

基于自适应 VSG 控制策略的光伏混合 储能系统研究

韩鸿霖*, 王星璐, 林存浩

(河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038)

Research on Photovoltaic Hybrid Energy Storage System Based on Adaptive VSG Control Strategy

HAN Honglin*, WANG Xinglu, LIN Cunhao

(College of Mechanical and Equipment Engineering,
Hebei University of Technology, Handan 056038, China)

Abstract: [Objective] In the context of ongoing energy transition, photovoltaic power generation has attracted significant attention due to its clean and environmentally friendly nature, and its penetration rate in the energy sector continues to rise. However, the randomness and volatility of its output pose challenges to the stable operation of the power system. To address issues such as slow dynamic response and poor stability caused by grid-connected photovoltaic power generation units, a photovoltaic hybrid energy storage system is proposed. [Methods] With a focus on photovoltaic power generation, a hybrid energy storage system was introduced on the DC side of photovoltaic inverter. Considering the working characteristics of battery and supercapacitor, they were connected to the DC bus through a DC/DC converter using an active connection method. A separate frequency division control strategy was developed for the energy storage unit. Maximum power point tracking (MPPT) control was applied to the Boost converter of the photovoltaic power generation unit, and a strategy based on virtual synchronous generator (VSG) control was proposed to achieve grid connection of photovoltaic inverter. This paper established the VSG mathematical model in the two-phase synchronous rotating coordinate system, analyzed the impact of moment of inertia J and damping D on the system, pointed out the improvement methods, derived the adaptive parameter expression, and designed key parameters in the system. Finally, a grid-connected simulation model of photovoltaic hybrid energy storage was established in Matlab/Simulink. The active power output of the system was analyzed under the improved adaptive VSG control strategy proposed in this paper and the traditional VSG control strategy, with constant external

conditions. Additionally, the stability of the entire system was analyzed under the given values of changing light intensity, load jump, and active power command jump. [Results] By observing the corresponding waveforms of each module, it is shown that the developed system can adjust the charging and discharging power of the battery in real time based on the relationship between photovoltaic output and load demand, ensure the power balance, and maintain the voltage stability of the bus. The proposed improved adaptive VSG control strategy not only considers the change in moment of inertia, but also takes into account the change in damping coefficient, which allows it to simultaneously suppress the frequency deviation rate and variation. Compared to the traditional VSG control strategy, it can further improve the frequency response and active power output response characteristics. The photovoltaic hybrid energy storage frequency division control can rapidly mitigate the power fluctuations in the system and make full use of the working characteristics of the energy storage system to maintain stable operation, which is conducive to extending the service life of the battery. [Conclusion] The simulation results strongly validate the feasibility and advantages of the proposed improved adaptive VSG control strategy in optimizing the operational efficiency of the photovoltaic hybrid energy storage system and supporting the reliable grid connection of distributed photovoltaic systems. Moreover, it provides new insights and technical support for the stable management and control of new energy power systems.

Key words: photovoltaic hybrid energy storage; virtual synchronous generator; adaptive control; moment of inertia; damping coefficient

摘要:【目的】当今能源转型进程中,光伏发电因清洁环保备受瞩目,并且在能源领域渗透率不断攀升,其出力随机性与波动性给电力系统稳定运行带来挑战,针对光伏发电单元并网容易引发电网的动态响应慢及稳定性差等问题,提出一种光伏混合储能系统。【方法】以光伏发电为主题,在光伏逆变器直流侧引入混合储能系统。针对蓄电池与超级电容各自工作特性,把蓄电池和超级电容经过 DC/DC 变流器采用有源式接法连接至直流母线,对储能单元单独制定分频控制策略,对光伏发电单元的 Boost 变换器采用最大功率点跟踪 (MPPT) 控制,并提出一种基于虚拟同步发电机 (VSG) 控制的策略来实现光伏逆变器的并网。在两相同步旋转坐标系下建立 VSG 数学模型,并分析转动惯量 J 与阻尼 D 对系统的影响,指出改进方法,进一步推导出自适应参数表达式,并对系统中一些主要关键参数进行设计。最后在 Matlab/Simulink 中建立光伏混合储能并网仿真模型,并分析在外界条件不变工况下本文所提改进自适应 VSG 控制策略与传统 VSG 控制策略控制下系统有功功率的输出,以及在光强变化、负载跳跃和有功功率指令跳跃给定值条件下整个系统的稳定性。【结果】通过观察各个模块相应波形,表明所建立的系统可以根据光伏出力和负载的大小关系,实时调整蓄电池的充放电功率,保证功率平衡,维持母线电压稳定。所提改进自适应 VSG 控制策略不仅考虑转动惯量变化,同时考虑阻尼系数的变化,可以同时抑制频率偏差率和变化量,与传统 VSG 控制策略对比能够进一步改善频率响应特性和输出有功响应特性。光伏混合储能分频控制可以快速平抑系统中功率波动情况,充分利用储能系统各自工作特性使系统始终处于一个稳定状态运行,有利于延长蓄电池使用寿命。【结论】仿真结果有力地证实了所提改进自适应 VSG 控制策略对优化光伏混合储能系统运行效能、助力分布式光伏可靠并网的可行性与优越性,为新能源电力系统稳定管控开拓新思路、提供技术支撑。

关键词: 光伏混合储能; 虚拟同步发电机; 自适应控制; 转动惯量; 阻尼系数

0 引言

随着化石燃料的过度使用和资源短缺问题加重,近年来各个国家不断重视对新能源的利用,加大对新能源的研究开采^[1-4]。微电网作为连接电网和分布式电源的纽带可以容纳多种形式的分布式单元接入,诸如光伏 (Photovoltaic, PV)、储能电池、柴油机和风力发电机等,可以有效缓解大规模

分布电源接入电网带来的冲击。这些单元大多都是通过逆变器接入电网^[5-8],其控制技术的优劣直接决定着整个能源系统的稳定性、高效性与可靠性。对于 PV 并网逆变器的控制研究中,最常见的是恒功率控制、下垂控制以及电压频率控制,但由于逆变器本身不具有惯性和阻尼,使得系统更容易出现功率振荡等问题,且这三种控制策略都无法为 PV 逆变器提供相应所需惯性阻尼,进而减弱系统稳定性。

