

9-19-2023

Variable parameter VSG control based on adaptive exponential function

Lina WANG

Hunan Economy Institute Electric Power Design Co.,Ltd.,Changsha 410007, China, wln759@yeah.net

Yichao WANG

State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Changsha 410029, China

Liping TAN

State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Changsha 410029, China

Zhiqiang XU

Hunan Engineering Research Center of Large-scale Battery Energy Storage Application Technology, Changsha 410017, China

Wenjun LIU

State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Changsha 410029, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

See next page for additional authors

Recommended Citation

WANG, Lina; WANG, Yichao; TAN, Liping; XU, Zhiqiang; LIU, Wenjun; and LIU, Haotian (2023) "Variable parameter VSG control based on adaptive exponential function," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 38: Iss. 3, Article 13.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.013

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss3/13>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

Variable parameter VSG control based on adaptive exponential function

Authors

Lina WANG, Yichao WANG, Liping TAN, Zhiqiang XU, Wenjun LIU, and Haotian LIU

基于自适应指数函数的变参数 VSG 控制

王立娜¹, 王逸超², 谭丽平², 徐志强³, 刘文军², 刘浩田²

(1. 湖南经研电力设计有限公司, 湖南 长沙 410007; 2. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410029; 3. 规模化电池储能应用技术湖南省工程研究中心, 湖南 长沙 410017)

摘要:近年来,随着电网的电力电子化程度升高,电网的整体惯量减小,电虚拟同步机(VSG)技术应运而生并迅速发展。其核心思想是模仿传统能源所应用到的同步发电机的电气特性和机械特性,提高高比例分布式能源系统的转动惯量。然而,现有 VSG 控制策略的控制参数固定或者简单连续变化,针对小扰动可能会引起系统功率的振荡等问题。为更加灵活调整虚拟惯量和阻尼系数,在详细分析 VSG 基础上,提出一种基于分段指数函数的变参数 VSG 自适应控制策略,其虚拟惯量和旋转阻尼随电网频率的变化按照指数函数轨迹变化,从而达到减小电网波动的目的,并且扰动变化率较小时参数变化较小,避免引起系统振荡问题;最后设计主电路部分和 VSG 控制部分的参数,并通过仿真证明了该策略能有效改善逆变器工作的稳定性。

关键词:虚拟同步机控制;三电平逆变器;分布式能源;变虚拟惯量;变阻尼系数

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.013 中图分类号:TM402 文章编号:1673-9140(2023)03-0124-08

Variable parameter VSG control based on adaptive exponential function

WANG Lina¹, WANG Yichao², TAN Liping², XU Zhiqiang³, LIU Wenjun², LIU Haotian²

(1. Hunan Economy Institute Electric Power Design Co., Ltd., Changsha 410007, China ; 2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Changsha 410029, China; 3. Hunan Engineering Research Center of Large-scale Battery Energy Storage Application Technology, Changsha 410017, China)

Abstract: In recent years, with the increasing electronization of the power grid, the overall inertia of the grid has decreased. As a result, the technology of virtual synchronous generator (VSG) has emerged and rapidly developed. The core idea is to mimic the electrical and mechanical characteristics of synchronous generators used in traditional power systems in order to enhance the rotational inertia of high-proportion distributed energy systems. However, the existing control strategies for VSG have fixed control parameters or simple continuous variations, which may lead to power oscillations in the system when subjected to small disturbances. In order to adjust the virtual inertia and damping coefficient more flexibly, a variable-parameter VSG adaptive control strategy based on piecewise exponential functions is proposed after a detailed analysis of VSG. The variation of virtual inertia and rotational damping with grid frequency follows an exponential function trajectory, aiming to reduce grid fluctuations. Additionally, when the disturbance rate is low, the parameter changes are small to avoid causing system oscillations. Finally, the parameters of the main circuit and the VSG control part are designed, and simulation results show that the strategy can effectively improve the stability of the inverter operation.

