

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230437

面向多运行模式的并网逆变器改进控制策略

陈宇, 王维庆, 李笑竹, 朱金龙

(可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 为了改善新能源并网逆变器的性能并同时满足多运行模式(并网模式和孤岛模式)调节需求, 设计了双重自适应系数, 并基于下垂控制和虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制提出了新颖的改进控制策略。该控制策略可灵活地调节惯量和阻尼以满足不同运行模式的需求。设计的双重自适应系数包括自适应协调系数和自适应惯量系数, 前者可提高系统动态特性并增强适用性, 后者可进一步改善功率超调和振荡问题以完全消除功率超调。所提出的改进控制策略的功率响应无超调和振荡, 能够提供接近于VSG控制的惯量和阻尼特性且具有更快的响应速度, 可同时满足并网模式下的功率调节需求和孤岛模式下的频率调节需求, 具有更大的适用性和更优异的动态特性。最后, 通过硬件在环实验验证了所提出的改进控制策略的有效性和可行性。

关键词: 改进控制; 并网逆变器; 双重自适应; 下垂控制; 虚拟同步发电机控制

Improved control strategy for a grid-connected inverter for multiple operational modes

CHEN Yu, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, ZHU Jinlong

(Engineering Research Center of Ministry of Education for Renewable Energy Generation and Grid Connection Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: To improve the performance and meet the regulation demands of multiple operation modes (grid-connected mode and stand-alone mode) simultaneously for the grid-connected inverter, a novel improved control strategy based on droop control and virtual synchronous generator (VSG) control combined with double adaptive coefficients is proposed. It can flexibly adjust the inertia and damping to meet the regulation requirements of different modes. The designed double adaptive coefficients include adaptive coordination coefficients and adaptive inertia coefficients. The former can improve the system dynamic characteristics and enhance the applicability. The latter can further improve the power overshoot and oscillation problems to completely eliminate power overshoot. The power response of the proposed improved control strategy is no overshoot and oscillation, and it can provide inertia and damping characteristics close to the VSG control and has a faster response speed. It can satisfy the power regulation demands in grid-connected mode and the frequency regulation demands in stand-alone mode simultaneously, and has greater applicability and better dynamic characteristics. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed improved control strategy are demonstrated by control hardware-in-loop (CHIL) experiments.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52067020 and No. 52267005).

Key words: improved control; grid-connected inverter; double adaptive; droop control; virtual synchronous generator control

0 引言

随着全球环境问题的突出以及我国“双碳”目标的提出, 新能源技术在全球范围内迅猛发展, 我国

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52067020, 52267005); 新疆维吾尔自治区科技厅重大科技专项资助(2022A01004)

电力系统也逐渐转变为“双高”新型电力系统^[1]。与传统同步发电机不同, 新能源及储能系统^[2]主要通过高度可控且灵活高效的电力电子变换器连接到负载或公共电网。目前使用的新能源及储能并网变换器主要采用具有电压支撑和主动惯量支持等特性的构网型控制策略^[3], 可代替同步机实现电网支撑, 维持电力系统稳定^[4]。当前主流的构网型控制有下垂控制^[5-8]和虚拟同步发电机(virtual synchronous

generator, VSG)控制^[9-12]。然而,不管是下垂控制还是 VSG 控制均在适用性和动态性能方面存在一定缺陷^[13]。在孤岛模式^[14]下,控制策略的主要任务是形成微电网电压和频率^[13],但下垂控制基本不提供惯量^[9],难以保证在该模式下的系统频率稳定性。在并网模式^[15]下,注入由参考值指定的有功功率成为主要任务^[13]。虽然 VSG 控制可以提供惯量^[16],在孤岛模式下具有较好的频率响应特性,但在并网模式下难以使输出功率快速跟随参考量的变化且存在功率超调和振荡^[17],难以较好地完成该模式下的主要任务。

为了解决上述问题,一些学者从解决下垂控制无惯量问题出发进行相关研究。文献[9]在传统下垂控制中加入了自适应时间常数的惯性环节,可为系统提供惯量,但是功率响应的快速性有所下降且出现了超调和振荡。文献[18]对传统下垂控制进行了多级超前滞后补偿,具备了提供惯量和阻尼的能力,但频率响应的快速性有所下降。一些学者旨在解决 VSG 控制的功率振荡和功率跟随性能差的问题。文献[19]在 VSG 控制中使用交替惯量的方案来解决功率振荡问题,但导致功率响应的快速性有所降低。文献[13]提出了一种广义控制,增大了系统惯量并在一定程度上降低了功率超调,但仍存在较大的功率超调和振荡问题。此外,文献[20]通过权重因子综合控制下垂控制和虚拟惯性控制灵活出力,提高了系统的频率响应特性,但没有考虑功率响应特性。

上述文献提出的改进策略均不能很好地同时满足并网模式和孤岛模式下的不同性能需求。为了解决上述问题,本文提出了一种新颖的改进控制策略。本文的主要贡献归纳如下。

- 1) 提出自适应协调系数,并基于此构造了新型控制器。该控制器可灵活地调节惯量和阻尼以满足不同运行模式的不同性能需求。
- 2) 基于新型控制器,提出并采用新颖的自适应惯量系数,进一步改善功率超调,实现功率超调的完全消除。
- 3) 所提出的改进控制策略可同时满足多运行模式的不同性能需求。在孤岛模式能提供接近于 VSG 的惯量和阻尼特性,具有与 VSG 基本相同且满足条件的初始频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)并具有更快的响应速度;在并网模式无功功率超调、振荡且调节时间优于下垂控制和 VSG 控制。