PV 发电装置中,单一 PV 发力有一定的不稳定性,配备储能装置可以有效增强系统稳定性^[9-12]。针对 PV 逆变系统稳定性问题,近年来,国内外研究人员相继对常规同步发电机 (Synchronous Generator, SG) 的工作机理进行了深入的研究,并将其与常规控制方法融合在一起,提出了基于虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 的控制策略^[13-17]。该控制策略使得逆变器在面对扰动时具有类似同步发电机的转动惯量和阻尼特性,极大增强了系统抗干扰能力。

为此,国内外许多学者分别有不同程度的研究。文献[18]在传统 VSG 控制基础上,分析了传统发电机转子惯量和阻尼系数与系统频率稳定性关系,设计了一种自适应惯量阻尼综合算法,并通过仿真验证算法在改善系统频率稳定性上有一定效果。文献[19]基于储能变换器的控制提出一种 VSG 与恒功率 (PQ) 控制模式切换的双控制策略,提出的控制方案可以使两种工作方式之间平稳转换,但是在参数设置上还需要进一步改进。文献[20]在转动惯量控制中引入频率变化量形成 VSG 转动惯量自适应控制,但没有提及调整系数的整定方法。文献[21]提出一种虚拟惯量和虚拟阻尼优化的方法,该方法对系统频率波动起到一定抑制作用,但未考虑到阻尼对系统动态性能的影响。文献[22]对 VSG 进行建模并分析不同转动惯量和阻尼系数对系统输出的影响,设计出自适应控制策略,通过仿真验证正确性,可以有效减小频率振荡。文献[23]提出一种带通阻尼功率反馈的 VSG 控制策略,并进一步对改进的控制策略有功环特性进行分析,给出了带通阻尼功率反馈环节的参数设计方法,通过仿真验证了所提策

略可以有效抑制频率振荡, 阻尼反馈与下垂控制间互不影响。然而引入的带通滤波器, 使系统整体参数设计较为复杂。

基于上述问题, 本文把转动惯量与阻尼系数相结合来分析, 通过分析储能装置的控制, 对 VSG 进行建模分析, 设计出自适应参数表达式, 最后运用到 PV 储能系统中, 通过仿真分析系统在不同工况下的稳定性。结果证明所提改进策略可以有效抑制有功频率振荡, 可与储能装置协调使整个系统处于稳定状态。

1 PV 与混合储能系统模型建立

本文构建的 PV 与混合储能并网结构拓扑如图 1 所示。直流侧由光伏模块和储能模块组成, 储能模块由超级电容和电池组成, 能量通过直流侧流入 DC/AC 变换器并返回电网。其中, PV 发电单元通过 DC/DC 变换器并入直流母线电压, 采用最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制。电池与超级电容主动连接, 并连接直流母线^[24-25], 使储能元件的控制更加接近理想化, 以满足系统的需求。根据二者不同的工作特性分别制定不同的控制策略, 蓄电池的 DC/DC 变换器采用恒功率控制, 超级电容的 DC/DC 变换器采用恒压控制。DC/AC 变换器是直接与电网相连部分, 稳定性可能直接影响整个系统性能, 采用 VSG 算法来控制, 使系统具有惯性和阻尼特性, 提升系统稳定性。

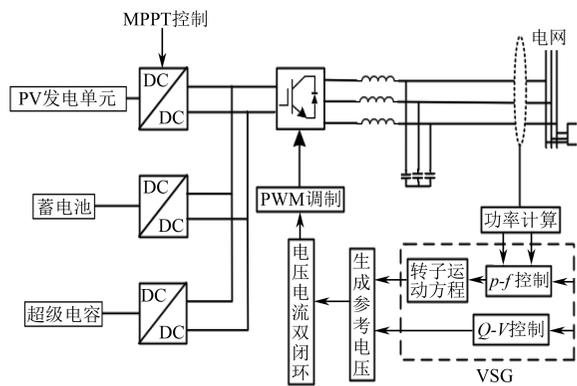


图 1 VSG 控制 PV 混合储能系统
Fig. 1 VSG control PV hybrid energy storage system

假设系统中 PV 板输出功率为 P_{pv} , 蓄电池输出功率为 P_{bat} , 超级电容输出功率为 P_{sc} , 逆变器

输出有功功率为 P_{VSG} , 负载功率为 P_{load} , 流入电网功率为 P_{grid} 。其中, P_{bat} 、 P_{sc} 可为负值, 其为负值时表示吸收功率, 为正值时表示释放功率, 几个单元之间功率关系满足式(1):

$$P_{pv} + P_{bat} + P_{sc} = P_{VSG} = P_{load} + P_{grid} \quad (1)$$

1.1 PV 发电单元及其控制

PV 模块是光伏发电系统核心器件, 结构如图 2 所示。

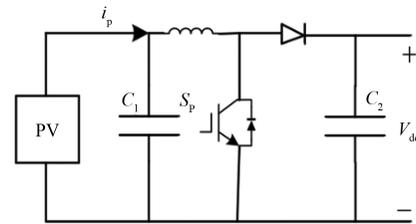


图 2 PV 结构图

Fig. 2 PV structure diagram

PV 经过 Boost 升压电路, 将 PV 电压升至直流母线电压值 V_{dc} , 在 MPPT 控制方法下使 PV 板始终保持最大功率输出。该方法通过给定 PV 输出电压微小扰动来观察输出功率波动趋势, 不断调节输出电压使输出功率达到一个最大值, 通过对 MPPT 来产生脉冲信号从而控制开关管 S_p 的开通和关断。

1.2 混合储能单元及其控制

单一 PV 模块在外界环境变化例如光照突变或负载突变等特殊情况下, 很容易发生功率波动, 从而造成直流母线电压波动, 影响整个系统稳定性。因此引入混合储能装置, 蓄电池与光伏各自工作特性相互配合可以使系统持续处于一个稳定的状态。蓄电池和超级电容经过 DC/DC 变流器采用有源式接法连接至直流母线, 以蓄电池为例, DC/DC 电路结构图如图 3 所示。

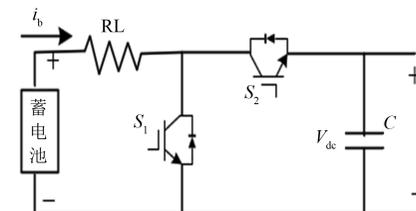


图 3 DC/DC 变换器结构图

Fig. 3 DC/DC converter structure diagram

图 3 中, i_b 为蓄电池输出电流, S_1 、 S_2 分别为控制两个绝缘栅双极型晶体管的开关。蓄电池经

过双向 DC/DC 变换器接入直流母线,双向变换器可以工作在 Buck 模式,也可以工作在 Boost 模式,通过控制蓄电池充放电来控制直流母线电压恒定以及系统内功率稳定。