Key words: virtual synchronizer control; three-level inverter; distributed energy; variable virtual inertia; variable damping coefficient

收稿日期:2021-09-22;修回日期:2021-11-19

基金项目:国家自然科学基金(51977067)

通信作者:王立娜(1986—),女,中级电力工程师,主要从事储能规划设计及并网协同控制研究;E-mail:wln759@yeah.net

近年来,新能源在全球发展速度十分迅猛。1997年到2016年,光伏装机从0.23 GW增长到了301.47 GW,风电装机从7.64 GW增长到了468 GW。在中国,预计2050年将实现风电装机24亿kW、光伏装机27亿kW,合计为9.66万亿kW·h,占全部发电量的64%^[1]。新能源作为清洁能源,一方面可以提高能量的利用率,对环境起到保护作用,另一方面可以减少远距离输电带来的电能损耗和电网稳定性等方面的问题^[2-4]。

然而,光伏和风电等新能源具有波动性、随机性等特点,电力电子接口又不具备传统同步发电机的阻尼与惯量,大量的分布式电源并网将会给电网带来运行不稳定的问题^[5]。因此,新能源并网要摆脱“只管发电,不管电网”的思路,凭借控制性能强大的电力电子技术提升并网能源的安全可靠性^[6]。为解决这一问题,文献[7]首次提出建立同步发电机模型,从而控制电流达到增加系统惯量的目的;文献[8]提出一种虚拟惯量控制策略,将下垂控制与虚拟同步机控制结合;文献[9]模拟同步发电机的电磁、电气特性,具有较好的阻尼控制效果。在此基础上,不少学者对虚拟同步机算法进行了进一步研究,并通过仿真实验验证了虚拟同步机相较于传统控制方法更具有优势^[10-12]。

当电网出现出力变化或者负载投切的工况时,虚拟同步机可以模拟同步发电机的转子惯量与旋转阻尼等物理特性来维持稳定。虽然虚拟惯量越大,虚拟同步机支撑频率的能力越强,但是同样容易引起功率振荡。虚拟阻尼对功率振荡能起到抑制作用,但是阻尼系数过大系统的动态响应时间也随之增加^[13-16]。文献[17]提出一种超前滞后环节虚拟同步机控制策略,在传统虚拟同步机传递函数中加入了一个零点,系统的动态性能得到了改善,但是无法消除稳态误差。

针对上述问题,国内外学者提出了参数自适应控制方法来进一步提高虚拟同步机控制性能。虚拟同步机控制环有4个重要参数有功调频系数、无功调压系数、虚拟惯量和旋转阻尼系数^[18]。文献[19]提出一种基于电网实时工况而变化的虚拟惯量控制,根据电网实时频率与额定频率的偏差及变化率来选择2种不同的虚拟惯量,但这一方法未考

虑稳态中频率可能出现细小偏差,进一步可能导致惯量出现较大变动而降低系统稳定性;文献[20-26]研究惯量连续的变虚拟惯量虚拟同步机控制策略,但是没有对阻尼系数进行研究;文献[23]提出一种虚拟惯性自适应的控制策略,一定程度上提升了虚拟同步机控制性能,但是未对所设计的自适应控制给出较为详尽的设计理由;文献[24]提出虚拟惯量和阻尼系数同时自适应的控制策略,但是虚拟惯量自适应较为简单,不能根据不同的工况连续变化自适应值。

为了更好地提升逆变器地控制性能,本文在T型三电平逆变器主电路拓扑上,提出了一种基于分段指数函数的变虚拟惯量和阻尼系数虚拟同步机控制策略,其函数值在系统工作点稍微偏离稳定工作点时不会产生较大变化,而当工作点偏离稳定工作点较大时函数值会呈指数变化,使得工作点快速回到稳定工作点,且函数值有上下限,可以使得虚拟惯量不至于过大而引起系统振荡;另外,本文设计了旋转阻尼变参数控制,其变化方向与虚拟惯量变化方向相反,可以进一步有效减小系统的超调量,提高控制的动态响应性能。最后仿真验证,其结果验证了所提控制策略的有效性,为分布式能源接入电网的运行控制做出了有益探索。

