

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.019

基于VSG的并网变流器惯量阻尼综合自适应控制

赵晨聪¹, 谢宙桦², 周飞航³

(1. 西安文理学院人工智能与大数据学院, 西安 710065; 2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054;
3. 西安邮电大学自动化学院, 西安 710121)

摘要: 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术可以模拟同步发电机的特性,具有惯性、阻尼、调频调压等优点,能够提升系统频率的稳定性。当电网频率出现波动时,在风电并网逆变器的控制中引入VSG控制技术可用于支撑电网频率。由于固定惯量阻尼的VSG控制暂态超调较大,频率易超出频率波动阈值。针对此问题,通过建立VSG的小信号模型,分析了转动惯量及阻尼系数对频率稳定性的影响,并提出了一种考虑阻尼比的转动惯量阻尼综合自适应控制方案,在电网频率波动情况下,改善了系统的暂态性能,进一步提升了频率的稳定性。仿真对比结果表明,所提控制策略与传统固定惯量阻尼的VSG控制及转动惯量阻尼交错自适应VSG控制相比具有优越性。

关键词: VSG控制技术; 频率波动; 转动惯量; 阻尼; 自适应控制

Integrated Adaptive Control of Inertia Damping for Grid Connected Converter Based on VSG

ZHAO Chencong¹, XIE Zhouhua², ZHOU Feihang³

(1. School of Artificial Intelligence and Big Data, Xi'an University, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 3. School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Virtual Synchronous Generator (VSG) technology can simulate the characteristics of synchronous generator, offering such advantages as inertia, damping, frequency and voltage regulation, thereby improving the stability of the system frequency. In case of grid frequency fluctuation, the introduction of VSG control technology into the control of wind power grid connected inverter can support the grid frequency. Due to the large transient overshoot associated with VSG control under fixed inertia damping, the frequency is prone to exceeding the frequency fluctuation threshold. To address this issue, a small signal model of VSG is established to analyze the influence of moment of inertia and damping coefficient on frequency stability. Furthermore, an integrated adaptive control scheme for inertia and damping that accounts for the damping ratio is proposed, which improves the transient performance of the system and further enhances frequency stability under grid frequency fluctuations. The comparative simulation results show that the proposed control strategy exhibits advantages over both conventional VSG control with fixed inertia damping and the VSG control with staggered adaptive inertia and damping.

Key words: VSG control technology; frequency fluctuation; moment of inertia; damping; adaptive control

0 引言

随着风力发电的快速发展,考虑到风能具有间歇性和波动性等特点,若将大规模的风电通过电力

电子变换器接入电网,则会对电网的稳定性产生强烈冲击^[1-9]。由于VSG控制技术可以模拟同步发电机的特性,相比于传统的逆变器控制方法具有惯性、阻尼、调频调压等优点,因此有学者提出采用

收稿日期:2026-02-13; 修回日期:2026-05-08

基金项目:西安市自然科学基金项目资助(2025JH-ZRXX-0553);西安市科技计划项目(25FWQY09)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Xi'an(2025JH-ZRXX-0553), Xi'an Municipal Science and Technology Program(25FWQY09).

VSG控制技术来提升系统频率的稳定性^[10-16]。

在文[17-18]中采用了VSG控制方法,使得在频率变化的过程中出现了一个过渡过程,表现出了与同步发电机转子惯性相似的特性,这是由于在VSG控制中存在转动惯量的作用。虽然VSG和同步发电机具有等效的运行机制,但是在该文献中采用的是固定惯量阻尼的VSG控制技术,暂态超调较大,频率易超出频率波动阈值。与固定的参数值相比,由于转动惯量具有虚拟化的特点,可根据实际应用场景采用自适应控制方法选取更合适的值,因此文[19]通过分析Bang-Bang控制,研究了一种具有交替转动惯量的VSG控制方案,能够对频率进行有效控制,并且频率的响应速度较快,但是该方法并未提及到转动惯量的具体计算方法。文[20]根据频率的变化速度提出了一种调节虚拟转动惯量的控制方法,基于设置的工作模式来选取不同的虚拟转动惯量,进而实现对系统频率的调节,但是该控制方法无法对转动惯量进行连续调节。文[21]通过分析并控制灵敏度因子,提出了自适应转动惯量上下限的选取方法,实现了在频率扰动下的自适应惯性控制,提高了系统的响应速度,并减小了超调量。文[22]对转动惯量的变化进行了分析,提出了一种转动惯量自适应控制方案,满足了频率超调较小以及系统具有快速动态响应的要求。文[23]根据输出频率和额定值之间的偏差程度来动态调节转动惯量,提高了频率的稳定性。上述文献虽然可以在一定程度上提升系统频率的稳定性,但均忽略了阻尼系数对改善频率稳定性的作用。文[19]基于输出功率的实际值和参考值之间的差值,提出了一种阻尼自适应控制方法。文[24]分析了虚拟阻尼对系统频率的影响,通过分析小信号模型,提出了自适应调节阻尼系数的方法,缩短了调节时间。文[25-27]同时考虑了转动惯量以及阻尼系数,并讨论了转动惯量及阻尼系数的选取方法。由于系统的阻尼比对系统的稳定运行起着至关重要的作用,而上述文献中均未考虑阻尼比对系统频率稳定性的影响。