1 下垂控制和 VSG 控制简要分析

图 1 展示了本文所研究对象的系统主电路及控制框图。主电路由直流侧储能、三相全桥逆变器、

LC 滤波器(L_f 和 C_f)、线路阻抗(Z_{line})、负载(Z_{load})以及交流电网组成^[21]。其中, R_f 是滤波电感的内阻, S_{GC} 是并离网开关。此外,假定直流侧输出电压(V_b)为常数。控制结构由坐标变换、功率计算、控制策略以及电压电流双闭环控制^[22]构成。其中,逆变器的参考相位 θ_{ref} 以及参考电压幅值 u_{ref} 由控制策略产生。控制策略为本文研究核心,下垂控制及 VSG 控制的主要区别也体现在该部分。此外, i_{Ld} 、 i_{Lq} 和 v_{Cd} 、 v_{Cq} 分别是逆变器输出电流和输出电压在同步参考坐标系下经过坐标变换^[23]生成的 d 轴和 q 轴分量。本文主要研究控制策略中的有功功率控制部分且无功功率控制环节均采用传统下垂控制并假定系统有功功率和无功功率已实现完全解耦^[9]。

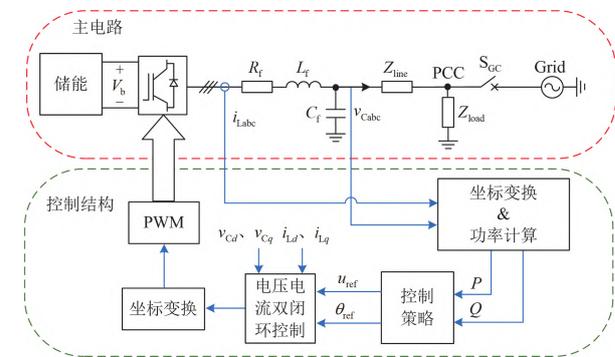


图 1 系统主电路及控制框图

Fig. 1 Main circuit and the control block diagram

当系统处于不同模式时,对逆变器控制策略的要求也有所不同。并网模式时要求系统功率输出可以快速地跟随参考值的变化,且需要具有尽量好的动态性能(尽量小的超调且无振荡)^[13]。孤岛模式时需要关注负载发生波动时的频率支撑能力(提供惯量的能力)^[9]且需要具有尽量短的调节时间,前者可由初始 RoCoF 表征^[24]。然而,传统下垂控制和 VSG 控制均难以同时满足上述需求^[25]。

下面将通过系统的小信号模型^[21],对两种控制方式在并网模式下的功率跟踪性能以及在孤岛模式下的频率响应特性进行简要分析。结合下垂控制和 VSG 控制的有功功率控制环节^[21]及简化功率方程^[13]可得到平衡点附近的两种控制的简化小信号模型^[21],如图 2 所示。

图 2 中: k_p 为有功下垂系数; J 和 D 分别为惯量系数和阻尼系数; ΔP_{ref} 、 $\Delta\omega$ 、 $\Delta\delta$ 、 ΔP 分别为系统有功功率参考值、逆变器输出电压角频率、输出电压相位、实际有功功率的小信号变化量; V_0 和 V_g 分别是逆变器输出电压和公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压幅值; ω_0 为系统角频率

的稳态值; X 为线路阻抗的具体值, 在此假定其为纯感性线路; $\Delta\omega_g$ 为电网的频率波动, 可假定为 $0^{[13]}$ 。

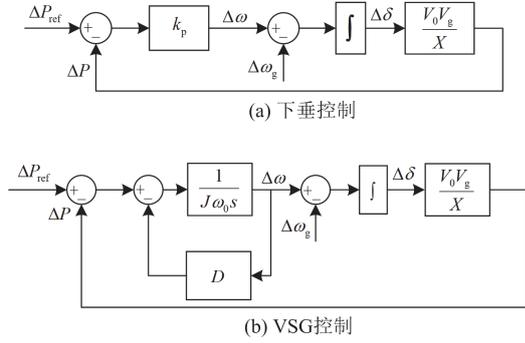


图2 有功功率控制环节简化小信号模型

Fig. 2 Simplified small-signal model for active power control loop

当系统处于孤岛模式并忽略线损时, 可近似将系统输出有功功率 P 与负载有功功率 P_{load} 等同^[13]。根据图2以及上述等效, 可以分别得到下垂控制和VSG控制在并网模式下从 ΔP_{ref} 到 ΔP 以及在孤岛模式下从 ΔP_{load} 到 $\Delta\omega$ 的小信号传递函数, 如式(1)一式(4)所示。用于理论计算的下垂控制和VSG控制的相关参数设定如表1所示^[13]。根据式(1)一式(4)得到的两种模式下对应的有功功率和频率单位阶跃响应曲线分别如图3、图4所示。

$$H_{\Delta P / \Delta P_{ref}}^{droop} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} = \frac{k_p \cdot V_0 \cdot V_g}{X \cdot s + k_p \cdot V_0 \cdot V_g} \quad (1)$$

$$H_{\Delta P / \Delta P_{ref}}^{vsg} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} = \frac{V_0 \cdot V_g}{J \cdot \omega_0 \cdot X \cdot s^2 + D \cdot X \cdot s + V_0 \cdot V_g} \quad (2)$$

$$H_{\Delta\omega / \Delta P_{load}}^{droop} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P_{load}} = -k_p \quad (3)$$

$$H_{\Delta\omega / \Delta P_{load}}^{vsg} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P_{load}} = -\frac{1}{J \cdot \omega_0 \cdot s + D} \quad (4)$$

表1 下垂控制和VSG控制的相关参数

Table 1 Parameters of droop control and VSG control

参数	值
逆变器输出电压幅值 V_0/V	311
PCC 电压幅值 V_g/V	311
有功功率参考的小信号变化量 $\Delta P_{ref}/kW$	10
负载有功功率的小信号变化量 $\Delta P_{load}/kW$	10
系统角频率稳态值 $\omega_0/(rad/s)$	314
线路阻抗 X/Ω	1.256
有功下垂系数 k_p	0.0001
惯量系数 $J/(kg \cdot m^2)$	32
阻尼系数 D	10 000