1 VSG简介

1.1 VSG的基础特性

如图1所示,VSG控制的基本思想是让逆变器模仿同步发电机的外部特性和内部运行机理,从而提升含有大量新能源接入电网的稳定性。

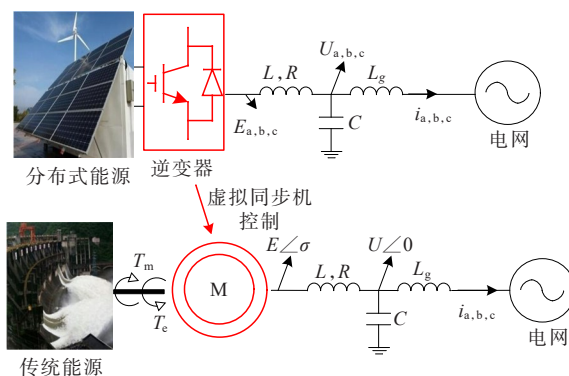


图1 同步发电机等效电路模型

Figure 1 Equivalent circuit model of synchronous generator

图2给出了虚拟同步机的主电路部分和控制部分。本文所研究的VSG为并网逆变器,因此需要考虑逆变器和电网的功角关系,取逆变器输出电压为

$E\angle\delta$, 电网电压为 $U_g\angle 0$ 。可以得到输出电流为

$$\dot{I} = \frac{E\angle\delta - U_g\angle 0}{Z} = \frac{E\angle\delta - U_g\angle 0}{R + jL} \quad (1)$$

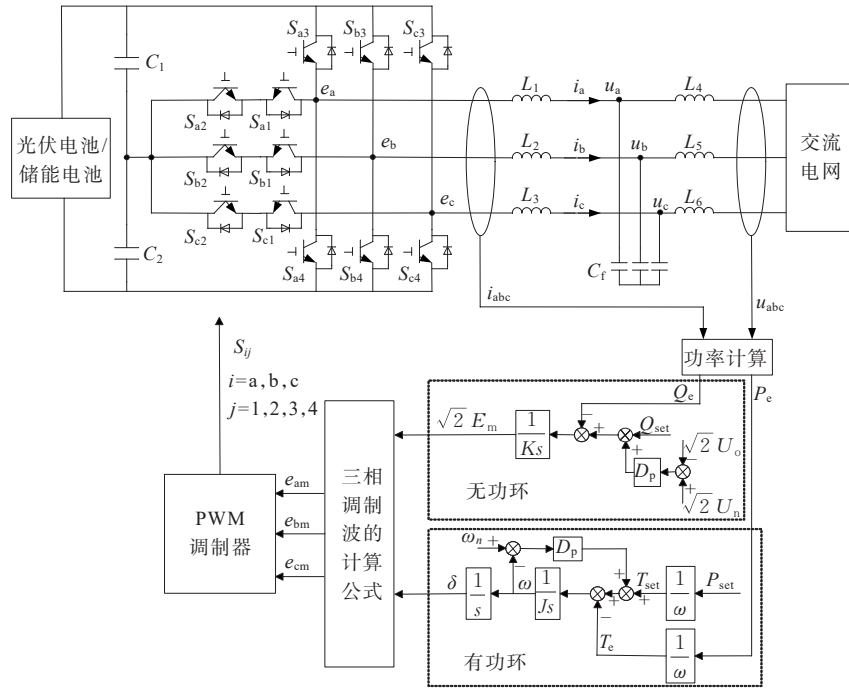


图2 虚拟同步机的整体结构

Figure 2 Overall block diagram of virtual synchronous generator

功角 σ 为电网与逆变器输出电压之间的相位差,其与角速度的关系为

$$\delta = \int (\omega - \omega_0) dt \quad (2)$$

有功功率与功角的关系为

$$P_e = \frac{EU}{\sqrt{R^2 + L^2}} \sin \delta \quad (3)$$

虚拟同步机的整体结构如图2所示。根据瞬时功率理论计算,可以得到逆变器的输出有功功率与输出无功功率^[25]为

$$\begin{cases} Q_e = e_\beta i_\alpha - e_\alpha i_\beta \\ P_e = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \end{cases} \quad (4)$$