针对上述问题,文中提出了一种考虑阻尼比的转动惯量阻尼综合自适应控制方案。首先,介绍了VSG的控制原理及控制结构;其次,建立了VSG的小信号模型,分析了转动惯量及阻尼对系统性能的影响,并根据频率的波动程度,通过选取合适的阻尼比,避免了阻尼比过大或过小对系统稳定运行造成的影响^[28-32]。最后,通过仿真对比结果可得出,在电网频率波动的情况下,所提控制方案可以改善系统的暂态性能,进一步提升了频率的稳定性。

1 VSG的控制原理

1.1 VSG基本原理

VSG控制的实质是将同步发电机的特性方程引入到逆变器的控制当中,使得逆变器具有与同步发电机类似的外特性。因此,VSG控制相比于传统逆变器控制方法具有惯性、阻尼、调频调压等优点。VSG的拓扑结构见图1。图1中: e_a, e_b, e_c 为感应电势; R, L 分别为定子电阻、电感; P_e, Q_e 分别为VSG输出有功功率、无功功率; P_{ref}, Q_{ref} 分别为有功功率及无功功率的参考给定值; J_0 为转动惯量初始值; k 为转动惯量自适应调节系数; ζ 为系统阻尼比。

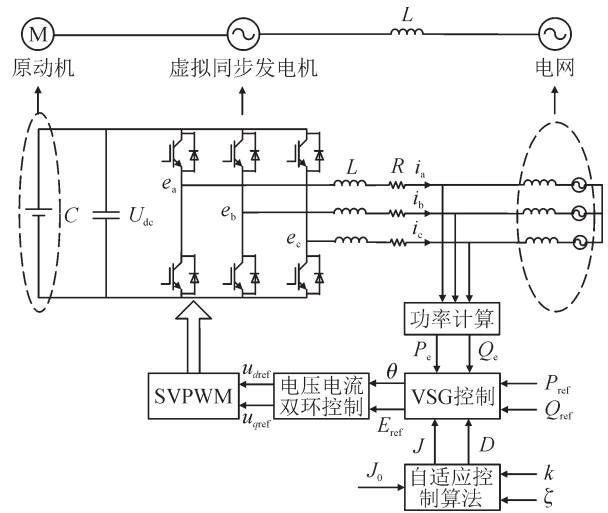


图1 VSG拓扑结构

Fig. 1 The topology of VSG

一般发电机数学模型的阶次有2、3、5次等,但考虑到3次及5次模型结构复杂,不易实现。因此本节参考二阶发电机的数学模型对VSG进行建模,建模主要分为两部分,一是电磁部分,二是机械运动部分。

根据三相坐标系下的定子电气方程,可得出电磁方程为

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc} \quad (1)$$

机械运动部分是建立在转子运动方程之上的,也是实现VSG技术的关键环节,可表示为

$$\begin{cases} T_m - T_e - D(\omega - \omega_n) = J \frac{d\omega}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω, ω_n 分别为实际和额定角速度; D 为阻尼系数; J 为转动惯量。

根据功率和转矩的关系,可得

$$\begin{cases} P_m = T_m \omega \approx T_m \omega_n \\ P_e = T_e \omega \approx T_e \omega_n \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: P_m 为VSG的机械功率; P_e 为电磁功率。

根据式(3)可将式(2)改写为

$$\begin{cases} P_m - P_e - D\omega_n(\omega - \omega_n) = J\omega_n \frac{d\omega}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

虚拟转动惯量 J 可以使VSG在功率—频率调节的过程中表现出一定的惯性。阻尼系数 D 则可以在一定程度上抑制系统的振荡。

1.2 VSG控制结构

VSG控制不仅可以保留传统的逆变器环节, 还能够类比出同步发电机的外特性。为了实现VSG控制技术, 外环设为有功频率环及无功电压环, 内环为电压电流环。有功频率环的控制可根据式(4)来实现, 无功—电压环控制主要是通过控制无功功率的偏差进而实现对电压的调节。由于调节励磁电流即可实现对无功功率的调节, 因此无功—电压控制实际上是类比了同步发电机的励磁调节能力。

