

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211059

## 基于频率稳定性提升的虚拟惯性优化控制策略

徐海珍<sup>1</sup>, 余畅舟<sup>1</sup>, 毛福斌<sup>2</sup>, 吴泽霖<sup>1</sup>, 胡涛涛<sup>1</sup>, 王庆龙<sup>1</sup>

(1. 合肥学院, 安徽 合肥 230601; 2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 基于传统一阶虚拟惯性的新能源逆变器并联弱电网时, 其有功稳态和动态特性调节存在矛盾。首先, 总结了基于各种改进结构虚拟惯性算法的新能源逆变器并、离网时的特性及存在问题。然后, 针对此问题, 以频率稳定性提升为目标, 通过调整二阶虚拟惯性算法中一阶微分补偿环节和一阶惯性环节在功率外环前向通道的位置, 提出了二阶虚拟惯性优化控制策略。最后搭建了一台 100 kW 新能源逆变器并网仿真平台, 对理论分析结果进行仿真验证。理论分析与仿真结果表明, 该算法在保证逆变器有功稳态特性和功率振荡抑制能力的同时, 有效减小了动态响应初始阶段的频率变化率, 提高了系统频率稳定性。

**关键词:** 虚拟惯性; 有功振荡; 频率稳定性; 虚拟同步发电机

### A virtual inertia optimization control strategy based on frequency stability improvement

XU Haizhen<sup>1</sup>, YU Changzhou<sup>1</sup>, MAO Fubin<sup>2</sup>, WU Zelin<sup>1</sup>, HU Taotao<sup>1</sup>, WANG Qinglong<sup>1</sup>

(1. Hefei University, Hefei 230601, China; 2. China Energy Engineering Group  
Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230022, China)

**Abstract:** When a new energy inverter with traditional first-order virtual inertia is connected to a weak power grid, there is an adjustment contradiction between its output active power steady-state and dynamic characteristics. First, the characteristics and problems of the new energy inverter with various improved structural virtual inertia in stand-alone and grid-connected mode are summarized. Then to promote frequency stability, a second-order virtual inertia optimization control strategy is proposed, one which adjusts the positions of the first-order differential compensation link and the first-order inertia link in the outer power loop forward channel of the second-order virtual inertia algorithm. Finally, a 100 kW new energy inverter grid-connected system simulation platform is built to verify the theoretical analysis. Theoretical analysis and simulation show that the proposed algorithm effectively reduces the frequency change rate in the initial response stage and improves system frequency stability while maintaining the active power steady-state characteristics and power oscillation damping ability.

This work is supported by the Youth Fund of Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 1908085QE208).

**Key words:** virtual inertia; active power oscillation; frequency stability; virtual synchronous generator

## 0 引言

“碳达峰碳中和”目标下, 光伏、风电等新能源迎来新的机遇, 能源供应体系正由以煤炭为主向多元化转变<sup>[1-4]</sup>, 新能源逐步成为新增电源装机主体。新能源发电在世界各国发电量中占比逐渐增高,

有着广阔的发展前景<sup>[5-7]</sup>。然而, 光伏、风电等新能源发电逆变器的控制与电网的电压和频率无耦合, 等效转动惯量很小, 无法为系统提供频率和电压支撑。当大规模新能源接入电网时, 送端的常规同步发电机组被大量取代, 电网惯量降低, 系统的安全稳定运行面临重大挑战<sup>[8-11]</sup>。新能源逆变器通过采用虚拟惯性算法模拟真实发电机的旋转惯性, 可为电网提供局部电压和频率支撑, 提高了系统的等效惯性<sup>[12-15]</sup>。

基于传统一阶虚拟惯性的新能源逆变器为了提

基金项目: 安徽省自然科学基金青年项目资助(1908085QE208); 国家自然科学基金青年项目资助(51907046); 安徽省高校自然科学研究重大项目资助(KJ2020ZD58)

高频率支撑能力, 需增大虚拟惯量, 但虚拟惯量的提高使得系统阻尼减小。当逆变器并网系统发生有功指令阶跃或负载扰动时, 其输出有功在动态过程中产生低频振荡或较大超调, 易导致系统失稳。文献[16-19]提出了基于系统频率波动的虚拟惯量和阻尼系数自适应控制算法。该算法可有效抑制逆变器输出有功超调和振荡, 但对频率检测的要求较高, 在频率波动较大的电网系统中易受干扰, 且文中未分析该算法对系统频率稳定性的影响。

文献[20-21]提出了基于微分补偿环节虚拟惯性的VSG控制策略, 通过在一阶虚拟惯性环节上增加微分环节以加快频率和功率的响应速度, 实现了在保证输出功率稳态控制精度的同时增加系统的阻尼, 减小了动态过程中的有功超调。文献[22]中, 为了改进微分补偿环节虚拟惯性在初始响应阶段惯性较小的问题, 提出了二阶虚拟惯性控制算法, 虽然该算法提高了初始响应阶段的惯性, 但在整个动态过程中, 其频率变化率仍比传统一阶虚拟惯性大。对于“双高”弱电网系统, 系统的短路容量比和惯性较低, 系统的频率稳定性由稳态频率、频率最低点和动态响应初始阶段的频率变化率三者共同决定, 且频率变化率占主导作用。因此, 新能源逆变器采用上述各种改进虚拟惯性算法时, 难以较好地用于频率稳定性提升。