三相电压电流经过克拉克变换得到 $e_\alpha, e_\beta, i_\alpha, i_\beta$ 。从同步发电机的电磁特性可以得出虚拟同步机的电磁特性方程,该方程模拟了同步发电机一次调压特性^[15]:

$$\sqrt{2} E_m = \frac{1}{K_s} \left[D_q (\sqrt{2} U_n - \sqrt{2} U_0) + (Q_{set} - Q_e) \right] \quad (5)$$

式中, E_m 为输出电压调制指令的有效值; D_q 为电压

下垂系数; U_n 为电压指令值; U_0 为滤波电容电压瞬时值; Q_{set} 为无功功率指令值; Q_e 为无功功率瞬时值。

考虑到调速器一次调频作用后的转子机械方程如下式所示^[15]:

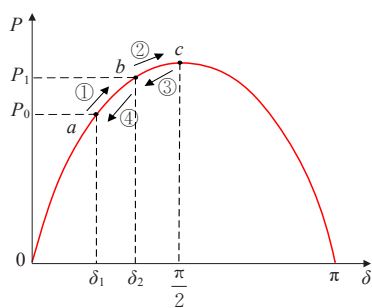
$$J(d\omega/dt) = T_m - T_e - D(\omega - \omega_{ref}) = P_{set}/\omega - P_e/\omega - D(\omega - \omega_{ref}) \quad (6)$$

式中, ω 为虚拟同步机瞬时角速度; ω_{ref} 为电网额定角速度; T_e 为电磁转矩; T_m 为机械转矩; 两者的方向相反; D 为阻尼系数; J 为虚拟转动惯量; P_{set} 为上层调度所发出的有功出力指令,一次调频系数对应于同步发电机的阻尼系数。

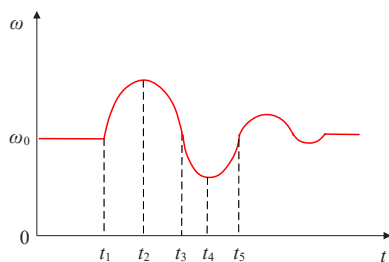
1.2 VSG的暂态特性

在实际工作状态下,逆变器的网侧和直流侧都有可能发生扰动。VSG控制的逆变器的功角曲线如图3所示。

假设虚拟同步机稳定工作点为 P_0 点,当直流侧输入功率增大时,输入功率由 P_0 增加到了 P_1 。在暂态过程中,VSG的工作点要反复循环经历如图3所



(a) 功角曲线



(b) 频率振荡曲线

图3 同步发电机功角曲线和频率振荡曲线

Figure 3 Power angle curve and frequency oscillation curve of synchronous generator

示的4个过程。在直流侧输入功率刚发生阶跃的时候,输入功率大于VSG的输出功率,VSG瞬时角速度增大, δ 值也随之增大,工作点由a点上升到b点;当到达b点以后,输入和输出功率相等,但是VSG的角速度大于网侧角速度,受惯性影响,工作点继续往上升,进入了过程2,输出功率大于输入功率,角速度减小;到达c点时,VSG角速度等于电网角速度,输出功率到达最大值,因此角速度将继续减小,进入过程3,过程3、4的分析同理。最后VSG工作状态将稳定在工作点b。

D_p 、 J 是VSG对同步发电机阻尼系数和转子惯量的模拟,而VSG不受物理结构的限制,其虚拟阻尼系数和虚拟惯量可以发生改变。因此,在适当的范围内,对虚拟阻尼系数和虚拟转动惯量进行调整,来改善系统稳定性。

