 W，标准[13]指出 T_j 宜在 3~12 s。

2.2.3 阻尼系数 D

标准[13]指出 D 应与 T_j 配合整定，使得虚拟惯量与一次调频有功超调满足电网并网要求。标准并未给出明确的设计指标，此参数在第 2.4 节中讨论。

2.3 *Q-u* 环路参数设计

2.3.1 无功调压系数 K_V

标准[13]规定使用 K_V 表征无功随电压的变化率，表示为

$$K_\mathrm{V} = \pm\frac{\Delta Q / Q_\mathrm{n}}{\Delta U / U_\mathrm{n}} \tag{8}$$

式中：ΔQ 为虚拟同步机无功功率变化量；ΔU 为虚拟同步机电压变化量；Q_n 与 U_n 分别为虚拟同步机视在功率与标称电压，默认单位分别为 kvar 与 V。相关标准给出 K_V 范围宜为 12.50~33.30。

2.3.2 励磁调节器系数 K_Q

标准未给出设计指标，此参数在第 2.4 节中讨论。

2.4 构网储能 VSG 阻尼与励磁调节器设计

为更好地分析 VSG 动态特性、选取合适的阻尼参数与励磁调节器参数，建立 VSG 小信号模型，如图 4 所示。

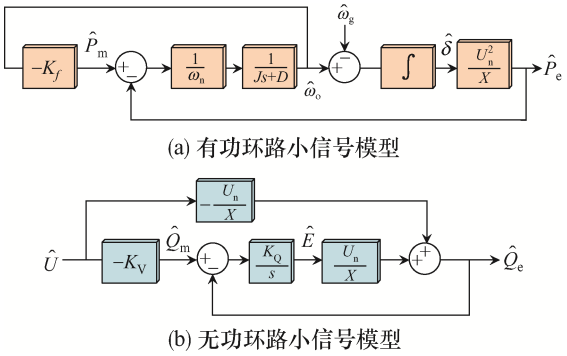


图 4 构网储能 VSG 小信号模型

Fig. 4 Small-signal model of grid-forming energy storage VSG

由图 4(a)可得，VSG 输出有功功率与参考功率的闭环传递函数为

$$\phi_\mathrm{P}(s) = \frac{P_\mathrm{e}(s)}{P_\mathrm{m}(s)} = \frac{A/\omega_\mathrm{n}}{Js^2 + Ds + A/\omega_\mathrm{n}} \tag{9}$$

系统自然振荡频率和阻尼比分别为

$$\begin{cases} \omega_\mathrm{pe,pm} = \sqrt{\dfrac{A}{J\omega_\mathrm{n}}} \\ \zeta_\mathrm{pe,pm} = \dfrac{1}{2}D\sqrt{\dfrac{\omega_\mathrm{n}}{AJ}} \end{cases} \tag{10}$$

式中，$A = U_\mathrm{n}^2 / X$，X 为等效阻抗。标准[13]允许的 VSG 输出有功曲线为最佳阻尼比或过阻尼，基于此可得约束条件 1，即

$$0.707 \leqslant \zeta_\mathrm{pe,pm} < 1.000 \tag{11}$$

标准[13]规定有功响应时间 t_s<500 ms，结合二阶系统响应时间(常用 4 倍时间常数表示系统输出达到稳态值 98%)得约束条件 2，即

$$\frac{4}{\zeta_\mathrm{pe,pm}\omega_\mathrm{pe,pm}} < 0.5 \tag{12}$$

由图 4(b)可得，VSG 输出无功功率与参考功率的闭环传递函数为

$$\phi_\mathrm{Q}(s) = \frac{Q_\mathrm{e}(s)}{Q_\mathrm{m}(s)} = \frac{1}{[X/(K_\mathrm{Q}U_\mathrm{n})]s + 1} \tag{13}$$