针对此问题, 本文首先, 分析了基于现有一阶虚拟惯性、基于微分补偿环节虚拟惯性和二阶虚拟惯性算法的新能源逆变器在独立运行和并网运行时的频率和有功稳态、动态特性; 然后, 在比较总结各虚拟惯性算法的特性和存在问题的基础上, 提出了基于频率稳定性提升的二阶虚拟惯性优化控制策略, 以减小逆变器动态响应初始阶段的频率变化率。该算法既可以保持有功稳态的精度、抑制动态功率振荡, 又可以提高逆变器动态响应初始阶段的频率支撑能力。最后, 搭建了一台 100 kW 新能源逆变器并网仿真平台, 对理论分析结果进行仿真验证。仿真结果证明了所提控制策略的有效性。

## 1 基于改进虚拟惯性的新能源逆变器特性分析

### 1.1 基于传统一阶虚拟惯性的逆变器特性分析

本文采用的新能源逆变器主电路结构及其虚拟惯性控制策略如图 1 所示, 图中:  $L_f$ 、 $r_{Lf}$  为滤波电感及其寄生电阻;  $C_f$  为滤波电容;  $L_1$ 、 $r_1$  分别为逆变器到 PCC 点的联线电感和电阻;  $i_L$  和  $u_0$  分别为

滤波电感电流和逆变器输出电压;  $u_g$  为主电网电压。

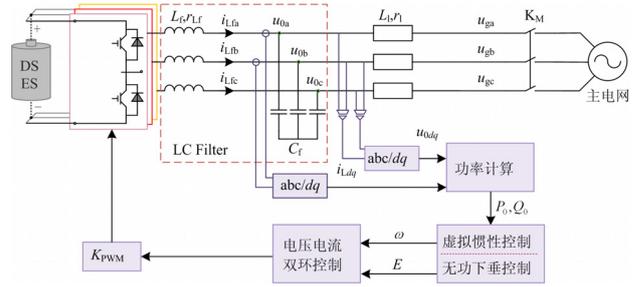


图 1 逆变器主电路及控制结构图

Fig. 1 Main circuit and control structure diagram of the inverter

不同虚拟惯性算法的控制框图如图 2 所示, 其中, 基于传统一阶虚拟惯性的新能源逆变器控制算法(Traditional First-order Virtual Inertia, TFVI)框图如图 2(a)所示<sup>[23]</sup>。图中,  $J_\omega$  为虚拟惯量,  $\omega_0$  和  $\omega$  分别为逆变器额定角频率和输出角频率,  $P_{ref}$  和  $P_0$  分别为指令有功功率和输出有功功率,  $K_\omega$  和  $D_\omega$  分别为调频系数和阻尼系数。

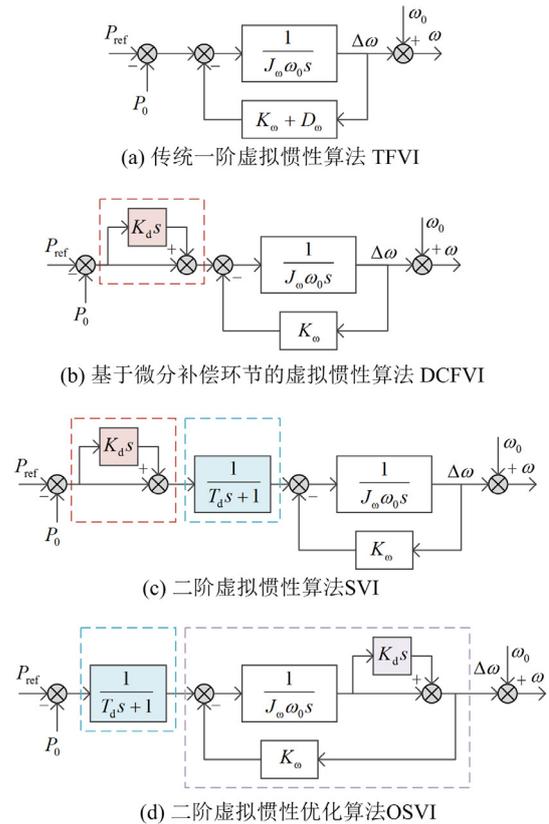


图 2 不同虚拟惯性算法的控制框图

Fig. 2 Control block diagram of various virtual inertia algorithms

根据图 2(a), 采用 TFVI 算法的新能源逆变器在独立带载运行时, 其  $P$ - $\omega$  传递函数为

$$G_{P-\omega 1} = \frac{\omega - \omega_0}{P_{\text{ref}} - P_0} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1}{J_\omega \omega_0 s + K_\omega + D_\omega} \quad (1)$$

式(1)为一阶惯性环节, 稳态频率偏差由  $K_\omega + D_\omega$  决定, 动态惯性大小由  $J_\omega$ 、 $K_\omega$  和  $D_\omega$  共同决定。其阶跃响应曲线如图 3 所示。