2 变系数VSG控制

基于前文所述,本文提出的基本思想进一步分析如下。

1) 如图3所示,过程3和过程4的角速度在往

离开稳态工作点的方向变化,因此需要增大虚拟惯量来限制这种变化。

2) 过程1和过程3的角速度在往回到稳态工作点的方向变化,因此需要减小虚拟惯量使得系统尽量稳定在稳态工作点。

3) 过程2和过程4中系统的角频率处于加速状态,大惯量虽然可以增加稳定性,但是会影响动态响应速度,因此这个过程可以减小虚拟阻尼来提高系统的响应速度。

4) 当系统处于过程1和过程3时,情况相反,因此增大阻尼,使系统更快恢复稳定。

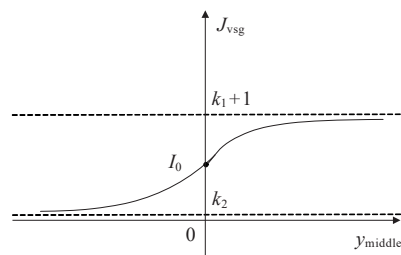
综上所述,机械惯性时间常数和虚拟旋转阻尼系数调整的分段函数公式如下:

$$y_{\text{middle}} = \frac{|\Delta\omega|}{\Delta\omega} \cdot \frac{|d\omega/dt|}{d\omega/dt} \cdot |d\omega/dt| \quad (6)$$

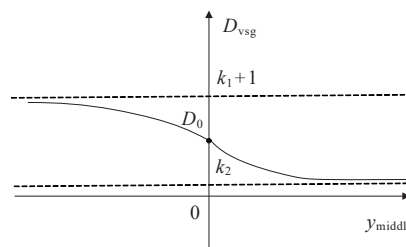
$$\begin{cases} J_{\text{vsg}} = J_0 \cdot [(k_1 + 1) - k_1 \cdot e^{-y_{\text{middle}}}] y_{\text{middle}} > 0 \\ J_{\text{vsg}} = J_0 \cdot [k_2 + (1 - k_2) \cdot e^{y_{\text{middle}}}] y_{\text{middle}} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} D_{\text{vsg}} = D_0 \cdot [k_2 + (1 - k_2) \cdot e^{-y_{\text{middle}}}] y_{\text{middle}} > 0 \\ D_{\text{vsg}} = D_0 \cdot [(k_1 + 1) - k_1 \cdot e^{y_{\text{middle}}}] y_{\text{middle}} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(6)~(8)中, k_1 、 k_2 均为大于零、小于1的常数; I_0 为初始虚拟惯量; D_0 为初始旋转阻尼系数。按照以上公式的调整以后,惯量及旋转阻尼与频率的关系如图4所示。



(a) 虚拟惯量与频率的关系曲线



(b) 旋转阻尼与频率的关系曲线

图4 虚拟惯量和旋转阻尼与频率的关系

Figure 4 Relationship between frequency and virtual inertia/rotational damping

由图4可知,随着频率增大,虚拟惯量将增大,但最小值大于 k_2 ;随着频率的减小,虚拟惯量将减小,但最大值小于 $1+k_1$;而阻尼系数的变化趋势跟虚拟惯量恰好相反。适当地设置 k_1 和 k_2 ,这样就能保证虚拟惯量和阻尼系数都在合适的范围内运行,且能够根据频率的变化连续实时地调整2个物理量,使系统能兼顾稳定性能和动态响应性能。

3 系统参数选择

根据文献[27]虚拟同步机功率输入输出的函数为一个二阶传递函数,其振荡角频率和阻尼系数可以表示为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{(UE)/(X_s J)} \\ \xi = 0.5D \sqrt{(UE)/(X_s J)} \end{cases} \quad (9)$$

式中, E 为VSG内电势; U 为VSG输出电压; X_s 为从逆变器到电网总阻抗。根据上述方程,参照自然振荡角频率范围可以得到初始虚拟惯量为

$$J_0 = UE/X_s \omega_n^2 \quad (10)$$

参照最佳阻尼比可以得到初始旋转阻尼系数为

$$D_0 = \sqrt{2J_0 UE/X_s} \quad (11)$$

文献[25]给出了VSG控制策略虚拟惯量的整定方法,即

$$J_{\max} = \frac{P_{\max}}{\max\left(\omega \frac{d\omega}{dt}\right)} \quad (12)$$