无功功率闭环传递函数为一阶惯性环节，$X/(K_\mathrm{Q}U_\mathrm{n})$为惯性时间常数，$K_\mathrm{Q}$ 越大响应时间越短。

标准[13]要求系统无功调压响应时间小于 500 ms，则 $3X/(K_{\mathrm{Q}}U_{\mathrm{n}})<0.5$ s，基于此可得约束条件 3，即

$$K_{\mathrm{Q}}>\frac{6X}{U_{\mathrm{n}}} \tag{14}$$

无功功率开环增益函数 $G_{\mathrm{Q}}(s)=1/X/(K_{\mathrm{Q}}U_{\mathrm{n}})$，设无功开环截止频率为 f_{q}，截止频率处的开环增益为 0 dB，可得

$$\left|G_{\mathrm{Q}}(\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{q}})\right|=(K_{\mathrm{Q}}U_{\mathrm{n}})/X\frac{1}{\left|\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{q}}\right|}=1 \tag{15}$$

整理可得

$$K_{\mathrm{Q}}=\frac{2\pi f_{\mathrm{q}}X}{U_{\mathrm{n}}} \tag{16}$$

为抑制瞬时无功功率中的两倍频波动，令 f_{q}=10 Hz，可得约束条件 4，即

$$K_{\mathrm{Q}}<\frac{20\pi X}{U_{\mathrm{n}}} \tag{17}$$

2.5 构网储能 VSG 算例设计

以 300 VA-PCS 为算例，对其进行参数整定，系统参数见表 1。由式(6)得到 K_f 范围为 20~50；由式(7)可得 J 范围为 0.009 13~0.036 50；由约束条件 1 与约束条件 2 可得，使系统稳定的 J 与 D 的范围如图 5 所示；由式(8)可得 K_{V} 范围为 120.97~322.58(标准给定范围乘 $Q_{\mathrm{n}}/U_{\mathrm{n}}$ 换算得到)；由约束条件 3 与约束条件 4 得到 K_{Q} 范围为 0.06~0.60。综上可得 VSG 控制参数，见表 2。

表 1　系统参数

Tab. 1 Parameters of system

模块	参数	数值
300 VA 实验平台	额定输出功率/VA	300
	额定并网电压(交流)/V	38
	额定电网频率/Hz	50
	馈电相数(相/线)	3/4
	过载能力/%	150
	额定直流电压/V	75
	最大直流电流/A	6
	直流输入路数	1
主回路	滤波电感 L/H	1×10^{-3}
	滤波电容 C/F	1×10^{-5}
	阻尼电阻 R_{d}/Ω	1

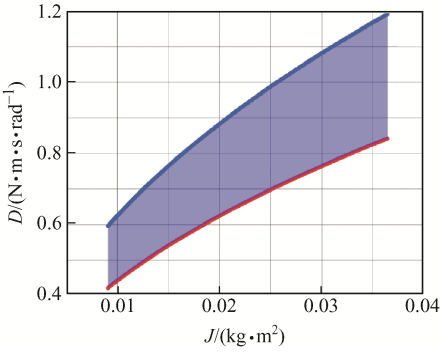


图 5　J/D 配合范围值

Fig. 5 Values of J and D in coordination range

表 2　300 VA 实验平台 VSG 控制参数

Tab. 2 VSG control parameters of 300 VA experimental platform

参数	数值
离散化时间 T_{s}	1/100 00
电流环比例系数 k_{pi}	3.00
电压环比例系数 k_{pu}	0.02
电压环积分系数 k_{iu}	$13T_{\mathrm{s}}$
有功调频系数 K_f/(W/rad·s^{-1})	47.7
转动惯量 J/(kg·m^2)	$0.01T_{\mathrm{s}}$
阻尼系数 D/(N·m·s·rad^{-1})	0.5
无功调压系数 K_{V}/(var·V^{-1})	300
励磁调节器系数 K_{Q}	$0.1T_{\mathrm{s}}$