当系统发生功率波动时,超级电容可快速平抑波动功率高频分量部分,蓄电池则缓慢平抑低频部分,二者相互配合不仅可以使系统处于稳定状态,更可以延长蓄电池使用寿命。混合分频控制图如图 4 所示。

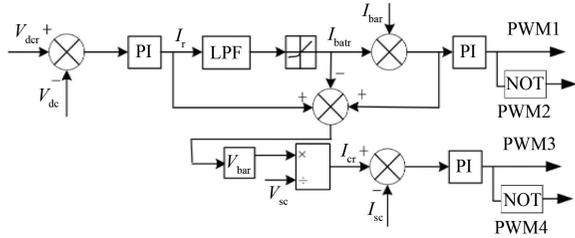


图 4 混合储能分频控制图

Fig. 4 Frequency division control diagram of hybrid energy storage

图 4 中,直流母线电压参考值 V_{dcr} 和直流母线电压实际值 V_{dc} 通过比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器得到电流参考值 I_r 。对参考电流进行处理,通过低通滤波器得到低频电流分量,通过速率控制器得到电池电流参考值 I_{batr} 。将 I_{batr} 与电池电流实际值 I_{bat} 的差值通过 PI 控制器得到脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 控制环节的电压信号,最后由 PWM 控制环节发出触发脉冲信号 PWM1、PWM2 来驱动蓄电池双向变换器的开关管。对于超级电容的控制,根据控制图 4 可得到电容参考电流 I_{scr} 表达式为

$$I_{scr} = \frac{[I_r - I_{batr} + (I_{batr} - I_{bat})] V_{bat}}{V_{sc}} = \frac{(I_r - I_{bat}) V_{bat}}{V_{sc}} \quad (2)$$

式中: V_{bat} 为蓄电池输出电压; V_{sc} 为超级电容端电压。

2 VSG 模型及其改进

2.1 传统 VSG 数学模型

DC/AC 部分采用 VSG 控制,主要包括有功-频率控制、无功-电压控制和电压电流双环控制等环节,类比于传统发电机在控制中加入二阶模型,可得到变换器输出功率与角频率之间关系式为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_n \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_m = T_m \omega \approx T_m \omega_n \\ P_e = T_e \omega = T_e \omega_n \end{cases} \quad (4)$$

式中: J 、 D 分别为虚拟转动惯量、阻尼系数; ω 、 ω_n 分别为 VSG 的转子输出角频率、额定转子角频率; T_m 为转矩给定值; T_e 为 VSG 输出转矩; P_m 、 P_e 分别为逆变器输入机械功率、输出电磁功率; θ 为虚拟转子角。

VSG 有功频率控制如图 5 所示。

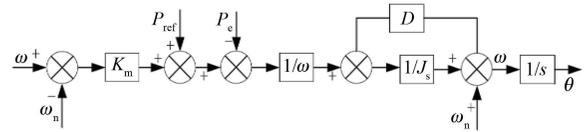


图 5 有功-频率控制框图

Fig. 5 Active power-frequency control block diagram

VSG 通过有功频率调节、无功电压调节使得变流器具有与 SG 相似的下垂特性,使变流器在并网情况下具有一次调频与调压功能,其具体表达式如无功-电压控制部分是模拟 SG 的励磁调节器设计,具有下垂特性,通过调节无功功率控制输出电压幅值的大小,使 VSG 具备一次调压特性,如图 6 所示。在并网时,需要通过励磁调节对输出电压进行调节,励磁调节控制表达式可表示为

$$E = \frac{K_j}{s} [K_q(Q_r - Q_e) + (U_n - U_m)] \quad (5)$$

式中: K_j 为积分系数; K_q 为无功功率的下垂系数; Q_r 、 Q_e 分别为无功功率参考值、实际值; U_n 、 U_m 为逆变器额定电压值、实测电压值。

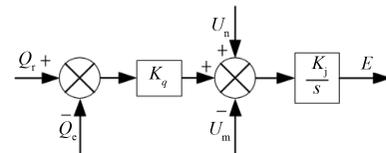


图 6 无功-电压控制图

Fig. 6 Reactive power-voltage control diagram

2.2 改进自适应 VSG 控制

转动惯量 J 和阻尼系数 D 的选取会对系统输出特性产生影响。 J 保持不变时,阻尼系数 D 在稳态区域内越大,角速度变化幅度 $\Delta\omega$ 越小;阻尼系数 D 为不变常数时,转动惯量 J 在系统稳定区

域内越大,角速度变化率越小,频率变化幅度越缓慢^[26-28]。SG 功角和转子角频率振荡曲线如图 7 所示。

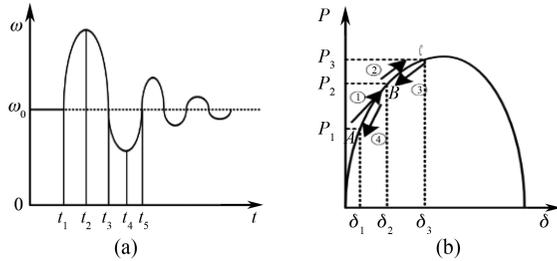


图 7 同步机功角与转子角频率振荡曲线

Fig. 7 Oscillation curves of power angle and rotor angular frequency of synchronous machine

图 7(b) 中①~④四个阶段分别对应图 7(a) 中四个时间阶段,四个阶段组成一个完整的角速度暂态过程,对其进行分析:当处于阶段①时,转子角频率从 ω_0 开始增加,处于一个加速阶段,为防止角速度的快速增长对系统造成不利影响,可通过增加 J 和 D 控制角速度的增加速度;当处于阶段②时,转速有一个下降的过程,但是仍要比电网同步角速度大,且在逐渐接近,功角还在不断增大,为防止越限,应适当减小 J 和 D 并使这一阶段尽早结束;阶段③与阶段①过程类似,阶段④与阶段②类似。由此可见角速度变化幅度 $\Delta\omega$ 与角速度变化率 $d\omega/dt$ 共同决定 J ,当角速度变化幅度 $\Delta\omega$ 增大时,需要增大阻尼系数来抑制角速度的进一步偏移, D 的选择由 $\Delta\omega$ 决定,具体选取规则如表 1 所示。