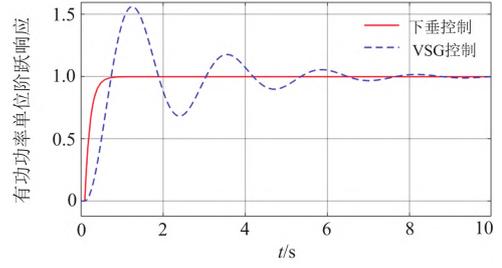


图3 下垂控制和VSG控制在并网模式下的有功功率单位阶跃响应

Fig. 3 Unit step response of active power for droop control and VSG control in the grid-connected mode

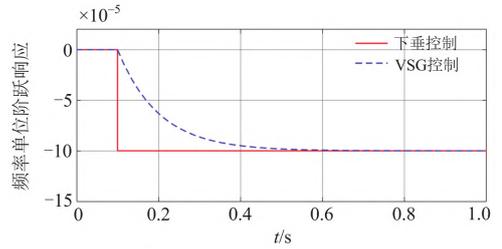


图4 下垂控制和VSG控制在孤岛模式下的频率单位阶跃响应

Fig. 4 Unit step response of frequency for droop control and VSG control in the stand-alone mode

由图3可以看出, 下垂控制在并网模式有较好的功率动态性能, 但VSG控制功率动态性能较差(存在大超调和振荡)且调节时间长。由图4可以看出, 孤岛模式下, 当负荷波动导致频率下降时, VSG控制可以提供足够的虚拟惯量和阻尼特性, 保证系统初始RoCoF满足条件, 但响应速度较慢。然而, 下垂控制的初始RoCoF接近无穷大, 可见其几乎不能提供惯量支撑, 无法满足系统频率稳定性需求。综上所述, 传统下垂控制和VSG控制均不能同时满足并网模式和孤岛模式下不同动态特性的需求。

2 改进控制策略

为了使储能并网逆变器同时适用于多运行模式并具有优异的动态特性, 本文结合自适应协调系数并基于下垂控制和VSG控制构建了新型控制器, 并采用自适应惯量系数, 提出了一种用于储能及新能源并网的构网型改进控制策略, 对应功率控制环节的简化小信号模型^[21], 如图6所示。

2.1 控制器 $H_{control}$ 的设计

改进控制策略需要在并网模式时具有较好的功率跟踪能力, 同时在孤岛模式具有足量的惯量和阻

尼特性。为了实现上述目标,考虑引入自适应^[26]协调系数 G_c 将下垂控制器和 VSG 控制器结合,构建新型改进控制器。对应控制结构如图 7 所示。

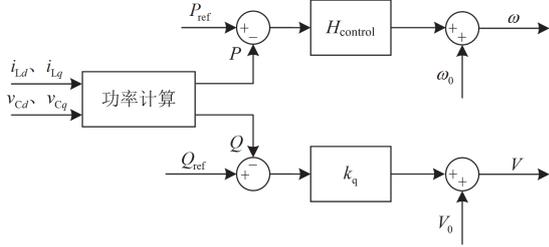


图 5 改进控制的功率控制环节

Fig. 5 Power control loop of improved control

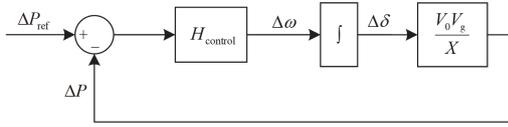


图 6 改进控制的有功功率控制环节的简化小信号模型

Fig. 6 Simplified small-signal model for active power control loop of improved control

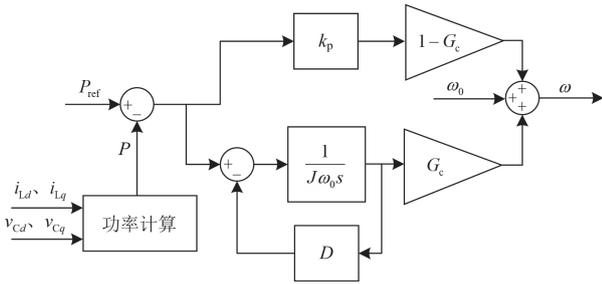


图 7 结合下垂控制器和 VSG 控制器的控制结构

Fig. 7 Control structure combining droop controller and VSG controller

根据式(3)、式(4)并按照终值定理可以得到下垂控制和 VSG 控制的频率阶跃响应稳态值^[27]分别为 $-k_p \cdot \Delta P_{load}$ 和 $-(1/D) \cdot \Delta P_{load}$ 。为了防止两种控制器在频率响应时因稳态值不同导致冲突,设定 $D = 1/k_p$, 并结合图 7 可以得到

$$\omega = \omega_0 - \left(k_p \cdot \frac{(1-G_c) \cdot s + \frac{1}{J \cdot k_p \cdot \omega_0}}{s + \frac{1}{J \cdot k_p \cdot \omega_0}} \right) \cdot (P - P_{ref}) \quad (5)$$

此外,应在 $H_{control}$ 中增加另一个负极点,以确保负荷变化时角频率的平稳变化并减小高频增益,提高控制性能^[13]。综上所述,可设计控制器 $H_{control}$ 为

$$H_{control} = k_p \cdot \frac{(1-G_c) \cdot s + \frac{1}{J \cdot k_p \cdot \omega_0}}{\left(s + \frac{1}{J \cdot k_p \cdot \omega_0} \right) (T \cdot s + 1)} \quad (6)$$

2.2 自适应协调系数的设计

下面将结合系统的频率响应过程,对自适应协调系数 G_c 进行设计。系统频率响应示意图^[28]如图 8 所示,该过程包括惯性响应和一次调频^[29]过程。图中 A 点为频率最低点。