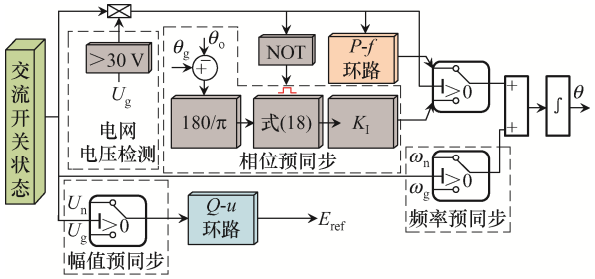
3　所提预同步原理及逻辑

本文所提预同步控制策略通过交流开关内、外侧压差，自动判断是否需要启用预同步控制，定义交流开关 1 为闭合状态，0 为断开状态，所提预同步算法与相关逻辑如图 6 所示。本文选取积分控制器 K_{I} 大小为 0.02。

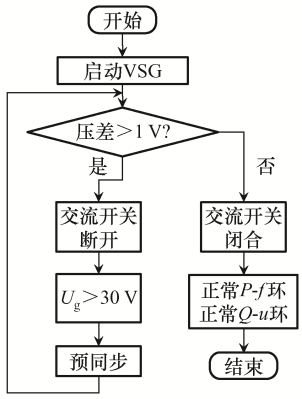
构网储能 PCS 离网下开关内、外两侧无电压且压差为 0 V，交流开关闭合，Q-u 环路参考电压为额定电压，VSG 开始建立输出电压，直到 U_{g}>30 V，正常 P-f 环路被使能，系统开始正常运行。

构网储能 PCS 并网下开关内、外两侧存在压差，交流开关断开，VSG 的 P-f 环路不被使能，系统进行相位、幅值、频率预同步，Q-u 环路参考电压为 U_{g}。预同步完成标志为开关内、外两侧压差实时值小于 1 V，判定完成后可闭合交流开关，退

出预同步并使能 *P-f* 环路。



(a) 所提预同步算法



(b) 所提预同步逻辑

图 6 所提预同步算法与相关逻辑

Fig. 6 Proposed pre-synchronization algorithm and related logic

本文所提预同步控制使用1个积分控制器K_I可实现预同步功能，K_I 与后级的角速度积分模块形成 PI 控制，进而实现相位同步。对相角差进行分段处理，以消除符号跳变，相角跳变消除模块遵循以下原则

$$\Delta\theta'=\begin{cases}(\theta_g-\theta_0)-360^\circ & \theta_g-\theta_0>180^\circ\\ \theta_g-\theta_0 & -180^\circ\leqslant\theta_g-\theta_0\leqslant180^\circ\\ (\theta_g-\theta_0)+360^\circ & \theta_g-\theta_0<180^\circ\end{cases} \tag{18}$$

式中：$\Delta\theta'$ 为经±180° 区间归一化处理后的电网电压与 VSG 输出电压之间的相位差；θ_g 与 θ_0 分别为锁相环检测得到的电网电压相位角与 VSG 输出电压相位角。

本文所提方案相比于传统预同步减少了设计复杂度，可自动适应并网/离网工况，且无需下发预同步指令。

4 实验验证

针对本文所提参数设计与预同步策略，研发了 300 VA 实验平台，并开展实验验证。实验平台参数见表 1，控制参数见表 2，实验平台接线示意图与使用相关仪器如图 7 所示。