表 1 转动惯量与阻尼在不同阶段选取原则

Tab. 1 Selection principles of moment of inertia and damping at different stages

区间	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	$(d\omega/dt) \cdot \Delta\omega$	J 变化情况	D 变化情况
①	>0	>0	>0	增加	增加
②	>0	<0	<0	减小	增加
③	<0	<0	>0	增加	增加
④	<0	>0	<0	减小	增加

根据表 1 可以得到 J 与 D 的关系式为

$$J = \begin{cases} J_0, & \Delta\omega(d\omega/dt) \leq 0 \cup |d\omega/dt| \leq N_j \\ J_0 + K_j |d\omega/dt|, & \Delta\omega(d\omega/dt) > 0 \cap |d\omega/dt| > N_j \end{cases} \quad (6)$$

$$D = \begin{cases} D_0, & |\Delta\omega| \leq N_d \\ D_0 + K_d |\Delta\omega|, & |\Delta\omega| > N_d \end{cases} \quad (7)$$

式中: J_0 、 D_0 分别为平稳运行时的转动惯量、阻尼系数; K_j 、 K_d 分别为转动惯量自适应调整参数、阻尼系数自适应调整参数; N_j 、 N_d 为给定的限定值。

在实际应用中, K_j 、 K_d 的选取会影响 J 和 D 的数值从而间接影响系统的性能好坏。 J 决定了输出有功功率响应过程中的振荡频率,合理选取 J 可以提高 VSG 自适应算法的快速响应,而 D 决定了有功功率响应振荡衰减速率。

因此 K_j 、 K_d 、 N_j 和 N_d 的选取对系统频率稳定的快速性和准确性有一定影响,需要根据实际需求做出选择。

2.3 主要参数整定

分析可知 J 并不是越大越好,关于转动惯量的参数整定参照最优二阶系统的方法整定。当转动惯量过大时,会影响系统的相应快速性,破坏系统稳定,依据鲁汶大学对转动惯量的限定^[29-31],可得出其基本限制关系为

$$J \leq \frac{P_{\max}}{\max[\omega(d\omega/dt)]} \quad (8)$$

式中: P_{\max} 为逆变器输出侧最大功率。

当系统趋于稳定时, $d\omega/dt = 0$,可得到角频率偏移量为

$$\Delta\omega_{\max} = \frac{|J - J_0|}{K_j} \quad (9)$$

进一步,根据转子机械方程与式(9),可得到 K_j 表达式为

$$K_j = \frac{|J - J_0| D \omega}{P_m - P_e} \Big|_{\omega=\omega_n} = \frac{|J - J_0| D_0 \omega_n}{\Delta P} \quad (10)$$

当系统进入稳态以后,根据转子机械方程式(3)可知,阻尼系数可以近似的看成发生频率波动时的有功-频率下垂系数,表达式可描述为^[32]

$$D = \frac{P_m - P_e}{\omega \cdot \Delta\omega} = \frac{T_m - T_e}{\Delta\omega} = \frac{\Delta T}{\Delta\omega} \quad (11)$$

所以,系统进入稳态运行时,如果假设系统频率偏差为 ± 0.2 Hz 时,则系统转矩变化为 100%,可得到:

$$D_0 = \frac{\Delta T}{|\Delta\omega|} = \frac{P_{\text{ref}}/\omega_n}{|\Delta\omega|} \approx 15 \quad (12)$$

根据 D 的自适应策略表达式(7)和转子机械方程式(3)可得到 K_d 的表达式为

$$K_d = \frac{|D - D_0| D \omega}{P_m - P_e} \Big|_{\omega=\omega_n} = \frac{|D - D_0| D_0 \omega_n}{\Delta P} \quad (13)$$

控制策略以 $\Delta\omega \cdot d\omega/dt$ 作为判断条件,设定阈值 N_j ,限定过滤 $d\omega/dt$ 接近 0 时产生的微小频率波动,以避免 $\Delta\omega \cdot d\omega/dt$ 判定正负紊乱,对系统的稳定造成影响。 N_d 判断角频率的偏离程度,当超过阈值时增加阻尼来减小频率偏差,从而达到改善频率稳定性的目的。

N_j 、 N_d 的选取应满足式(14):

$$\begin{cases} 0 < N_j < \left| \frac{d\omega}{dt} \right|_{\max} \\ 0 < N_d < \Delta\omega \end{cases} \quad (14)$$

参数设计在实际应用时,均会受到外界因素的影响,因此在选取时要根据实际情况以使系统达到最优运行为目的合理选取。

3 电压电流双闭环控制策略

逆变器经过 VSG 控制生成参考电压信号后由于要使用 PI 控制器,因此要将系统生成的交流量转换成直流量,不难得出并网变换器在两相同步旋转坐标系 d - q 下的表达式为

$$\begin{cases} L \frac{di_{Ld}}{dt} = u_d - e_d - Ri_{Ld} + \omega L_f i_{Lq} \\ L \frac{di_{Lq}}{dt} = u_q - e_q - Ri_{Lq} + \omega L_f i_{Ld} \end{cases} \quad (15)$$

式中: i_{Ld} 、 i_{Lq} 、 u_d 、 u_q 、 e_d 、 e_q 分别为逆变器在 d 轴、 q 轴的电感电流、输出电压、VSG 输出电压的实际值; R 、 L_f 分别为 SG 中定子绕组的电枢电阻、电枢电感。

在实际运行中,由于系统中存在感性与阻性分量容易在生成有功与无功功率之前产生耦合现象。为了更易于在双闭环控制中进行解耦控制,需要在电路中加入虚拟阻抗,通过灵活设置阻抗比来使系统更优运行,阻抗比具体表达式为

$$Z_g = R_g + \omega L_g j \quad (16)$$

式中: Z_g 为虚拟阻抗; R_g 为虚拟阻值; L_g 为虚拟电感值。

进一步得到 VSG 输出电压参考值表达式为

$$\begin{cases} u_{dr} = E - R_g i_{gd} + \omega L_g i_{gq} \\ u_{qr} = -R_g i_{gq} + \omega L_g i_{gd} \end{cases} \quad (17)$$