根据无功功率的偏差值来调节电压幅值的表达式为

$$E_{\text{ref}} = U_n + \frac{K}{s}(Q_{\text{ref}} - Q_c) \quad (5)$$

式(5)中: E_{ref} 为输出电压指令值; U_n 为电压额定值; K 为无功功率调节系数。

通过对有功—频率环以及无功—电压环的控制可以获取VSG虚拟内电势的相角 θ 以及电压幅值 E_{ref} , 进而可以得出电压环的电压参考指令为

$$\begin{cases} e_a = E_{\text{ref}} \sin \theta \\ e_b = E_{\text{ref}} \sin(\theta - 120^\circ) \\ e_c = E_{\text{ref}} \sin(\theta + 120^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

e_{abc} 和定子上的压降相减可得出 u_{abc} 。定子上的压降是由于定子上的电感以及其等效电阻而形成的。一般情况下, 同步发电机具有较大的输出阻抗, 这一特性能够有效避免输出电流的突变。然而

在实际的情况中, 逆变器的输出阻抗普遍较小, 不能有效的防止电流变化。同时, 考虑到逆变器的过载能力一般较差, 这样容易导致设备受损。因此, 为了模拟同步发电机具有较大阻抗的这一特性, 需要在VSG控制过程中增加虚拟阻抗。

在电感 L 的基础上附加一个虚拟电感 L_v 与其串联起来, 进而使逆变器具有较大的阻抗, 并保证 $\omega(L_v + L) \gg R$, 使线路阻抗呈感性, 在这样的情况下, 可不计有功频率环和无功电压环之间的耦合。基于上述分析可得出, 引入虚拟阻抗后的电压环控制结构见图2。

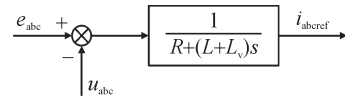


图2 附加虚拟阻抗的电压环结构

Fig. 2 The structure of voltage loop structure with additional virtual impedance

电流环的控制结构见图3。图3中: $G(s)$ 为QPCI控制器传递函数, QPCI控制器^[24]具有可以对交流信号进行有效控制的特点, 并且带宽较大, 能够降低频率的偏移对系统造成的影响, 因此采用QPCI控制器来控制三相并网电流。 $i_{abc\text{ref}}$ 为电流的参考值, i_{abc} 为实际的输出电流值。

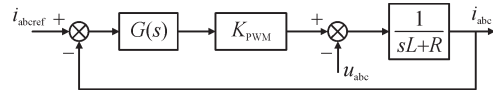


图3 电流环控制结构

Fig. 3 Current loop control structure

根据上述分析可得出, VSG的控制结构见图4。有功功率的偏差值以及无功功率的偏差值分别作为有功—频率环和无功—电压环的输入信号。通过有功—频率环控制以及无功—电压环控制后, 可得出相位信号 θ 以及输出电压幅值信号 E_{ref} 。该相位信号和电压幅值信号可以合成参考电压, 并通过电压和电流内环控制得到输出电压信号, 经SVPWM调制, 生成开关信号, 从而实现对变流器的控制。

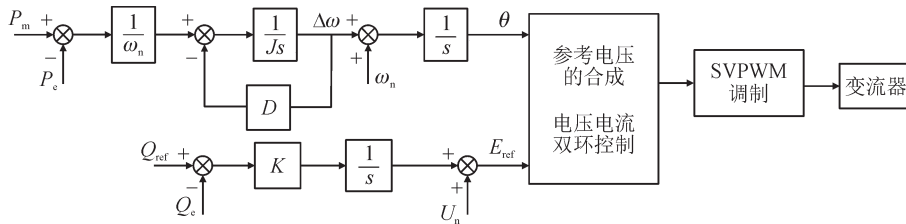


图4 VSG控制结构

Fig. 4 The control structure of VSG

2 VSG控制参数分析

2.1 VSG小信号模型

根据VSG的有功调频以及无功调压特性,为了分析惯量和阻尼对系统动态性能及稳态性能的影响,本节利用传统小信号分析法建立VSG的小信号模型。VSG的等效电路见图5。图5中, Z 为线路阻抗。