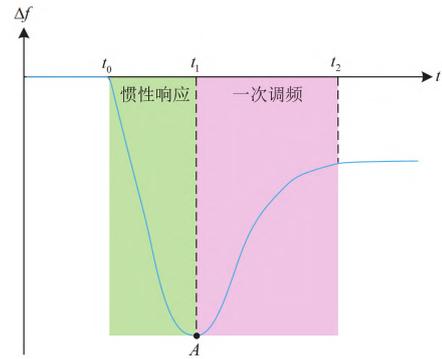


图 8 系统频率响应示意图

Fig. 8 Frequency response diagram of the system

本文提出的改进控制策略主要作用于 t_0-t_2 阶段。在 t_0-t_1 阶段, RoCoF 的绝对值由最大值逐渐减至 0^[18], 为了提高系统的稳定性,控制策略应在该阶段使系统具有充足惯量,使得系统频率响应具有较小的初始 RoCoF; 在 t_1-t_2 阶段,系统频率进入恢复状态并最终达到稳定,应在该阶段使系统频率能够尽快恢复到稳定状态,缩短调节时间。系统具有越快的频率恢复能力,系统的功率跟踪能力也越强。

为了满足以上要求,可在 RoCoF 的绝对值较大时,以 VSG 控制器为主,即增大 G_c , 提供较大的惯量支撑,有效降低 RoCoF, 保证系统稳定性; 当 RoCoF 的绝对值逐渐降低时,逐步减小 G_c , 增加下垂控制器的影响,加快系统响应速度,使系统具有较快的频率恢复能力和较好的功率跟踪能力。考虑自适应协调系数的约束条件为

$$0 \leq G_c \leq 1 \quad (7)$$

因此,使用双曲正切函数(tanh)作为自适应协调系数的主体,基于该函数可使 G_c 根据 RoCoF 的绝对值灵活快速地调节以满足上述要求且保证了 G_c 的连续性。结合以上因素,可将 G_c 设计为

$$G_c = \tanh \left(n \cdot \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \right) \quad (8)$$

式中, n 为协调因子,可用于调节 G_c 的大小。

2.3 自适应惯量系数的设计

为了配合 G_c 进一步提高控制器性能,完全消除功率超调问题并缩短调节时间,本文提出新颖的自适应惯量控制策略。

对于传统的 VSG 控制,并网模式下从 ΔP_{ref} 到 ΔP 的小信号传递函数如式(2)所示。该式为二阶传递函数,可令

$$H_{\Delta P/\Delta P_{\text{ref}}}^{\text{VSG}} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{ref}}} = \frac{V_0 \cdot V_g}{J \cdot \omega_0 \cdot X \cdot s^2 + D \cdot X \cdot s + V_0 \cdot V_g} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (9)$$

式中: ω_n 为自然频率; ξ 为阻尼比。

由式(9)可以得到

$$\begin{cases} \frac{V_0 \cdot V_g}{(J \cdot \omega_0 \cdot X)} = \omega_n^2 \\ \frac{D}{(J \cdot \omega_0)} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} J = \frac{V_0 \cdot V_g}{\omega_n^2 \cdot \omega_0 \cdot X} \\ D = \frac{2 \cdot \xi \cdot V_0 \cdot V_g}{\omega_n \cdot X} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可见, J 和 D 的变化均可视为 ω_n 和 ξ 的变化。阻尼系数 D 将决定系统的频率稳态值且在本文中已令 $D = 1/k_p$, 因此设定 D 为常数。据此,可由式(10)得到

$$\begin{cases} J = \frac{X \cdot D^2}{4 \cdot \omega_0 \cdot V_0 \cdot V_g} \cdot \frac{1}{\xi^2} \\ \omega_n = \frac{2 \cdot V_0 \cdot V_g}{D \cdot X} \cdot \xi \end{cases} \quad (11)$$

图9展示了传统 VSG 控制在不同 ξ 下的有功功率单位阶跃响应特性,其余相关参数值可见表1。由图9可知, ξ 较小时,系统具有较大的惯量,但也导致大超调和更长的调节时间。当 ξ 接近1时,系统的超调极小甚至无超调,调节时间也较短,但此时的系统惯量较小。由上述分析可知,通过调整 ξ 的值,便可基于式(11)间接地改变惯量系数 J , 以期满足不同时刻的不同性能要求,进一步提高控制器的动态性能。

由图8可知,在 t_0-t_1 阶段,系统应具有较大的虚拟惯量以应对突然的频率变化;在 t_1-t_2 阶段,应具有较小的虚拟惯量使系统较快地恢复至稳定状态。因此,可设定较小的初始阻尼比 ξ_0 , 使系统具有足够的惯量以面对突然的频率变化。当系统频率处于恢复状态时,可使阻尼比增大以配合 G_c 在最大程度上加快频率恢复速度并降低功率超调和振荡。

综上所述,可将阻尼比 ξ 和自适应惯量系数 J 分别设计为

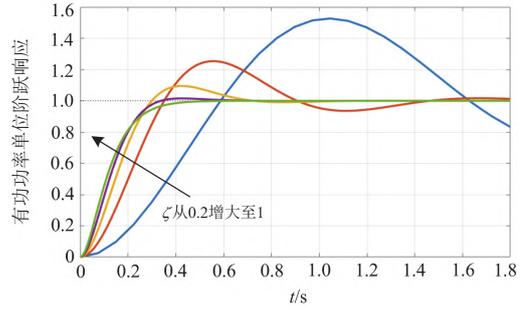


图9 传统 VSG 控制在不同 ξ 下的有功功率单位阶跃响应特性

Fig. 9 Unit step response characteristics of active power for traditional VSG control with ξ variation

$$\xi = \begin{cases} \xi_0 + 0.8 \cdot \tanh(0.9 \cdot \Delta t), & \Delta \omega \cdot (d\omega/dt) < 0 \cap |d\omega/dt| > M_j \\ \xi_0, & \Delta \omega \cdot (d\omega/dt) \geq 0 \cup |d\omega/dt| \leq M_j \end{cases} \quad (12)$$

$$J = \frac{X \cdot D^2}{4 \cdot \omega_0 \cdot V_0 \cdot V_g} \cdot \frac{1}{\xi^2} \quad (13)$$