式中: i_{gd} 、 i_{gq} 分别为 VSG 在 d 、 q 轴输出电流的实际值; u_{dr} 、 u_{qr} 分别为 VSG 在 d 、 q 轴输出电压的参考值。

由此可得到电压外环控制方程为

$$\begin{cases} (u_{dr} - e_d)(k_{pv} + k_{iv}) - \omega C e_q = i_{dr} \\ (u_{qr} - e_q)(k_{pv} + k_{iv}) - \omega C e_d = i_{qr} \end{cases} \quad (18)$$

式中: k_{pv} 、 k_{iv} 分别为电压外环比例、积分系数; ωC 为电压外环的解耦量; i_{dr} 、 i_{qr} 为电流内环输入值,即 VSG 输出电流参考值。

同理得出电流内环控制表达式为

$$\begin{cases} e_d + \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{dr} - i_{gd}) - \omega L i_{gq} = u_d \\ e_q + \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{qr} - i_{gq}) + \omega L i_{gd} = u_q \end{cases} \quad (19)$$

式中: k_{pi} 、 k_{ii} 分别为电流内环比例、积分系数。

电压电流双闭环控制图如图 8 所示。

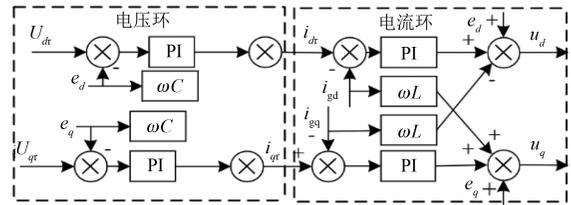


图 8 电压电流双闭环控制图

Fig. 8 Voltage and current double closed-loop control diagram

由图 8 可知,通过电压电流双闭环解耦控制可以有效提高系统稳态性和动态响应,电压外环对输出的电压信号进行跟踪,起到一个稳压的作用,电流内环起到一个提升系统响应速度的作用。

4 仿真分析

为了验证本文所提控制策略可行性与正确性,在 Matlab/Simulink 中搭建光储并网的改进 VSG 仿真模型。本文设置负载突变与负载不变两种工况并加入光照强度改变情况来分别来观察系统有功功率与角频率的振荡情况。系统主要参数如表 2 所示。

4.1 条件不变情况下仿真

设定初始辐照度为 1000 W/m^2 、初始环境温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,将 10 kW 的三相交流负载接入系统并

保持不变。当光照强度与其他条件均不发生变化时,设定 VSG 输出指令有功功率值为 20 kW,得到自适应 VSG 控制与传统的 VSG 控制输出功率曲线、角频率波动分别如图 9、图 10 所示,并网电流谐波分析结果如图 11 所示。

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
直流电压 V_{dc}/V	750	$\omega_n/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	314
参数电网线电压 V	380	$J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.2
参数额定频率 f_0/Hz	50	$D_0/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	15
直流母线电容 C_1/mF	16	K_j	0.003
滤波电容 $C_2/\mu\text{F}$	22	K_d	0.78
储能电感 L/mH	5	N_j	2.4
滤波电感 L_1/mH	1.8	N_d	1

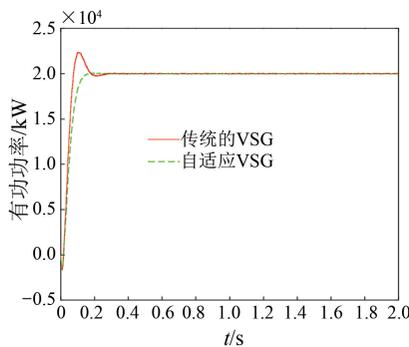


图 9 加入自适应前后 VSG 输出有功功率对比

Fig. 9 Comparison of VSG output active power before and after adding adaptive control

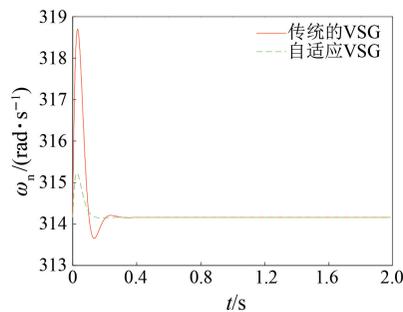


图 10 加入自适应前后 VSG 角频率对比

Fig. 10 Comparison of VSG angular frequency before and after adding adaptive control

由图 9~图 11 可知,文本所提改进自适应 VSG 控制策略可以使有功功率快速达到指令值并减小相应超调量;本文所提自适应 VSG 控制策略可以有效抑制角频率波动使其快速达到平衡;并网电流总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)值过高代表较多谐波注入电网会对电网

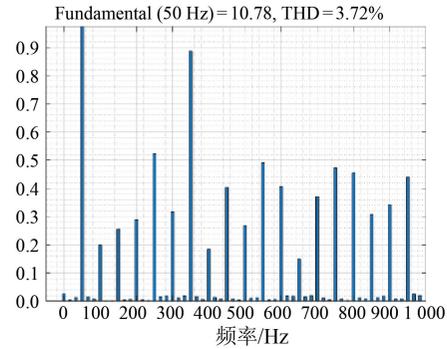


图 11 并网电流谐波分析

Fig. 11 Harmonic analysis of grid-connected current

压、频率稳定性造成一定影响,如图 11 所示 THD 值为 3.72%,小于 5%,符合并网要求。

4.2 光照发生变化情况下仿真

设定初始辐照度为 $1\ 500\ \text{W}/\text{m}^2$ 、初始环境温度为 $25\ ^\circ\text{C}$,将 $10\ \text{kW}$ 的三相交流负载接入系统并保持不变。设定 VSG 输出指令有功功率值为 $10\ \text{kW}$ 保持不变,仿真如图 12 所示。设定 PV 发电单元在 $t = 0.5\ \text{s}$ 、 $1\ \text{s}$ 、 $1.5\ \text{s}$ 时改变光照强度为 $1\ 200\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $600\ \text{W}/\text{m}^2$,PV 发电单元输出功率如图 13 所示,蓄电池输出功率如图 14 所示,超级电容输出功率如图 15 所示,直流母线电压值如图 16 所示。