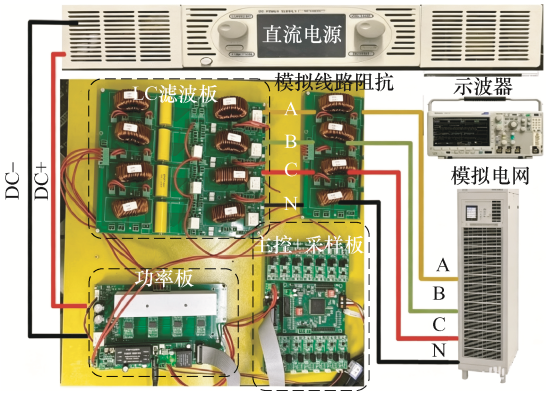


图 7 300 VA 实验平台实物图

Fig. 7 Photo of 300 VA experimental platform

为验证本文参数设计的正确性与可行性，进行构网储能 VSG 并网实验，模拟线路阻抗为 3 mH。构网储能 VSG 由启动到预同步结束并闭合交流开关的过程波形如图 8 所示，图中 $u_{g,ab}$ 与 $u_{o,ab}$ 分别为电网电压与 VSG 输出电压。构网储能变流器启动后在励磁调节器作用下，输出电压抬升至额定电压，同时在预同步环节作用下，构网型储能变流器输出电压与相角逐步与电网保持一致，直至开关内、外两侧压差<1 V，闭合交流开关，完成无冲击并网。由 VSG 下发启动指令至并网运行时间约为 450 ms。图 9 为传统预同

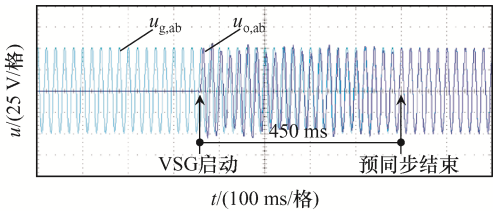


图 8 所提预同步算法过程波形

Fig. 8 Processes waveforms of proposed pre-synchronization algorithm

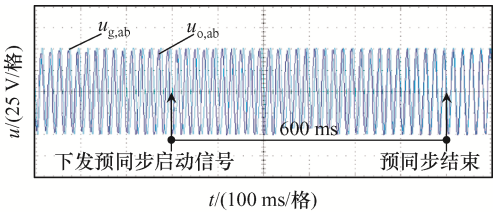
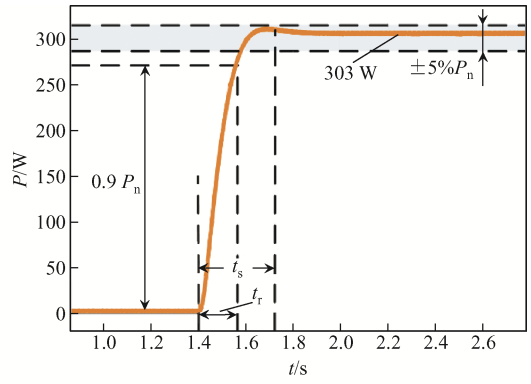


图 9 传统预同步算法过程波形

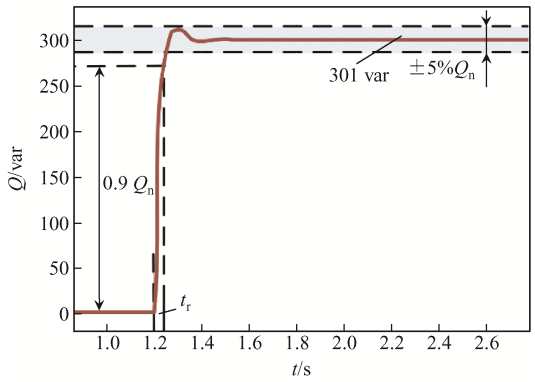
Fig. 9 Processes waveforms of traditional pre-synchronization method

步算法的过程波形，由 VSG 启动之后下发预同步信号，下发信号至预同步结束，所需时间大约为 600 ms。

为验证所提控制参数设计的合理性，考察构网储能 VSG 的功率阶跃响应。分别给定 P_{ref}、Q_{ref} 为 300 W、300 var，并将录波得到的电压与电流数据导入 MATLAB/Simulink 进行功率计算。构网储能 VSG 输出功率曲线如图 10 所示，有功功率响应时间 t_r 约为 150 ms(<500 ms)，调节时间 t_s 约为 300 ms(<1 s)，有功控制误差约为 1.00%(<±2.00%)；无功功率响应时间 t_r 约为 50 ms(<500 ms)，无功控制误差约为 0.33%(<±2.00%)。所设计控制器在稳态、动态下均可满足国标要求。