式中: M_j 为角频率变化率阈值; Δt 为运行时间与角频率变化率超过阈值时间之差。

2.4 改进控制的参数设计

下面将对改进控制器 H_{control} 中的下垂系数 k_p 、初始阻尼比 ξ_0 、时间常数 T 以及协调因子 n 进行设计。

根据图6和式(6),可以得到改进下垂控制从 ΔP_{ref} 到 ΔP 以及 ΔP_{load} 到 $\Delta \omega$ 的小信号传递函数分别为

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{ref}}} = \frac{H_{\text{control}} \cdot V_0 \cdot V_g}{X \cdot s + H_{\text{control}} \cdot V_0 \cdot V_g} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta P_{\text{load}}} = -H_{\text{control}} \quad (15)$$

除设计参数外的参数设定值可见表1。将对应参数值代入式(14)、式(15),可得式(16)、式(17)。

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{ref}}} = \frac{K \cdot \left(s + \frac{1}{314 \cdot k_p (1 - G_c)} \cdot J \right)}{s^3 + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s + a_3} \\ a_1 = \frac{1}{314 \cdot J \cdot k_p} + \frac{1}{T} \\ a_2 = \frac{77007.16561 \cdot k_p (1 - G_c)}{T} + \frac{1}{314 \cdot J \cdot k_p \cdot T} \\ a_3 = \frac{245.2457503}{T \cdot J} \\ K = \frac{77007.16561 \cdot k_p (1 - G_c)}{T} \end{cases} \quad (16)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P'_{load}} = -k_p \cdot \frac{(1-G_c) \cdot s + \frac{1}{314 \cdot J \cdot k_p}}{\left(s + \frac{1}{314 \cdot J \cdot k_p}\right)(T \cdot s + 1)} \quad (17)$$

改进控制器中 T 所对应的惯性环节主要用于确保负荷波动时角频率的平稳变化并减小高频增益, 因此该惯性环节提供的极点 $p_2 (p_2 = -1/T)$ 相较于 $p_1 (p_1 = -1/(314 \cdot J \cdot k_p))$ 应更远离虚轴, 且应使得 p_1 为主导极点。

负载发生变化瞬间, RoCoF 的绝对值达到最大值, G_c 近似为 1 且 p_1 为主导极点, 此时改进控制器特性与传统 VSG 控制近似。因此, 根据式(4)以及终值定理可以近似得到此时系统在孤岛模式下的初始 RoCoF 为 $\Delta P'_{load} / (J_0 \cdot \omega_0)$ rad/s², 其中 $\Delta P'_{load}$ 为负载功率变化量, 设定其最大值为 20 kW。考虑系统初始角频率变化率绝对值应不大于 1 rad/s²[13]可得式(18), 并将式(11)代入式(18), 可得式(19)。

$$\Delta P'_{load} / (J_0 \cdot \omega_0) \leq 1 \quad (18)$$

$$\xi_0^2 \leq \frac{X \cdot D^2}{4 \cdot \Delta P'_{load, max} \cdot V_0 \cdot V_g} \quad (19)$$

图 10 展示了采用双重自适应系数时不同 ξ_0 下以及仅采用自适应协调系数固定阻尼比 $\xi = 0.2$ 下的有功功率阶跃响应曲线。由图 10 可知, $\xi_0 = 0.2$ 时, 功率曲线的初始变化最为缓和、无超调且最快地达到稳态状态。此外, 与仅采用自适应协调系数的固定阻尼比控制方式相比, 加入自适应惯量系数的双重自适应系数控制方式能够在保证惯量充足的同时, 完全消除系统功率超调并降低系统调节时间。

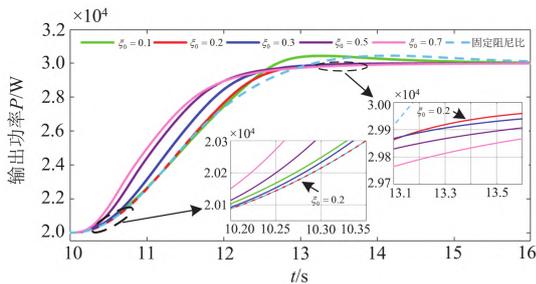


图 10 不同 ξ_0 下的有功功率阶跃响应曲线

Fig. 10 Active power step response curves for different ξ_0

此外, 系统的角频率稳态偏差为 $-k_p \cdot \Delta P'_{load}$ 。可见 k_p 越小, 系统所能承载的负荷波动越大。但 k_p 减小, 也会导致系统输出功率支撑、共享能力以及响应速度下降[13]。所以, k_p 应权衡稳定性和快速

性。实际应用中, 频率允许变化范围一般为 $\pm 2\%$ [4], 可得

$$k_p \leq \frac{0.02 \cdot \omega_0}{\Delta P'_{load, max}} \quad (20)$$

根据 $D = 1/k_p$ 以及式(19)、式(20), 选取满足系统初始 RoCoF 和频率偏差要求的 k_p 参数进行功率仿真, 不同 k_p 下的系统有功功率阶跃响应曲线如图 11 所示。