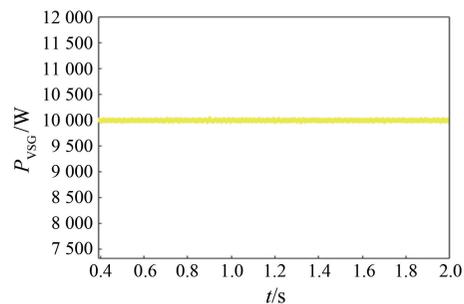


图 12 VSG 输出功率

Fig. 12 VSG output power

由图 13 可知,在初始 $0.5\ \text{s}$ 内,PV 发电单元保持 $16\ \text{kW}$ 的输出功率,在 $0.5\ \text{s}$ 、 $1\ \text{s}$ 、 $1.5\ \text{s}$ 时光照强度发生跳变,PV 发电单元在 $0.5\ \text{s}\sim 1\ \text{s}$ 内输出功率约为 $12\ \text{kW}$,在 $1\ \text{s}\sim 1.5\ \text{s}$ 内 PV 发电单元输出功率约为 $10\ \text{kW}$,在 $1.5\ \text{s}\sim 2\ \text{s}$ 内 PV 发电单元输出功率约为 $6\ \text{kW}$ 。由图 14 可知,蓄电池输出功率值为负时表示蓄电池吸收能量,对应图 13 中的光照强度分别在 $0.5\ \text{s}$ 、 $1\ \text{s}$ 、 $1.5\ \text{s}$ 时发生突变。在 $0.5\ \text{s}\sim 1\ \text{s}$ 内光伏输出功率小于 VSG 输出功率指令值,即 $P_{pv} < P_{VSG}$,蓄电池吸收功率值大约为

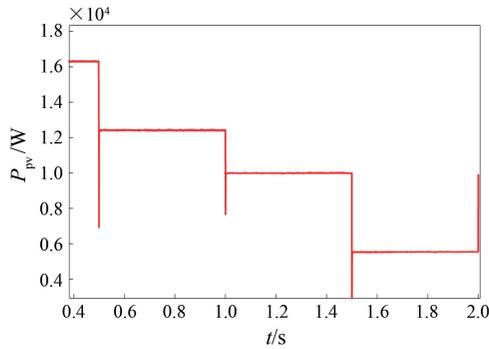


图 13 光伏输出功率

Fig. 13 Photovoltaic output power

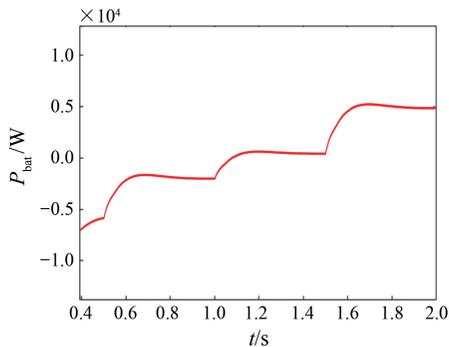


图 14 蓄电池输出功率

Fig. 14 Battery output power

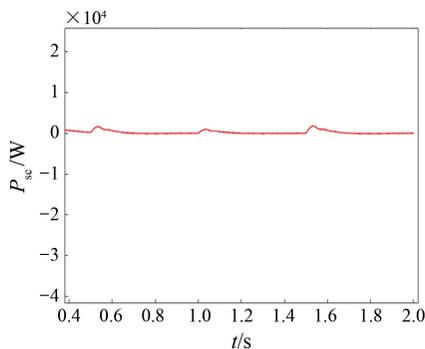


图 15 超级电容输出功率

Fig. 15 Supercapacitor output power

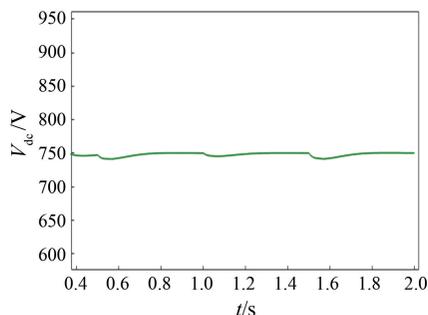


图 16 直流母线电压

Fig. 16 DC bus voltage

2 kW;在 1.5 s~2 s,此时间段 $P_{pv} = P_{VSG}$,系统处于一个平衡状态,此时储能单元维持平衡;在 1.5 s~2 s,此时间段 $P_{pv} < P_{VSG}$,蓄电池输出功率值大约为 4 kW。由图 15 可知,超级电容可以有效应对图 13 中光伏输出功率发生突变时高频分量的变化,蓄电池缓慢应对,可有效增加蓄电池使用寿命,并进一步验证储能单元分频控制的有效性。根据系统内部各单元输出吸收功率值可进一步印证 $P_{pv} + P_{bat} + P_{sc} = P_{VSG}$,如图 16 所示,在光伏输出功率发生变化时直流母线电压稳定保持在 750 V 且有略微小幅,不影响系统稳定运行的波动。

4.3 负载跳变与有功给定值跳变情况下仿真

设定初始辐照度为 1 000 W/m²、初始环境温度 25 °C 并保持不变,设定光伏输出功率为 10 kW,并将 10 kW 的三相交流负载接入系统。在 0~1 s 内设定 VSG 输出功率指令值为 13 kW,1 s 时改变指令值为 15 kW,1.5 s 时加入 3 kW 负载。加入自适应控制前后 VSG 输出有功功率、直流母线电压值、蓄电池输出功率、超级电容输出功率和系统流入电网功率值分别如图 17~图 21 所示。