(a) 有功阶跃响应



(b) 无功阶跃响应

图 10　构网储能 VSG 功率响应曲线

Fig. 10 Power response curves of grid-forming energy storage VSG

为考察构网储能 VSG 稳态下的输出电能质量，分别给定 P_{ref}、Q_{ref} 为 300 W、0 var，构网储能 VSG 满功率输出时，系统电压、电流波形如图 11 所示。将录波得到的电流数据导入 MATLAB/Simulink 进行快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)分析，输出电流总谐波畸变率 THD_i(total harmonic distortion of current)如图 12 所示。THD_i 为 2%，可满足并网标准。

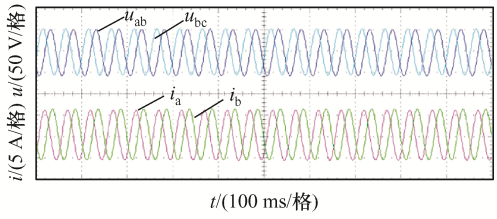


图 11　构网储能 VSG 满功率输出波形

Fig. 11 Full-power output waveforms of grid-forming energy storage VSG

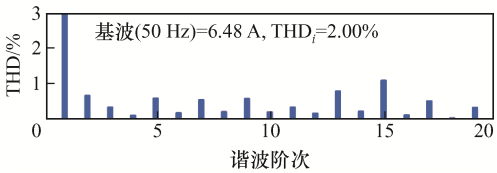


图 12　构网储能 VSG 满功率输出 THD_i

Fig. 12 THD_i of full-power output current of grid-forming energy storage VSG

为考察构网储能 VSG 的主动支撑功能，通过模拟电网模拟系统频率突降与电压突升 2 种工况，如图 13、图 14 所示。构网储能 VSG 在电网频率下降至 49.5 Hz 时，发送有功功率主动调频，420 ms 后至额定功率；构网储能 VSG 在电网电压上升至

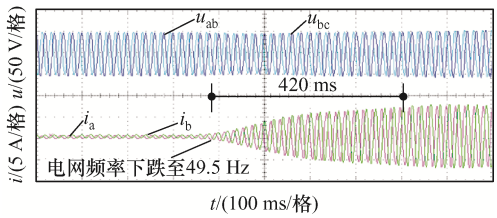


图 13　频率突降，构网储能 VSG 有功响应

Fig. 13 Active power response of grid-forming energy storage VSG under frequency droop

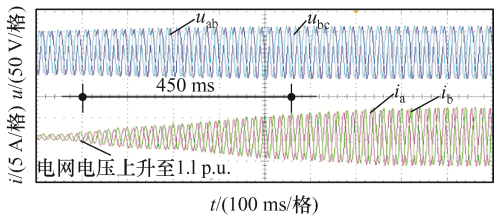


图 14　电压突升，构网储能 VSG 无功响应

Fig. 14 Reactive power response of grid-forming energy storage VSG under voltage surge

1.1 p.u.时，发送无功功率主动调压，450 ms 后至 0.9 倍额定功率；有功、无功调节过程无明显超调与振荡，稳态与动态指标均符合国家标准。

5 结语

本文依据国家标准设计构网储能 VSG 参数，并通过 VSG 小信号建模对标准尚未给出的参数进行设计。所设计参数通过实验证明具备构网能力且符合当前标准要求，为工商业构网储能提供了一种可行参考。在此基础上，通过对预同步算法的改进，实现构网储能 VSG 无缝切换。此外，所设计的预同步算法无需人为下发预同步命令即可实现同步，通过仿真与实验证明了其具有结构简单、易于设计等优点。

参考文献：

[1] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
Cao Wei, Qin Huancheng, Lu Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207. (in Chinese)

[2] Johnson B B, Dhople S V, Hamadeh A O, et al. Synchronization of parallel single-phase inverters with virtual oscillator control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6124-6138.