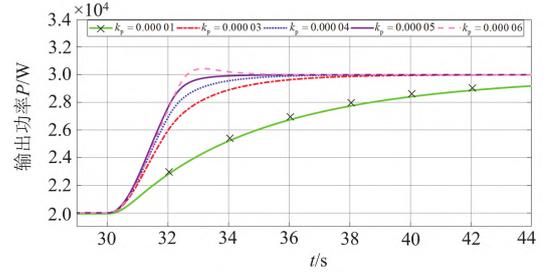


图 11 不同 k_p 下的系统有功功率阶跃响应曲线

Fig. 11 Active power step response curves for different k_p

观察图 11 可知, 当 k_p 较小时, 系统的功率响应调节时间显著增大; 当 k_p 较大时, 增大了系统的功率响应超调。因此, 根据图 11 所示的仿真结果, 选取具有较好综合性能的参数值 k_p 为 0.00005。

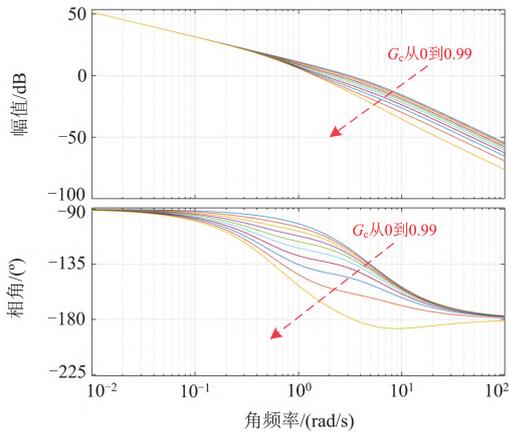
综合上述因素, 可设定 $T = 0.2$, $k_p = 0.00005$, $\xi_0 = 0.2$, 另外设定 $M_j = 0.01$ rad/s², $n = 4$ 。改进控制器所有参数总结如表 2 所示。

表 2 改进控制器的相关参数

Table 2 Parameters of improved controller

参数	值
逆变器输出电压幅值 V_0/V	311
PCC 电压幅值 V_g/V	311
系统角频率稳态值 $\omega_0/(\text{rad/s})$	314
线路阻抗 X/Ω	1.256
有功下垂系数 k_p	0.00005
初始阻尼比 ξ_0	0.2
角频率变化率阈值 $M_j/(\text{rad/s}^2)$	0.01
协调因子 n	4

基于上述参数、图 6 以及式(6)可以得到 G_c 变化下的系统伯德图, 如图 12 所示。由图 12 可知, 采用上述参数的系统开环传递函数的幅频特性曲线的相位裕度始终远大于 0° , 说明系统具有较好的稳定性。另外, 在高频段有较大的斜率, 说明所提出的控制器有较好的抗高频干扰的能力。

图 12 G_c 变化下的系统伯德图Fig.12 Bode diagram with variations of G_c

3 实验验证

为了进一步验证本文所提出的改进控制策略的有效性和可行性,本节将进行硬件在环实验^[30],并与传统下垂控制、VSG 控制以及文献[13]中所提出的广义下垂控制(generalized droop control, GDC)进行对比。系统主电路结构如图 1 所示,实验平台如图 13 所示,其中,三相并网逆变器、LC 滤波器、线路阻抗和电网由 OPAL-RT4510 仿真器模拟,控制器在 DSP-TMS320F28335 控制板上实现。设置采样频率为 10 kHz,运行步长为 5×10^{-5} s。



图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

本实验的主电路和控制器的相关参数可分别见表 3 和表 2。用于对比的传统下垂控制和 VSG 控制的控制结构可见图 2, GDC 的详细控制结构可见文献[13]。为了直观对比实验,设定传统下垂控制^[9]的下垂系数 $k_p = 0.000\ 05$ 、VSG 控制^[18]的阻尼系数

$D = 20\ 000$ 以及 GDC 中的增益 $K = 0.000\ 05$, 使得 4 种控制方式具有相同的稳态频率, GDC 中的其余参数^[13]均保持不变。为了实现改进控制策略和传统 VSG 控制的直观对比^[9,13],结合式(13)设定 VSG 控制的惯量系数 $J = 90\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$, 使得二者具有接近的初始 RoCoF。

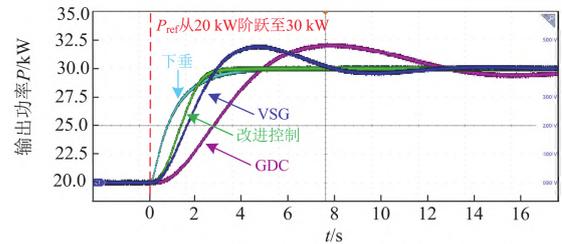
表 3 实验主电路的相关参数

Table 3 Parameters of main experiment circuit

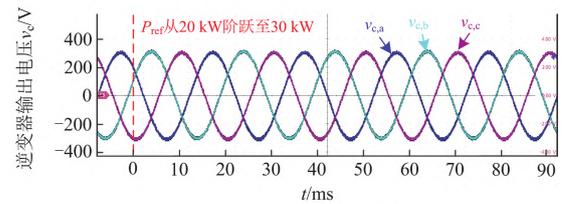
参数	值
滤波电感 L_f/mH	0.6
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	1500
滤波电感的内阻 R_f/Ω	0.01
有功功率参考 P_{ref}/kW	20
负载有功功率 $P_{\text{load}}/\text{kW}$	20
直流侧电压 V_d/V	800
系统额定频率 f/Hz	50

3.1 并网模式下的功率动态性能分析

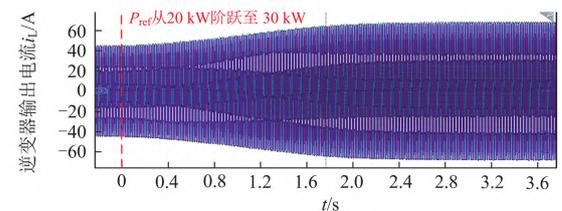
首先让系统处于并网模式,设定 P_{ref} 从 20 kW 阶跃至 30 kW。图 14(a)展示了此时的改进控制策略以及 GDC^[13]、下垂控制、VSG 控制的有功功率输出实验波形。