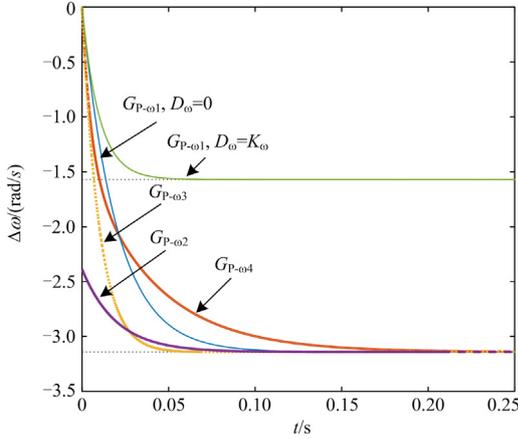


图 3 基于不同虚拟惯性算法的逆变器有功阶跃下的频率响应曲线

Fig. 3 Frequency response curves of inverter based on various virtual inertia algorithms with active power step

并网运行时, 逆变器输出有功功率的闭环传递函数为

$$P_{01} = \frac{K_p}{J_\omega \omega_0 s^2 + (K_\omega + D_\omega)s + K_p} P_{\text{ref}} + \frac{K_p (J_\omega \omega_0 s + K_\omega + D_\omega)}{J_\omega \omega_0 s^2 + (K_\omega + D_\omega)s + K_p} (\omega_0 - \omega_g) = \quad (2)$$

$$G_{r1}(s) P_{\text{ref}} + G_{f1}(s) (\omega_0 - \omega_g) \omega_0 - \omega_g$$

式中,  $K_p$  为逆变器与电网相角差到逆变器输出有功功率的传递函数。在本文建立的平均功率小信号模型中,  $K_p$  是与逆变器电压幅值、输出阻抗及联线阻抗相关的系数。

稳态时逆变器输出有功功率由指令有功和频率偏差产生的功率偏差两部分组成, 且功率偏差与  $K_\omega + D_\omega$  成正比。由于新能源发电逆变器应用于孤岛微网系统或偏远的公共电网末端, 电网频率与额定频率存在偏差, 从而导致其输出稳态有功功率与指令功率之间存在偏差, 降低了功率的控制精度。

为了增强新能源逆变器接入的微电网或局部电网的等效惯量, 虚拟惯量  $J_\omega$  需设较大值, 但与同步发电机运行特性相似, 较大的虚拟惯量导致逆变器并网系统阻尼减小, 输出有功动态超调较大甚至发生低频振荡, 影响系统的稳定运行。增大 TFVI 算法中的调频系数  $K_\omega$  和阻尼系数  $D_\omega$  均可增大系统阻

尼比, 以减小功率超调、抑制振荡。但  $K_\omega$  由逆变器额定出力和出力范围内的允许最大频率偏差决定, 而  $D_\omega$  的增大导致输出有功稳态偏差增大。因此, 基于 TFVI 算法的新能源逆变器并联弱电网运行时, 其有功稳态和动态调节存在矛盾。

### 1.2 基于微分补偿环节虚拟惯性的逆变器特性分析

通过在 TFVI 算法的功率外环前向通道串联一阶微分环节, 形成基于微分补偿的一阶虚拟惯性 (Differential Compensation First-order Virtual Inertia, DCFVI) 算法, 如图 2(b) 所示。

基于 DCFVI 算法的逆变器在独立运行时, 其  $P-\omega$  传递函数为

$$G_{P-\omega 2} = \frac{\omega - \omega_0}{P_{\text{ref}} - P_0} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1 + K_d s}{J_\omega \omega_0 s + K_\omega} \quad (3)$$

DCFVI 为超前滞后环节, 比 TFVI 环节增加了一个零点, 如图 3 所示, 其阶跃响应初始阶段表现为下垂特性, 惯性较小。

当采用 DCFIV 的逆变器并网运行时, 其输出的有功闭环传递函数为

$$P_{02} = \frac{K_p (1 + K_d s) P_{\text{ref}}}{J_\omega \omega_0 s^2 + (K_\omega + K_p K_d) s + K_p} + \frac{K_p (J_\omega \omega_0 s + K_\omega) (\omega_0 - \omega_g)}{J_\omega \omega_0 s^2 + (K_\omega + K_p K_d) s + K_p} = \quad (4)$$

$$G_{r2}(s) P_{\text{ref}} + G_{f2}(s) (\omega_0 - \omega_g)$$

逆变器输出有功稳态偏差仅与  $K_\omega$  有关, 微分环节不影响输出有功的稳态特性。另外, 由于采用 DCFVI 的逆变器并网系统比采用 TFVI 的系统具有更大的阻尼比, 因此令  $D_\omega = 0$ , 且通过  $K_d$  的合理配置, 可实现在保持有功稳态控制精度的同时减小其动态超调、抑制振荡。但是由于 DCFVI 在频率响应初始阶段表现为下垂特性, 频率变化率较大, 应用于低惯量弱电网系统可使得系统频率稳定性较差。

### 1.3 基于二阶虚拟惯性的逆变器特性分析

针对 DCFVI 算法存在的问题, 通过在其结构上串联一个一阶惯性环节, 从而增加一个可调极点, 对虚拟惯性的初始响应特性进行修正, 形成二阶虚拟惯性 (Second-order Virtual Inertia, SVI) 如图 2(c) 所示。