虚拟同步机的实际瞬时频率和实际瞬时功率的关系可以表示为

$$P_m = P_{\text{ref}} - K(\omega - \omega_0) \quad (13)$$

其中, K 为调节系数, P_{ref} 为给定有功功率,进而可以得到旋转阻尼系数的最小值为

$$J_{\min} = \frac{D_0/J_0}{[(P_{\max} - P_{\min})/(\omega_{\max} - \omega_{\min}) - K]} \quad (14)$$

本文所设计的系统初始参数如下:直流侧电压为800 V,电网电压为220 V,初始输出功率为10 kW,电网频率为50 Hz,开关频率为10 kHz,直流侧电容的电容量均为 5×10^{-4} F,滤波电容的电容量为 2×10^{-5} F,滤波电感 L_1 - L_3 的电感量为 0.6×10^{-3} H,

滤波电感 L_4 - L_6 的电感量为 0.3×10^{-4} H。按照文献[25]的整定方法,虚拟同步机仿照同步发电机自然振荡频率为 $0.628 < \omega_n < 15.700$,最佳阻尼比为0.707,系统相位裕度在 30° 到 70° 之间,截至频率取值为7.9~12.5 Hz,可以得到虚拟惯量 J 的最大值为0.069,最小值为0.002,初始值取为0.052。为了让系统稳定性能更好,将虚拟惯量取值范围适度取小,最大值取为初始值的1.2倍(0.062),最小值取为初始值的0.1倍(0.005)。按照前文公式,可以得出 k_1 为0.2, k_2 为0.9。此时阻尼系数也是在稳定范围内变动,此处不再赘述。

4 仿真验证

为验证本文所提出来的VSG控制策略及参数选择的正确性,对比无变系数VSG控制,按照本文方法在Matlab/Simulink平台上搭建了仿真。

初始有功功率指令值为10 kW,采样频率为LCL滤波器电容处的电压频率。如图5所示,PLL锁相环的初始频率为50 Hz,由于逆变器和电网需要初始同步,因此频率出现了一段波动过程。图5中,无变系数自适应控制系统的频率波形最小值为49.43 Hz,而有变系数自适应系统的频率波形最小值为49.30 Hz,从图5也能明显看到变系数系统的频率波动更小。变系数自适应控制系统的频率在0.26 s处稳定到了50 Hz,低于电网要求标准(0.3 s),而无变系数自适应系统的频率在0.32 s才稳定到额定值,变系数自适应系统稳定时间缩短了0.06 s。

仿真在0.33 s处设置了45 kW的输入功率阶跃增量,变系数自适应系统频率在0.51 s处稳定到了

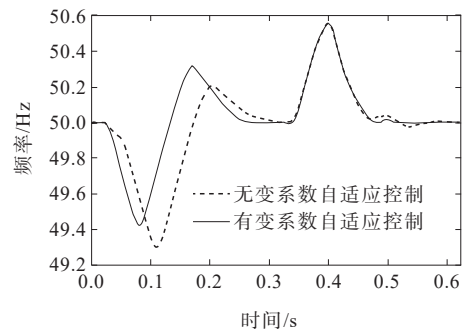
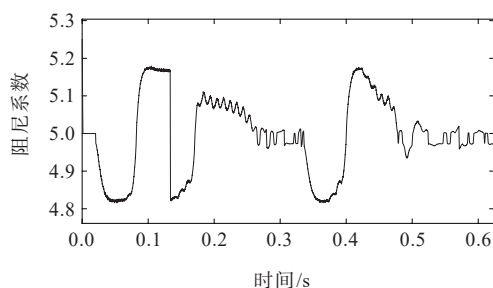


图5 变系数控制前后频率波形

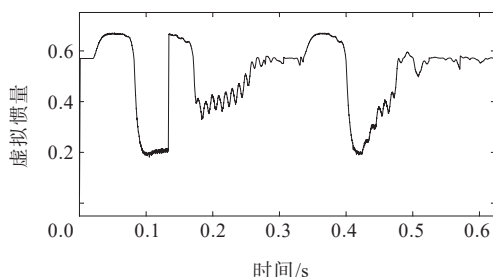
Figure 5 Frequency waveforms before and after variable efficient control