(a) 4种控制方式的有功功率输出实验波形



(b) 逆变器输出电压



(c) 逆变器输出电流

图 14 并网模式下的实验结果

Fig. 14 Experimental results in grid-connected mode

观察图 14(a)可知,本文提出的改进控制策略的输出功率无振荡和超调,而 VSG 控制和 GDC 分别存在 21.3%和 20.5%的功率超调且存在振荡。并且改进控制的调节时间仅为 2.5 s,远远优于 VSG 控制和 GDC,并且优于下垂控制的 5 s。基于改进控制的逆变器输出电压和电流分别如图 14(b)、图 14(c)所示。总结 4 种控制方式在并网模式下的功率动态性能如表 4 所示。

表 4 并网模式下不同控制策略的功率动态性能对比

Table 4 Power dynamic performance for different control strategies in grid-connected mode

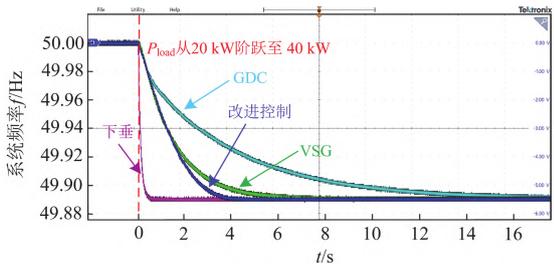
控制策略	超调	有无振荡	调节时间/s
下垂控制	无	无	5
VSG 控制	21.3%	有	13
GDC	20.5%	有	>17
改进控制	无	无	2.5

综上所述,所提出的改进控制策略能够快速跟随 P_{ref} 的变化且不存在功率超调和振荡现象,在并网模式下具有优异的功率响应特性。

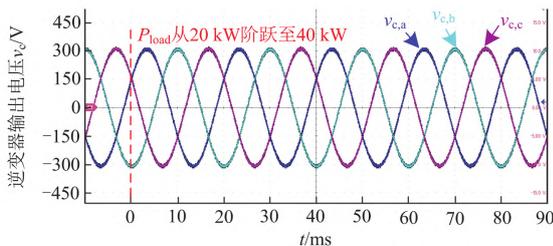
3.2 孤岛模式下的频率动态性能分析

下面将使系统运行在孤岛模式。设定 P_{load} 从 20 kW 阶跃至 40 kW。图 15(a)展示了此时的改进控制策略以及 GDC、下垂控制、VSG 控制的频率响应实验波形。

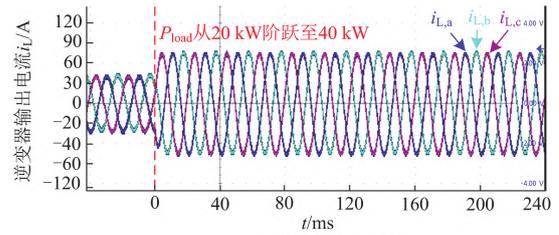
观察图 15(a)可知,下垂控制的初始 RoCoF 的绝对值为 5.404 rad/s^2 ,远大于 1 rad/s^2 ,无法满足系统频率的稳定要求。与下垂控制相比,改进控制的 0.308 rad/s^2 有了明显的降低且与 VSG 控制和 GDC 近似相等,说明其可为系统提供充足的惯量支撑。



(a) 4种控制方式的频率响应实验波形



(b) 逆变器输出电压



(c) 逆变器输出电流

图 15 孤岛模式下的实验结果

Fig. 15 Experimental results in stand-alone mode

此外,改进控制的调节时间仅为 4 s,远远小于 VSG 控制和 GDC。基于改进控制的逆变器输出电压和电流分别如图 15(b)、图 15(c)所示。总结 4 种控制方式在孤岛模式下的频率动态性能如表 5 所示。

表 5 孤岛模式下不同控制策略的频率动态性能对比

Table 5 Frequency dynamic performance for different control strategies in stand-alone mode

控制策略	初始 RoCoF 的绝对值/(rad/s^2)	虚拟惯量和阻尼特性	调节时间/s
下垂控制	5.404	小	0.5
VSG 控制	0.304	大	7
GDC	0.302	大	16
改进控制	0.308	大	4

综上所述,孤岛模式下,改进控制能够提供接近于 VSG 控制的惯量和阻尼特性且拥有更短的调节时间,具有优异的频率响应特性。

4 结论

本文设计了双重自适应系数并基于下垂控制和 VSG 控制提出了改进控制策略,相较于传统 VSG 和下垂控制具有更大的适用性和更优异的动态性能。

1) 改进控制策略弥补了传统控制策略的不足,可同时面向并网模式和孤岛模式,满足两种模式的不同性能需求,并在两种模式下均具有更为优异的动态性能和更大的适用性。

2) 并网模式下,改进控制功率响应无超调和振荡,而传统 VSG 控制存在振荡以及 21.3%的超调。此外,改进控制的调节时间仅为 2.5 s,优于 VSG 控制的 13 s 和下垂控制的 5 s。

3) 孤岛模式下,改进控制可以提供与 VSG 控制近似相同的惯量和阻尼特性,其初始 RoCoF 的绝对值仅为 0.308 rad/s^2 ,满足频率稳定性需求。此外,改进控制的调节时间仅为 4 s,与具有相同惯量的 VSG 控制的 7 s 相比有了明显改进。