采用 SVI 的新能源逆变器独立带载运行时, 其  $P-\omega$  传递函数为

$$G_{P-\omega 3} = \frac{\omega - \omega_0}{P_{\text{ref}} - P_0} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1 + K_d s}{(J_\omega \omega_0 s + K_\omega)(T_d s + 1)} \quad (5)$$

通过调节  $K_d$  和  $T_d$ , 可自由配置零点和极点, 从而改善虚拟惯性响应初始阶段的特性。图 3 中基

于 SVI 算法的逆变器在频率阶跃响应初始阶段的响应速度较 DCFVI 大, 但在整个动态过程中, 其惯性比 TFVI 算法的惯性小。因此, SVI 算法是以减小逆变器的频率支撑能力为代价提高了其功率响应速度, 其频率稳定性仍无法满足低惯量弱电网系统的需求。

当采用 SVI 算法的逆变器并网运行时, 其输出有功闭环传递函数为

$$P_{03} = \frac{K_p(1+K_d s)P_{\text{ref}}}{J_\omega \omega_0 T_d s^3 + (J_\omega \omega_0 + K_\omega T_d)s^2 + (K_\omega + K_p K_d)s + K_p} + \frac{K_p(T_d s + 1)(J_\omega \omega_0 s + K_\omega)(\omega_0 - \omega_g)}{J_\omega \omega_0 T_d s^3 + (J_\omega \omega_0 + K_\omega T_d)s^2 + (K_\omega + K_p K_d)s + K_p} = \frac{G_{r3}(s)P_{\text{ref}} + G_{f3}(s)(\omega_0 - \omega_g)}{G_{r3}(s)P_{\text{ref}} + G_{f3}(s)(\omega_0 - \omega_g)} \quad (6)$$

式(6)中, 逆变器输出有功稳态偏差仅与  $K_\omega$  有关,  $K_d$  和  $T_d$  不影响有功的稳态特性。通过选择恰当的  $T_d$  和  $K_d$  值以合理配置系统的零极点, 基于 SVI 算法的新能源逆变器并网系统也可实现在维持有功稳态特性的同时改善有功动态特性, 但频率稳定性较基于 TFVI 算法的系统更差。

## 2 基于频率稳定性提升的虚拟惯性优化控制及特性分析

### 2.1 虚拟惯性优化控制策略

本文针对上述 TFIV 算法、DCFIV 算法和 SVI 算法存在的问题, 通过调整 SVI 算法中一阶微分补偿环节和一阶惯性环节在功率外环前向通道的位置, 提出了一种二阶虚拟惯性优化(Optimized Second-order Virtual Inertia, OSVI)算法, 如图 2(d)所示。一阶惯性环节仍串联在指令功率与输出功率差值之后, 而微分前馈移至虚拟惯性环节之后, 使 OSVI 的频率阶跃响应在初始阶段具有与 SVI 相似的快速响应特性, 以减小功率超调、抑制振荡; 在中后阶段又具有比 TFIV 大的惯性, 以提高系统的频率稳定性。OSVI 算法仍具有  $K_d$  和  $T_d$  两个可自由调节的参数。下面具体分析这两个参数对基于 OSVI 算法的逆变器运行特性的影响。

### 2.2 基于 OSVI 的新能源逆变器独立运行特性

基于 OSVI 的新能源逆变器在独立带载运行时, 其  $P-\omega$  传递函数为

$$G_{P-\omega} = \frac{\omega - \omega_0}{P_{\text{ref}} - P_0} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1 + K_d s}{((J_\omega \omega_0 + K_d K_\omega)s + K_\omega)(T_d s + 1)} \quad (7)$$

OSVI 算法可看作由一个一阶惯性环节和一个超前滞后环节串联得到, 如图 2(d)中虚线框所示, 因此 OSVI 有两个极点  $-1/T_d$ 、 $-K_\omega/(J_\omega \omega_0 + K_d K_\omega)$

和一个零点  $-1/K_d$ 。OSVI 中的一阶惯性环节与 SVI 相同, 但 OSVI 中超前滞后环节的极点比 SVI 超前滞后环节的极点更接近原点, 使得该超前滞后环节在动态响应的中后阶段具有更大的惯性。因此, 当虚拟惯量  $J_\omega$  一定时, 通过调节  $K_d$  和  $T_d$  合理配置零极点位置, 可实现频率阶跃响应的初始阶段, 令一阶惯性环节起主导作用, 而在频率阶跃响应的中后阶段, 一阶超前滞后环节起主导作用。另外,  $K_d$  和  $T_d$  同样不影响频率的稳态偏差。

### 2.3 基于 OSVI 的新能源逆变器并网运行特性

当基于 OSVI 的新能源逆变器并网运行时, 其输出的有功闭环传递函数为

$$P_{04} = \frac{K_p(1+K_d s)P_{\text{ref}}}{T_d(J_\omega \omega_0 + K_d K_\omega)s^3 + (J_\omega \omega_0 + K_\omega K_d + K_\omega T_d)s^2 + (K_\omega + K_p K_d)s + K_p} + \frac{K_p(T_d s + 1)(J_\omega \omega_0 + K_d K_\omega)s + K_\omega(\omega_0 - \omega_g)}{T_d(J_\omega \omega_0 + K_d K_\omega)s^3 + (J_\omega \omega_0 + K_\omega K_d + K_\omega T_d)s^2 + (K_\omega + K_p K_d)s + K_p} = \frac{G_{r4}(s)P_{\text{ref}} + G_{f4}(s)(\omega_0 - \omega_g)}{G_{r4}(s)P_{\text{ref}} + G_{f4}(s)(\omega_0 - \omega_g)} \quad (8)$$