额定值,无变系数自适应系统在0.56 s恢复到额定值,变系数自适应系统稳定时间缩短了0.05 s。因此,变系数控制能有效地提升系统的动态响应速度。

虚拟惯量和阻尼系数波形如图6所示,可以看到虚拟惯量一直和阻尼系数的变化趋势相反,且两者的初始值、最大值和最小值都符合前文所述。输出功率与电流波形如图7所示。



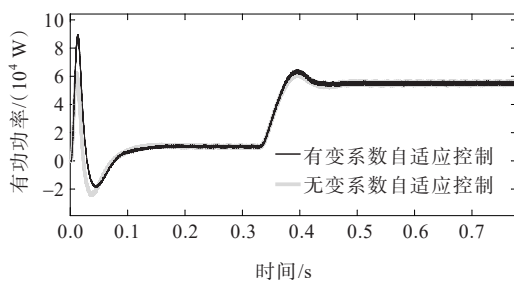
(a) 虚拟惯量波形



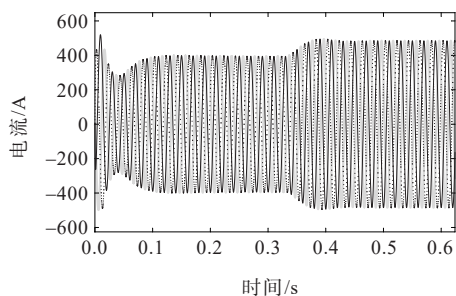
(b) 阻尼系数波形

图6 虚拟惯量和阻尼系数波形

Figure 6 Waveforms of virtual inertia and damping coefficient



(a) 有功功率的输出波形



(b) 输出三相电流波形

图7 输出功率和电流波形

Figure 7 Output power and current waveforms

由图7(a)可知,有变系数自适应控制系统与无变系数自适应控制系统的有功功率基本都在0.15 s处稳定在了10 kW,在0.45 s处稳定在了55 kW,可以看出虚拟同步机控制能够有效地稳定输出功率。但是在系统运行初期,有功功率输出为0,而指令值为10 kW,可以看出有变系数自适应控制曲线输出功率更大,意味着变系数自适应控制系统能够更快地弥补功率缺额,并且随后的超调量也明显小于无变系数自适应控制系统。此外,变系数自适应控制系统输出的有功功率能更快地恢复到稳定值。图7(b)为变系数自适应控制系统的电流波形,可以看出电流经大扰动以后恢复到了稳态值。

5 结语

本文研究一种基于指数分段函数的变系数VSG控制策略,通过储能模拟同步发电机的转子对逆变器提供虚拟惯量,同时使得虚拟惯量和旋转阻尼进行自适应调整来应对直流侧功率出力变化导致的电网振荡;然后设计相关的主电路与控制系统参数;最后通过搭建仿真,设置VSG初始并网运行以及输入功率增加2种不同的扰动工况。仿真运行结果充分证明本文所采用自适应系数方法能提高并网逆变器的动态响应速度及稳定性,为通过发电侧储能来提升分布式新能源并网稳定性提供一种可行途径。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 北京:能源基金会,2015.
Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. China 2050 high percentage renewable energy development scenario and pathway study[R]. Beijing:Energy Foundation,2015.
- [2] 郝艺博,杜锡力,李笑竹,等. 考虑储能性能差异的新能源场站群共享储能交易模式[J]. 发电技术,2022,43(5): 687-697.
HAO Yibo, DU Xili, LI Xiaozhu, et al. Shared energy storage trading mode of new energy station group considering energy storage performance difference[J]. Power Generation Technology, 2022,43(5): 687-697.