参考文献

- [1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [2] 陈曦, 付文龙, 张海荣, 等. 考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J/OL]. 电网技术: 1-17[2023-06-11]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2541>.
CHEN Xi, FU Wenlong, ZHANG Hairong, et al. Optimal dispatching strategy of shared energy storage and multi-microgrid considering the uncertainty of new energy generation[J/OL]. Power System Technology: 1-17[2023-06-11]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2541>.
- [3] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [4] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
QU Zisen. Synchronizing stability analysis and control technology of voltage source converters in power system with high-penetration renewables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [5] 曾浩, 赵恩盛, 周思宇, 等. 基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 11-21.
ZENG Hao, ZHAO Ensheng, ZHOU Siyu, et al. Adaptive droop control of a DC microgrid based on current consistency[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 11-21.
- [6] 查雨欣, 林健, 张树龙, 等. 基于转子动能的直驱式风电系统RoCoF下垂控制策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(4): 21-26, 34.
ZHA Yuxin, LIN Jian, ZHANG Shulong, et al. RoCoF droop control strategy for direct-drive wind power system based on rotor kinetic energy[J]. Smart Power, 2022, 50(4): 21-26, 34.
- [7] 马临超, 齐山成, 刘毅. 分布式逆变器并联运行系统的简化控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(3): 129-138.
MA Linchao, QI Shancheng, LIU Yi. Simplified control strategy of parallel operation for distributed inverters system[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 129-138.
- [8] 曾蕊, 李保宏, 江琴, 等. 级联型混合直流输电系统的自适应下垂控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 60-66.
ZENG Rui, LI Baohong, JIANG Qin, et al. Adaptive droop control strategy of cascaded hybrid HVDC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 60-66.
- [9] JIA Y, XIAO J, JIA B, et al. Adaptive time constant control strategy for micro-grid based on improved droop control[C] // 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), July 13-15, 2020, Weihai, China.
- [10] 刘志坚, 骆军, 梁宁, 等. 虚拟同步控制对风电并网系统次同步振荡阻尼影响分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 135-142.
LIU Zhijian, LUO Jun, LIANG Ning, et al. Analysis of influence of virtual synchronous control on subsynchronous oscillation damping for grid-connected wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 135-142.
- [11] 高子轩, 赵晋斌, 杨旭红, 等. 基于RBF的VSG转动惯量和阻尼系数自适应控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 132-139.
GAO Zixuan, ZHAO Jinbin, YANG Xuhong, et al. RBF-based adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for VSG[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 132-139.
- [12] 李帅虎, 胡耀尹, 罗滇生, 等. 基于模型预测控制的光储发电系统VSG频率控制方法[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(4): 348-355.
LI Shuaihu, HU Yaoyin, LUO Diansheng, et al. VSG frequency control method of photovoltaic system with storage based on model predictive control[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 348-355.
- [13] MENG X, LIU J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [14] YAZDAVAR A H, EAJAL A A, AZZOUZ M A, et al. Harmonic analysis of droop-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2589-2600.
- [15] WESTMAN J, HADIDI R, FOX C, et al. Controller hardware-in-the-loop testing of an IEC 61850 GOOSE

- based control for seamless transition of a microgrid between island and grid-connected modes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 61-69.
- [16] KARIMI A, KHAYAT Y, NADERI M, et al. Inertia response improvement in AC microgrids: a fuzzy-based virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4321-4331.
- [17] CHEEMA K M. A comprehensive review of virtual synchronous generator[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120.
- [18] JIA Y, XIAO J, JIA B, et al. Improved droop control based on multi-stage lead-lag compensation[C] // IECON 2020 the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 18-21, 2020, Singapore, Singapore: 3224-3229.
- [19] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1462-1471.
- [20] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 63-72.
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Primary frequency regulation strategy with energy storage system based on weight factors and state of charge recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 63-72.
- [21] CHEN Y, WANG W. A novel improved droop control for grid-supporting inverter combined with the virtual synchronous generator control[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(3): 1601-1611.
- [22] 程静, 赵振民. 基于虚拟同步发电机的固态变压器交流端口柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 138-147.
CHENG Jing, ZHAO Zhenmin. Flexible control strategy for a solid-state transformer AC port based on a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 138-147.
- [23] 谈竹奎, 文贤馥, 杨涛, 等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 181-187.
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 181-187.
- [24] RATHNAYAKE D B, RAZZAGHI R, BAHRANI B. Generalized virtual synchronous generator control design for renewable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1021-1036.
- [25] MOHAMMED N, RAVANJI M H, ZHOU W, et al. Online grid impedance estimation-based adaptive control of virtual synchronous generators considering strong and weak grid conditions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(1): 673-687.
- [26] WANG Z, YU Y, GAO W, et al. Adaptive, optimal, virtual synchronous generator control of three-phase grid-connected inverters under different grid conditions—an adaptive dynamic programming approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 7388-7399.
- [27] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30-44.
ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [28] TAN B, ZHAO J, NETTO M, et al. Power system inertia estimation: Review of methods and the impacts of converter-interfaced generations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134.
- [29] 崔森, 颜湘武, 王雅婷, 等. 考虑源-荷功率随机波动特性的双馈风力发电机一次频率平滑调节方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 143-154.
CUI Sen, YAN Xiangwu, WANG Yating, et al. A smooth adjustment method for primary frequency of doubly-fed wind generators considering random fluctuation characteristics of source-load power[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 143-154.
- [30] TAN Y, SUN Y, LIN J, et al. Revisit impedance-based stability analysis of VSC-HVDC system[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems: 1-11[2023-01-04]. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3234145>.

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-06-13

作者简介:

陈宇(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源储能并网及其控制技术; E-mail: 1303243001@qq.com

王维庆(1959—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大型风电机组关键部件、风电机组检测技术、电力系统安全稳定及其控制与保护、微电网控制与故障诊断。E-mail: wwq59@xju.edu.cn

(编辑 魏小丽)