逆变器输出有功闭环传递函数同样为三阶系统, 其稳态偏差仅与  $K_\omega$  有关。由于三阶系统难以像二阶系统一样计算出系统的阻尼比, 因此根据零极点位置分析参数变化对有功动态特性的影响。 $G_{r4}(s)$  中零点位置仅由  $K_d$  决定, 极点位置由  $K_d$  和  $T_d$  共同决定。由于  $G_{r3}(s)$  和  $G_{r4}(s)$  的零点位置相同, 下文仅分析  $K_d$  和  $T_d$  的变化对极点的影响。

图 4(a)为  $K_d = 0$ 、 $T_d = 0 \sim 0.015$  时,  $G_{r3}(s)$  的极点变化趋势, 图 4(b)为  $K_d$ 、 $T_d$  取相同参数时,  $G_{r4}(s)$  的极点变化趋势。可以看出  $T_d$  对基于 SVI 和 OSVI 算法的逆变器并网系统有功动态特性的影响趋势和程度相差不大。随着  $T_d$  的增大, 系统的阻尼减小, 超调增大, 稳定性降低。

图 4(c)为  $T_d = 0$ 、 $K_d = 0 \sim 0.005$  时,  $G_{r3}(s)$  的极点变化趋势, 图 4(d)为  $K_d$ 、 $T_d$  取相同参数时,  $G_{r4}(s)$  的极点变化趋势。随着  $K_d$  的增大, 基于 SVI 算法的逆变器并网系统阻尼增加幅度较大, 有功动态超调降低, 而基于 OSVI 算法的逆变器并网系统在相同的  $K_d$  变化范围内阻尼变化范围为 0.74~0.8, 阻尼增加幅度较小。然而, 虽然较大阻尼系统的功率超调和振荡抑制能力较强, 但其频率稳定性也随之显著降低。图 5 为新能源逆变器分别采用 SVI 和 OSVI 算法, 且  $K_d = 0.01$ 、 $T_d = 0.001$  时, 其并网系

统零极点和频率响应曲线的对比图。可以看出，基于 SVI 算法的系统有功超调比基于 OSVI 算法的系统小 3.3%，而其频率跌落幅度增大了 12.7%。因此，通过合理配置 OSVI 算法中的  $K_d$  和  $T_d$ ，可实现提高新能源逆变器频率支撑能力和功率振荡抑制能力双目标的折衷优化。

通过以上分析，基于 TFVI、DCFVI 和 SVI 的虚拟惯性算法的逆变器频率稳定性、并网系统输出有功稳态控制精度和动态功率振荡抑制能力，如表 1 所示。可以看出，OSVI 算法既保持了 SVI 算法具有系统输出有功稳态精度高和动态超调小的特性，又具有较强的频率支撑能力，弥补了 DCFVI 算法和 SVI 算法频率稳定性较差的缺点。

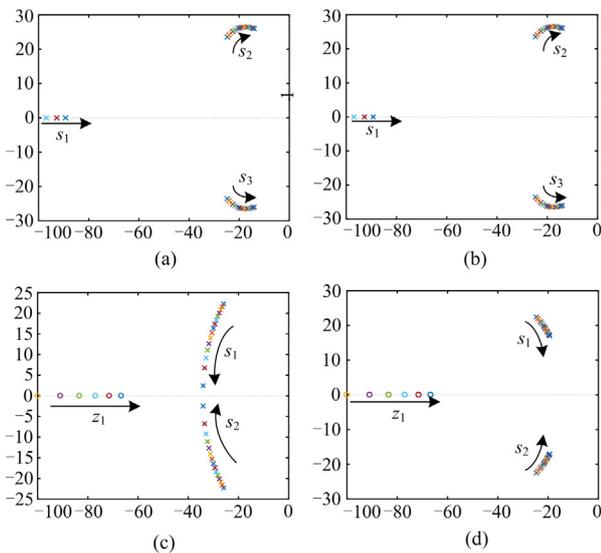


图 4 基于 SVI 和 OSVI 算法的新能源发电逆变器并网系统零极点图

Fig. 4 Zero-pole diagram of new energy power generation inverter grid connected system based on SVI algorithm and OSVI algorithm