- [3] 张程,匡宇,刘佳静,等.考虑需求侧管理的风光燃储微网两阶段优化调度[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):13-22.
ZHANG Cheng, KUANG Yu, LIU Jiajing, et al. Two-stage optimal scheduling of a wind, photovoltaic, gas turbine, fuel cell and storage energy microgrid considering demand-side management[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 13-22.
- [4] 郇政林,刘杰,徐沈智,等.面向高比例新能源接入的源—荷—储灵活性资源协调规划[J].电网与清洁能源,2022,38(7):107-117.
HUAN Zhenglin, LIU Jie, XU Shenzhi, et al. Source-load-storage flexibility resource coordinated planning for high proportion of renewable energy[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 107-117.
- [5] 张涛,霍然,刘景,等.基于柔性互联技术的含高渗透率新能源配电网多目标优化运行[J].智慧电力,2021,49(9):1-7.
ZHANG Tao, HUO Ran, LIU Jing, et al. Multi-objective optimal operation of distribution network with high penetration of new energy based on flexible interconnection technology[J]. Smart Power, 2021, 49(9): 1-7.
- [6] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017,37(2):349-360.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [7] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]// 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, Spain, 2007.
- [8] 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+36.
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+36.
- [9] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [10] 管敏渊.虚拟同步机运行状态下并网储能系统自动能量控制[J].电力系统自动化,2022,46(23):144-150.
GUAN Minyuan. Automatic energy control of grid-connected energy storage system under virtual synchronous generator operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 144-150.
- [11] 徐政,张哲任,薛翼程.全能型静止同步机及其实现[J].高压电器,2022,58(7):1-10.
XU Zheng, ZHANG Zheren, XUE Yicheng. Versatile static synchronous machine and its realization[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 1-10.
- [12] 马成松,赵耀.基于双机并联虚拟同步机系统的自适应控制策略研究[J].电测与仪表,2022,59(4):191-200.
MA Chengsong, ZHAO Yao. Research on adaptive control strategy based on two-machine parallel virtual synchronous machine system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 191-200.
- [13] 石荣亮,张兴,刘芳,等.提高光储柴独立微网频率稳定性的虚拟同步发电机控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(22):77-85.
SHI Rongliang, ZHAN Xing, LIU Fang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator for improving frequency stability of islanded photovoltaic-battery-diesel microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 77-85.
- [14] 杨向真,苏建徽,丁明,等.微电网孤岛运行时的频率控制策略[J].电网技术,2010,34(1):164-168.
YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.
- [15] 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 Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-349.
- [16] 张冠锋,杨俊友,王海鑫,等.基于虚拟同步机技术的风储系统协调调频控制策略[J].电工技术报,2022,37(S1):83-92.
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, WANG Haixin, et al. Coordinated frequency modulation control strategy of wind storage system based on virtual synchro technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 83-92.
- [17] 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):1918-1926.
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): 1918-1926.
- [18] 张福民,白松,李占凯,等.基于VSG技术的微电网储能荷电状态控制策略[J].电网技术,2019,43(6):2109-2116.
ZHANG Fumin, BAI Song, LI Zhankai, et al. Control

- strategy for microgrid storage system's state of charge based on virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2109-2116.
- [19] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. 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.
- [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 Qiong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Improved adaptive control of inertia for virtual synchronous generators in islanding microgrid with multiple distributed generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 412-424.
- [21] 匡玉麟. 一种基于自适应虚拟同步机的MTDC控制策略[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- KUANG Yulin. A MTDC control strategy based on adaptive virtual synchronizer[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [22] 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.
- [23] 刘尧, 陈建福, 侯小超, 等. 基于自适应虚拟惯性的微电网动态频率稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 81-88+146.
- LIU Yao, CHENG Jianfu, HOU Xiaochao, et al. Dynamic frequency stability control strategy of microgrid based on adaptive virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 81-88+146.
- [24] 杨赟, 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 Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, 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.
- [25] 颜湘武, 张伟超, 崔森, 等. 基于虚拟同步机的电压源逆变器频率响应时域特性和自适应参数设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 241-254.
- YAN Xiangwu, ZHANG Weichao, CUI Sen, et al. Frequency response characteristics and adaptive parameter tuning of voltage-sourced converters under VSG control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 241-254.
- [26] 王自力, 陈燕东, 伍文华, 等. 不同容量VSG并联的自适应谐波阻抗重塑均流控制方法及其稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8571-8584.
- WANG Zili, CHEN Yandong, WU Wenhua, et al. Adaptive harmonic impedance reshaping current-sharing control method of parallel VSGs with different capacities and its stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8571-8584.
- [27] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.
- WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.