[3] 刘宝谨, 李春晨, 林佳鹏, 等. 下垂控制逆变器的序阻抗建模分析及验证[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 151-162.
Liu Baojin, Li Chunchen, Lin Jiapeng, et al. Sequential impedance modeling and verification for droop-controlled inverters [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 151-162. (in Chinese)

[4] 李祥柱, 徐永海. 储能 VSG 环流抑制及电压稳定控制策略研究[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 145-154.
Li Xiangzhu, Xu Yonghai. Research on circulating current suppression and voltage stability control strategy for energy storage VSG [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 145-154. (in Chinese)

[5] Zhang Haobo, Xiang Wang, Lin Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: Control strategy, stability, application, and challenges [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.

[6] Rosso R, Wang Xiongfei, Liserre M, et al. Grid-forming converters: Control approaches, grid-synchronization, and future trends——A review [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.

[7] Du Wei, Chen Zhe, Schneider K P, et al. A comparative study of two widely used grid-forming droop controls on microgrid small-signal stability [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 963-975.

[8] Han Feng, Zhang Xing, Guo Zixuan, et al. A comparative study of single-loop VSG and multi-loop VSG [J]. Energy Reports, 2022, 8: 28-35.

[9] 李志军, 贾学岩, 王丽娟, 等. 基于改进惯量阻尼特性的 VSG 控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 78-85.
Li Zhijun, Jia Xueyan, Wang Lijuan, et al. Improved virtual synchronous generator based on enhanced inertia and damping characteristics [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(7): 78-85. (in Chinese)

[10] Rathnayake D B, Bahrani B. Multivariable control design for grid-forming inverters with decoupled active and reactive power loops [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1635-1649.

[11] Wang Xiongfei, Li Yunwei, Blaabjerg F, et al. Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7019-7037.

[12] 国家能源局. 电化学储能电站并网运行与控制技术规范 第 7 部分：惯量支撑与阻尼控制: DL/T 2246.7—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Technical specification for grid-connected operation and control of electrochemical energy storage station. Part 7: Inertia support and damping control: DL/T 2246.7—2021 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021. (in Chinese)

[13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 虚

拟同步机 第 1 部分：总则: GB/T 38983.1—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Virtual synchronous machine: Part 1: General: GB/T 38983.1—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)

[14] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 储能变流器检测技术规程: GB/T 34133—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Testing code for power conversion system of energy storage system: GB/T 34133—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023. (in Chinese)

[15] Wang Jianfeng, 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.

[16] 魏亚龙, 张辉, 孙凯, 等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 124-129, 178.

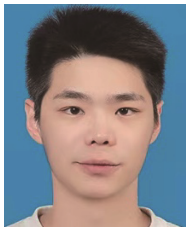
Wei Yalong, Zhang Hui, Sun Kai, et al. Pre-synchronization method of virtual synchronous generator using virtual power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 124-129, 178. (in Chinese)

[17] 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 Pengxiang, Jia Xuanyue, Xu Changqing, 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. (in Chinese)

[18] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-23.

Shi Rongliang, Zhang Xing, Xu Haizhen, et al. Seamless switching control strategy for microgrid operation modes based on virtual synchronous generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 16-23. (in Chinese)



孙逸斐

作者简介：

孙逸斐(1997—)，男，通信作者，博士研究生。研究方向：新能源发电及其应用。E-mail：sunyifei@mail.ncut.edu.cn。

周京华(1974—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：大功率电力电子技术及其新能源发电应用。E-mail：zjh@ncut.edu.cn。

陈莎莎(1995—)，女，博士研究生。研究方向：新能源并网技术。E-mail：2023413010114@mail.ncut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)