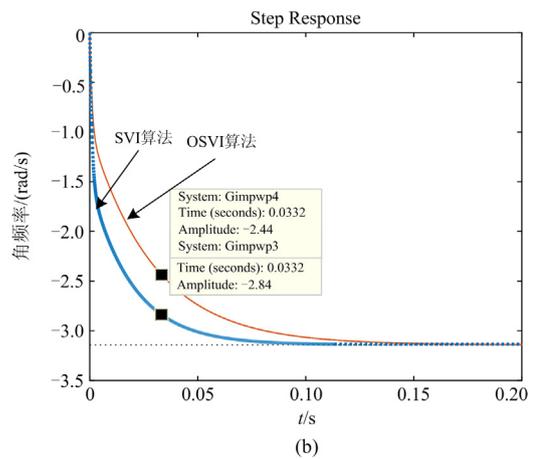
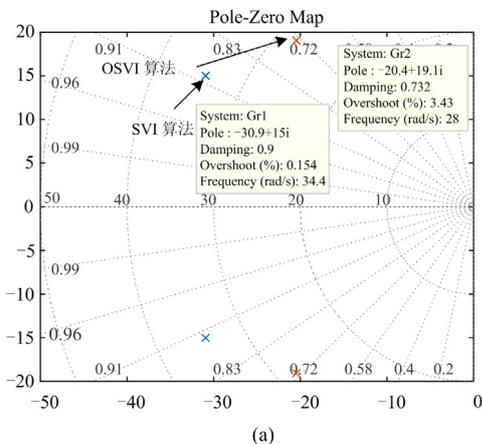


图 5 基于 SVI 和 OSVI 算法的新能源发电逆变器并网系统零极点和频率响应曲线对比

Fig. 5 Zero-pole diagram and  $P-\omega$  curve comparison of new energy power generation inverter grid connected system based on SVI algorithm and OSVI algorithm

表 1 基于 TFVI、DCFVI 和 SVI 算法的逆变器特性比较  
Table 1 Characteristics comparison of inverter with TFVI, DCFVI and SVI algorithms

虚拟惯性算法	频率稳定性	有功稳态控制精度	有功超调和功率振荡
TFVI( $D_o = 0$ )	低	高	大
TFVI( $D_o \neq 0$ )	高	低	小
DCFVI	低	高	小
SVI	低	高	小
OSVI	高	高	小

### 3 仿真研究及结果

本文搭建了一台 100 kW 新能源逆变器的并网仿真模型，对采用 TFVI、DCFVI、SVI 和 OSVI 算法的新能源逆变器分别并联强电网和弱电网时，其输出有功和频率特性进行验证。主电路参数和相关控制参数如表 2 所示。

表 2 仿真平台参数

Table 2 Parameters of simulation platform

参数	符号	数值
额定容量	$S_{rate}/kVA$	100
额定相电压有效值	$E_0/V$	220
额定角频率	$\omega_0/(rad/s)$	314.15
逆变器开关频率	$f_s/kHz$	5
逆变器滤波电感	$L_f/mH$	0.5
逆变器滤波电容	$C_f/\mu F$	90

算例 1 采用不同虚拟惯性算法的新能源逆变器并联强电网运行

分别令采用 TFVI、DCFVI、SVI 和 OSVI 算法的新能源逆变器在  $t_0$  时刻并网运行, 设置  $J_{\omega} = 8$ ,  $K_{\omega} = S_{\text{rate}} / 5\% \omega_0$ 。  $t_1$  时刻, 指令有功功率  $P_{\text{ref}}$  从 0 kW 阶跃到 60 kW, 逆变器输出的有功波形和电压角频率分别如图 6(a)—图 6(c)所示。