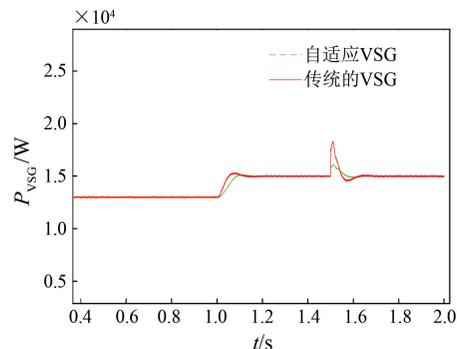


图 17 加入自适应控制前后 VSG 输出功率对比

Fig. 17 Comparison of VSG output power before and after adding adaptive control

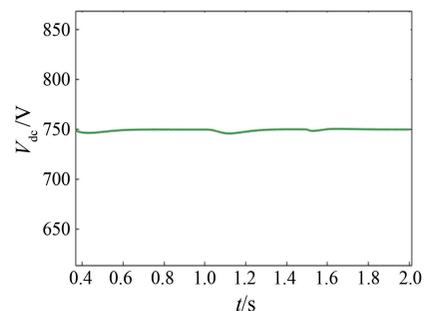


图 18 直流母线电压

Fig. 18 DC bus voltage

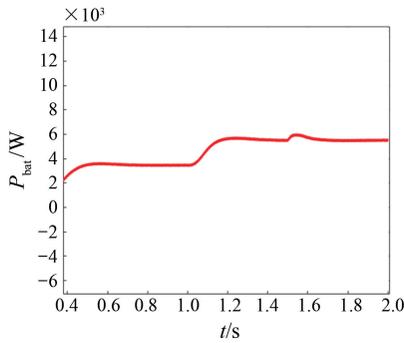


图 19 蓄电池输出功率

Fig. 19 Battery output power

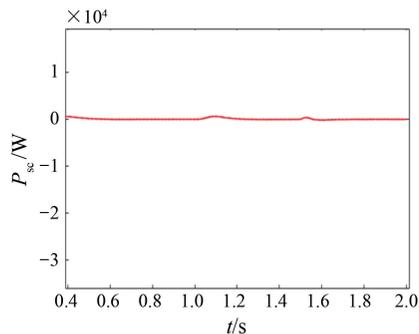


图 20 超级电容输出功率

Fig. 20 Supercapacitor output power

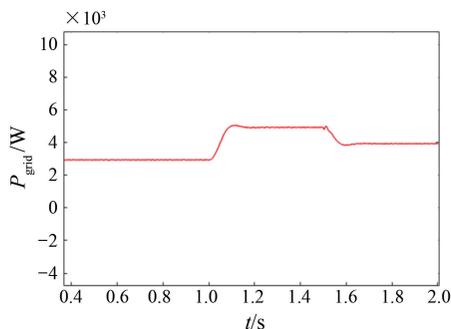


图 21 系统流入电网功率值

Fig. 21 Power flow from the system into the grid

由图 17 可知,在初始 1 s 内,VSG 输出功率为 13 kW、负载为 10 kW,在 1 s~2 s 内 VSG 输出功率指令值跳变至 15 kW,本文所提自适应 VSG 控制方法可以更快的达到指令值且超调量较小。由图 18 可知,外界条件发生变化时直流母线电压始终可以稳定在 750 V 且有略微小幅,不影响系统稳定运行的波动。由图 19 可知,蓄电池输出功率值在 1 s、1.5 s 时的变化分别对应图 17 中 1 s 时 VSG 输出指令值的变化、负载增加 1 kW 至 11 kW 的变化情况。由图 20 可知,超级电容可以有效应对系统功率发生突变时高频分量的变化。由图

21 可知,系统在 1 s、1.5 s 时发生的突变对应图 17 中的 VSG 输出功率指令值变化以及负载在 1.5 s 时增加所引起的电网功率值下降。超级电容与蓄电池结合可以发挥出各自优势,提升系统稳定性,本文所提控制策略可以有效应对系统各方面参数的突变情况。

5 结语

本文研究的基于自适应 VSG 控制策略的 PV 混合储能系统,针对新能源等并网单元的稳定性问题,以 PV 发电单元为例,设计蓄电池+超级电容的混合储能单元并制定合适的混合分频控制策略,分析转动惯量与阻尼系数对系统的影响,得到不同情况下二者的数值取用原则,制定自适应 VSG 控制策略并将其应用到混合储能系统中,最后通过不同工况下的仿真情况得到以下结论。

(1) 所提改进自适应 VSG 控制策略不仅考虑转动惯量变化,同时考虑阻尼系数的变化,可以同时抑制频率偏差率和变化量。

(2) 考虑蓄电池与超级电容各自特性,制定的混合储能单元分频控制策略可以充分发挥超级电容与蓄电池各自优势使系统处于一个稳定状态,并延长蓄电池使用寿命。

(3) 所提改进自适应 VSG 控制策略能够进一步改善频率响应特性和输出有功响应特性,使系统达到一个更平稳运行的状态。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

作者贡献

韩鸿霖进行了方案设计、仿真分析与论文撰写,王星璐进行了搜集资料,林存浩参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, simulation analysis and thesis writing were carried out by Han Honglin. The data were collected by Wang Xinglu. The thesis was reviewed and revised by Lin Cunhao. All authors have read the final version and consented for

submission.

参考文献

- [1] 李叶茂, 李雨桐, 郝斌, 等. 低碳发展背景下的建筑“光储直柔”配用电系统关键技术分析[J]. 供用电, 2021, 38(1): 32-38.
- LI Y M, LI Y T, HAO B, et al. Key technologies of building power supply and distribution system towards carbon neutral development [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(1): 32-38.
- [2] 王立棋, 杨庆, 王静, 等. 基于区块链下光伏微电网交易市场中的应用分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(12): 75-82.
- WANG L Q, YANG Q, WANG J, et al. Application analysis of photovoltaic micro-grid transaction marketization based on the block chain [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(12): 75-82.
- [3] WANG T, LIN C H, ZHENG K, et al. Research on grid-connected control strategy of photovoltaic (PV) energy storage based on constant power operation [J]. Energies, 2023, 16(24): 8056.
- [4] 孙思男, 郝正航. 基于自适应 VSG 控制的光伏并网系统[J]. 电子科技, 2022, 35(9): 22-29.
- SUN S N, HAO Z H. Photovoltaic grid-connected system based on adaptive VSG control [J]. Electronic Science and Technology, 2022, 35(9): 22-29.
- [5] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-349.
- ZHONG Q C. Virtual synchronous machines and autonomous power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-349.
- [6] 程子霞, 于洋, 柴旭峥. 基于协同自适应控制的光储 VSG 运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 79-85.
- CHENG Z X, YU Y, CHAI X Z. Research on operation control of a photovoltaic system with storage VSG based on cooperative adaptive control [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 79-85.
- [7] 党克, 田勇. 不平衡电压下利用降阶谐振控制器的新型 VSG 控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(8): 63-67+86.
- DANG K, TIAN Y. VSG control strategy under unbalanced voltage improved by reduced order resonant controller [J]. Electric Machines & Control Applications, 2020, 47(8): 63-67+86.
- [8] 范广胜, 朱琳, 封洋焱, 等. 交直流混合微电网并联接口变换器的 VSG 控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 68-74+80.
- FAN G S, ZHU L, FENG Y Y, et al. VSG control strategy of AC/DC hybrid microgrid parallel interfacing converter [J]. Electric Machines & Control Applications, 2021, 48(3): 68-74+80.
- [9] 朱作滨, 张常友, 曾小斌. 基于自适应旋转惯量 VSG 控制策略光储微网系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 67-72.
- ZHU Z B, ZHANG C Y, ZENG X B. Photovoltaic energy storage microgrid system based on adaptive rotating inertia VSG control strategy [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 67-72.
- [10] 余威, 杨欢红, 焦伟, 等. 基于优劣解距离算法的光储配电网自适应虚拟惯性控制策略[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(10): 1317-1324.
- YU W, YANG H H, JIAO W, et al. Adaptive virtual inertial control strategy of optical storage and distribution network based on TOPSIS algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(10): 1317-1324.
- [11] 乔春雨, 易建波, 谷宇杰, 等. 基于虚拟同步机技术的光储协控无功优化策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 129-136.
- QIAO C Y, YI J B, GU Y J, et al. Reactive power optimization strategy of photovoltaic and energy storage control based on virtual synchronous generator [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 129-136.
- [12] 党克, 田勇. 基于电网电压前馈的 VSG 平衡电流控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 35-40.
- DANG K, TIAN Y. VSG balanced current control strategy based on grid voltage feedforward [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(1): 35-40.
- [13] LIU J, MIURA Y, ISE T, et al. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [14] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T, et al. Power system

- stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(2): 451-458.
- [15] 霍现旭, 李秉昀, 陈培育, 等. 双馈风电机组的自适应神经网络保性能虚拟同步机控制[J]. *信息与控制*, 2019, 48(5): 612-618+626.
HUO X X, LI B Y, CHEN P Y, et al. Adaptive neural performance-guaranteed VSG control for DFIG-based wind power generators [J]. *Information and Control*, 2019, 48(5): 612-618+626.
- [16] 岳家辉, 张新燕, 周鹏, 等. 基于自适应惯量阻尼的双馈风电机组虚拟同步控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(9): 40-48.
YUE J H, ZHANG X Y, ZHOU P, et al. Virtual synchronization control strategy for double-fed wind turbines based on adaptive inertia damping [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(9): 40-48.
- [17] 咸瑞雪, 韩子娇, 董雁楠, 等. 电压单相跌落下 VSG 输出平衡电流控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(10): 39-45.
XIAN R X, HAN Z J, DONG Y N, et al. Virtual synchronous generator output balance current control strategy under single-phase voltage drop [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(10): 39-45.
- [18] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(11): 72-77.
LI D D, ZHU Q W, CHENG Y Z, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(11): 72-77.
- [19] 温春雪, 杨春来, 陈丹, 等. 虚拟同步储能变换器的功率环双模式控制[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(8): 56-61.
WEN C X, YANG C L, CHEN D, et al. Power loop based dual mode control of virtual synchronous energy storage converter [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(8): 56-61.
- [20] 宋琼, 张辉, 孙凯, 等. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 412-424.
SONG Q, ZHANG H, SUN K, et al. Improved adaptive control of inertia for virtual synchronous generators in islanding micro-grid with multiple distributed generation units [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 412-424.
- [21] 王淋, 巨云涛, 吴文传, 等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(13): 4479-4490.
WANG L, JU Y T, WU W C, et al. Optimal design of inertia and damping parameters of virtual synchronous microgrid for improving frequency stability [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(13): 4479-4490.
- [22] 吴舟, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 计及储能动态的 VSG 惯量阻尼自适应控制研究[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(12): 83-91.
WU Z, ZOU X S, YUAN X F, et al. Research on VSG rotational inertia and damping adaptive control considering energy storage dynamics [J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(12): 83-91.
- [23] 李明焯, 王跃, 徐宁一, 等. 基于带通阻尼功率反馈的虚拟同步发电机控制策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(10): 2176-2185.
LI M X, WANG Y, XU N Y, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on bandpass damping power feedback [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(10): 2176-2185.
- [24] 陈景文, 周媛, 李晓飞, 等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. *智慧电力*, 2022, 50(1): 14-20+87.
CHEN J W, ZHOU Y, LI X F, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid [J]. *Smart Power*, 2022, 50(1): 14-20+87.
- [25] 成杰, 唐小亮, 梁安江, 等. 局部阴影下光伏阵列 MPPT 算法的研究[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(4): 104-109.
CHENG J, TANG X L, LIANG A J, et al. Research on MPPT algorithm of PV array in partial shadow [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(4): 104-109.
- [26] 赵永熹, 于江容. 基于改进虚拟同步机的光伏混合储能协调控制策略[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(8): 219-222+218.
ZHAO Y X, YU J R. Electromagnetic characteristics and electrodynamic analysis of dry-type transformer winding interturn short circuit fault [J]. *Journal of*

- Hydropower Energy Science, 2023, 41(8): 219-222+218.
- [27] 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.
- [28] 周昕怡, 成庶, 伍珣, 等. 一种基于 VSG 控制的光伏电站对多机系统的低频振荡自适应控制策略[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(8): 2920-2931.
- ZHOU X Y, CHENG S, WU X, et al. An adaptive low frequency oscillation control strategy of VSG-based photovoltaic power plants to multi-machine power systems [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 2920-2931.
- [29] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
- YANG Y, MEI F, ZHANG C Y, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [30] 杨萍, 陈卓, 罗婷, 等. 基于 VSG 的光伏发电与混合储能的控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 83-91+113.
- YANG P, CHEN Z, LUO T, et al. A control method of photovoltaic power generation and hybrid energy Storage based on VSG [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 83-91+113.
- [31] 杨旭红, 金宏艳, 刘众鑫, 等. 光储逆变器的虚拟同步机自适应控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 181-189.
- YANG X H, JIN H Y, LIU Z X, et al. Research on adaptive control strategy of virtual synchronous machine applied for the photovoltaic and energy storage inverter [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 181-189.
- [32] 张志成. 基于虚拟同步发电机技术的微网控制研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- ZHANG Z C. Research on microgrid control based on virtual synchronous generator technology [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.

收稿日期:2024-11-02

收到修改稿日期:2024-11-19

作者简介:

韩鸿霖(2000-),男,硕士研究生,研究方向为光伏储能及其关键技术,17340914601@163.com;

* 通信作者:韩鸿霖(2000-),男,硕士研究生,研究方向为光伏储能及其关键技术,17340914601@163.com。