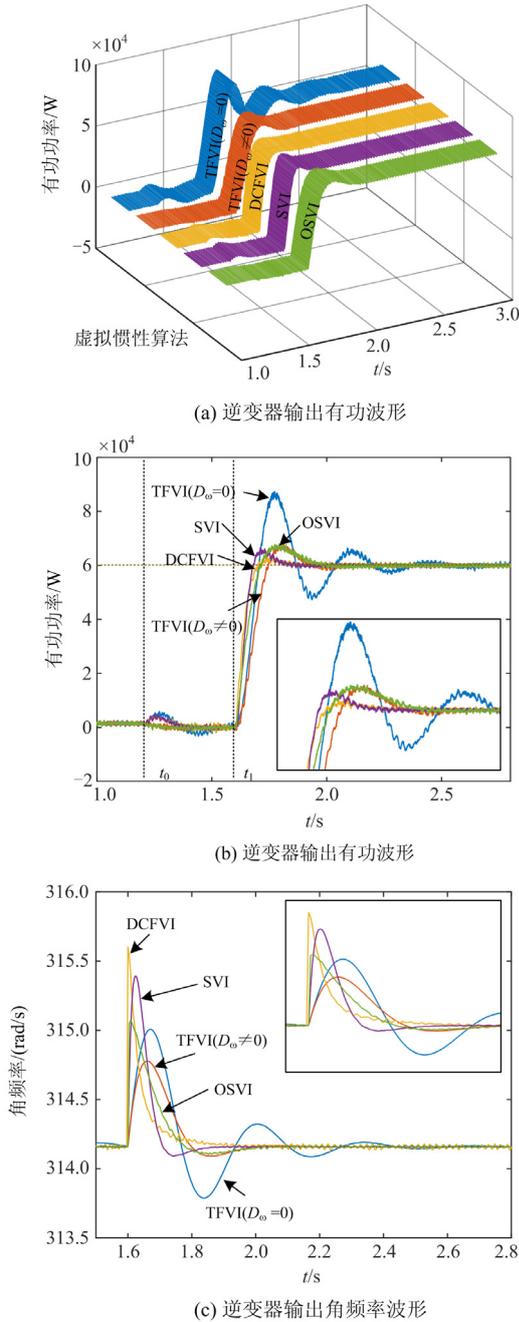


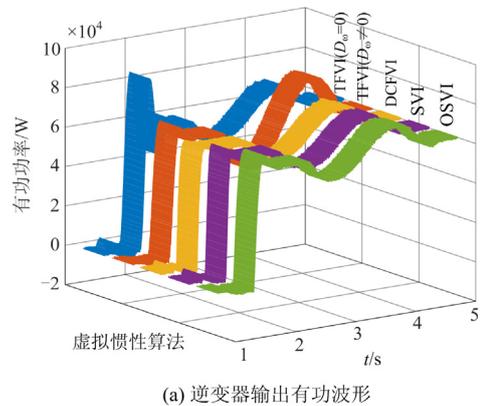
图 6 采用不同虚拟惯性算法的逆变器并联强电网仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of inverters with various virtual inertia algorithms connected to strong power grid

由于  $J_{\omega}$  较大, 基于 TFVI( $D_{\omega} = 0$ ) 算法的逆变器在指令功率阶跃时, 其输出功率产生低频振荡, 约 1 s 恢复至稳态, 动态过程中有功超调  $\sigma_p = 23.0\%$ , 最大频率偏差  $\Delta\omega = 26.8\%$ 。采用 TFVI 算法并令  $D_{\omega} = K_{\omega}$ , 系统阻尼增大, 动态有功超调减小为  $\sigma_p = 2\%$ , 最大频率偏差  $\Delta\omega = 9.5\%$ 。由于电网为强电网, 其频率与额定频率相同, 因此虽然  $D_{\omega} \neq 0$ , 逆变器输出有功稳态偏差仍较小。基于 DCFVI 算法的逆变器由于在动态响应初始阶段频率变化加快, 近似于下垂控制, 且系统阻尼增大, 从而有效抑制了动态过程中功率超调和振荡, 有功超调  $\sigma_p = 3.5\%$ , 但  $\Delta\omega = 45.8\%$ , 说明该算法的系统惯性较小。基于 SVI 算法的逆变器并网系统增加了一个极点, 从而使动态过程中的频率偏差较基于 DCFVI 算法的系统频率偏差小, 有功超调  $\sigma_p = 5\%$ ,  $\Delta\omega = 39.5\%$ 。但与 TFVI 算法相比, 其惯性仍较小。基于 OSVI 算法的逆变器并网有功闭环系统同样具有三个极点, 系统有功超调  $\sigma_p = 7.0\%$ ,  $\Delta\omega = 26.3\%$ , 证明了在以上几种虚拟惯性算法中, 所提 OSVI 算法在相同的有功超调抑制能力下, 具有最高的频率稳定性。

算例 2 采用不同虚拟惯性算法的新能源逆变器并联弱电网运行

若电网为配电网末端或新能源渗透率较高的低惯性弱电网, 电网频率与额定频率之间存在偏差且随时间波动。  $t_2$  时刻, 电网频率发生  $s$  级波动, 最大偏差为  $20\% \Delta\omega_{\text{max}}$ ,  $t_3$  时刻电网停止波动, 其他参数和工况设置与算例 1 相同。图 7(a)—图 7(c)分别为逆变器输出有功波形和输出电压角频率波形。电网频率的偏差导致逆变器输出有功存在与  $K_{\omega} + D_{\omega}$  成正比的稳态偏差, 因此基于 TFVI( $D_{\omega} \neq 0$ ) 算法的逆变器, 其有功稳态偏差为基于 TFVI( $D_{\omega} = 0$ ) 以及其他算法的 2 倍。另外, 当有功指令阶跃时, 采用各虚拟惯性算法的逆变器, 其有功动态特性与算例 1 中相同。



(a) 逆变器输出有功波形

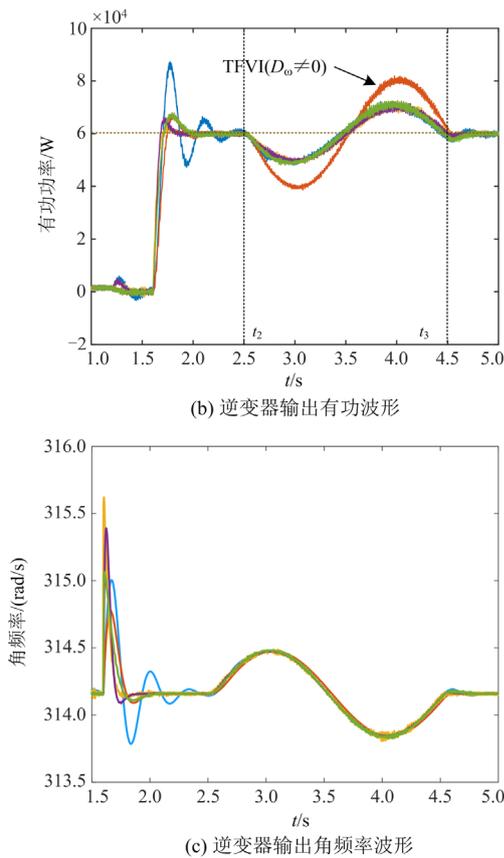


图 7 采用不同虚拟惯性算法的逆变器并网弱电网仿真波形  
 Fig. 7 Simulation waveforms of inverters with various virtual inertia algorithms connected to weak power grid

根据以上仿真结果可以看出，基于本文所提 OSVI 算法的新能源逆变器在并网运行工况下，其输出有功不仅具有较高的稳态控制精度及较好的功率振荡抑制能力，而且具有较高的系统频率稳定性。

#### 4 结论

本文首先分析了现有基于传统一阶虚拟惯性、基于微分补偿的一阶虚拟惯性和基于二阶虚拟惯性算法的新能源逆变器在独立运行及并网运行的频率和有功特性，总结了各虚拟惯性算法存在的问题。然后，针对频率稳定性提升问题，提出了二阶虚拟惯性优化控制策略，并分析了基于虚拟惯性优化算法的新能源逆变器在独立运行和并网运行时的输出频率和有功稳态、动态特性。二阶虚拟惯性优化算法可使逆变器并网系统在保持较好有功稳态控制精度和动态功率振荡抑制能力的同时，提高弱电网系统的频率稳定性。最后搭建仿真平台对所提控制算法进行了验证，仿真结果证明了所提控制算法的有效性。下一步计划中，将对所提控制算法进行实验

验证，并对基于虚拟惯性优化算法的多台新能源逆变器组网系统特性进行研究。

#### 参考文献

- [1] ZHAO Tao, ZHANG Xing, MAO Wang, et al. A modified hybrid modulation strategy for suppressing DC voltage fluctuation of cascaded H-bridge photovoltaic inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 3932-3941.
- [2] LI G, Y CHEN, LUO A, et al. Analysis and mitigation of sub-synchronous resonance in series-compensated grid-connected system controlled by virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 39(10): 11096-11107.
- [3] 秦心筱, 张昌华, 徐子豪, 等. 基于卷积神经网络电力系统低频振荡主导模态特征定性辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 51-58.  
 QIN Xinxiao, ZHANG Changhua, XU Zihao, et al. Research on qualitative identification of a low frequency oscillations dominant mode in power system based on a convolutional neural network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 51-58.
- [4] 郭伟, 唐人虎. 2060 碳中和目标下的电力行业[J]. 能源, 2020, 142(11): 14-21.  
 GUO Wei, TANG Renhu. 2060 power industry under the goal of carbon neutrality[J]. Energy, 2020, 142(11): 14-21.
- [5] MAHIDIN E, NASARUDDIN H H, ZAKI M, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.
- [6] SUYONO H, ZAINUDDIN M. Injection impact of photovoltaic distributed generations (PVDG) on power distribution system stability[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 785: 403-408.
- [7] 杨蕾, 李胜男, 黄伟, 等. 考虑风光新能源参与二次调频的多源最优协同控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 43-49.  
 YANG Lei, LI Shengnan, HUANG Wei, et al. Optimal coordinated control of multi-source for AGC with participation of wind and solar energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 43-49.
- [8] 曹炜, 张甜, 傅业盛, 等. 同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 1-10.  
 CAO Wei, ZHANG Tian, FU Yesheng, et al. Research and application for increasing inertia and improving frequency response of power system by using synchronous

- condenser[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 44(3): 1-10.
- [9] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 20-27.  
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 20-27.
- [10] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(9): 121-128.  
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(9): 121-128.
- [11] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(2): 163-170.  
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(2): 163-170.
- [12] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [13] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(13): 22-31.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(13): 22-31.
- [14] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2591-2603.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [15] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(21): 165-175.  
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(21): 165-175.
- [16] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(2): 668-676.
- [17] LI J, WEN B, WANG H. Adaptive virtual inertia control strategy of VSG for micro-grid based on improved bang-bang control strategy[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 39509-39514.
- [18] SHI K, CHEN C, SUN Y X, et al. Rotor inertia adaptive control and inertia matching strategy based on parallel virtual synchronous generators system[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2020, 14(10).
- [19] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(19): 82-89.  
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(19): 82-89.
- [20] XU H, YU C, LIU C, et al. An improved virtual inertia algorithm of virtual synchronous generator[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(2): 377-386.
- [21] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于超前滞后环节虚拟惯性的VSG控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(7): 1918-1927.  
XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on lead-lag link virtual inertia[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(7): 1918-1927.
- [22] XU H, YU C, LIU C, et al. A virtual inertia control strategy based on multi-order lead-lag compensation[C] // 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia), May 27-30, 2019, Busan, Korea: 2616-2621.
- [23] 杜威, 姜齐荣, 陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(23): 26-31.  
DU Wei, JIANG Qirong, CHEN Jiaorui. Frequency control strategy of distributed generations based on virtual inertia in a microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(23): 26-31.

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-10-03

作者简介:

徐海珍(1988—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为微网与新能源发电变流器控制技术, 虚拟同步发电机技术; E-mail: xhzicy@sina.com

余畅舟(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为智能光伏发电逆变器控制技术, 分布式发电及其电力电子化稳定控制技术. E-mail: ycz87@163.com

(编辑 许威)