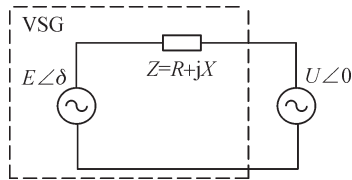


图5 VSG等效电路

Fig. 5 VSG equivalent circuit

在并网条件下,设置VSG在并网点处的电压参考相量为 $U\angle 0^\circ$, 并网变流器的输出电压相量为 $E\angle\delta$, δ 为功角,可定义为

$$\delta = \int (\omega - \omega_g) dt \quad (7)$$

式(7)中, ω_g 为电网角速度。

VSG的视在功率可表示为

$$S = 3UI^* = 3U \frac{E\angle -\delta - U\angle 0}{R - jX} = \frac{3U}{Z} [E \cos(\alpha - \delta) - U \cos \alpha + jE \sin(\alpha - \delta) - jU \sin \alpha] = P_e + jQ_e \quad (8)$$

式(8)中, α 为阻抗角,可表示为 $\alpha = \arctan(X/R)$, 线路阻抗在一般情况下认为是呈感性的,因此, $\alpha \approx 90^\circ$, 式(8)可展开并化简为

$$\begin{cases} P_e = \frac{3EU \sin \delta}{Z} \\ Q_e = \frac{3(EU \cos \delta - U^2)}{Z} \end{cases} \quad (9)$$

对VSG进行小信号建模的步骤如下:

第1步时域方程的线性化。对VSG模型中的各个状态变量在静态工作点处叠加小扰动信号,可表示为

$$\begin{cases} \delta = \delta_0 + \hat{\delta} \\ \omega_g = \omega_{g0} + \hat{\omega}_g \\ \omega = \omega_0 + \hat{\omega} \\ P_m = P_{m0} + \hat{P}_m \\ P_e = P_{e0} + \hat{P}_e \\ E = E_0 + \hat{E} \\ Q_{ref} = Q_{ref0} + \hat{Q}_{ref} \\ Q_e = Q_{e0} + \hat{Q}_e \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中:下标中包含“0”的为变量的直流分量,即稳态解;上标中包含“^”的为小扰动信号。

在感性电路下,可近似认为 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$ 。消除其中的直流分量,忽略二次及以上扰动量,则可推导出VSG的小信号表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\delta}}{dt} = \hat{\omega} - \hat{\omega}_g \\ J \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \frac{\hat{P}_m}{\omega_n} - \frac{\hat{P}_e}{\omega_n} - D\hat{\omega} \\ \hat{P}_e = \frac{3U\delta_0}{Z} \hat{E} + \frac{3UE\delta_0}{Z} \hat{\delta} = K_{PE} \hat{E} + K_{P\delta} \hat{\delta} \\ \frac{d\hat{E}}{dt} = K(\hat{Q}_{ref} - \hat{Q}_e) \\ \hat{Q}_e = \frac{3U}{Z} \hat{E} - \frac{3UE\delta_0}{Z} \hat{\delta} = K_{QE} \hat{E} + K_{Q\delta} \hat{\delta} \end{cases} \quad (11)$$

第2步对线性化后的方程进行拉氏变换。对式(11)进行拉普拉斯变换,可得

$$\begin{cases} s\hat{\delta}(s) = \hat{\omega}(s) - \hat{\omega}_g(s) \\ (Js + D)\hat{\omega}(s) = [\hat{P}_m(s) - \hat{P}_e(s)]/\omega_n \\ \hat{P}_e(s) = K_{PE} \hat{E}(s) + K_{P\delta} \hat{\delta}(s) \\ \hat{E}(s) = \frac{K}{s} [\hat{Q}_{ref}(s) - \hat{Q}_e(s)] \\ \hat{Q}_e(s) = K_{QE} \hat{E}(s) + K_{Q\delta} \hat{\delta}(s) \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12),可得出VSG的小信号模型见图6。由图6可看出,有功—频率环及无功—电压环之间存在耦合,即图中用虚线表示的部分。考虑到在感性线路下,该耦合分量可以忽略不计。

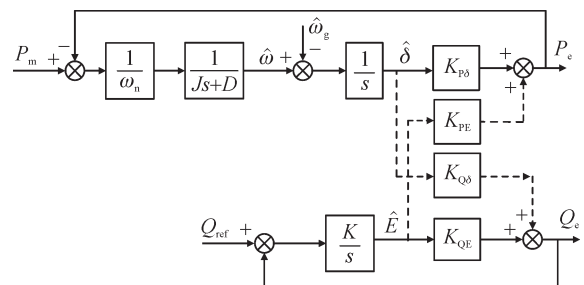


图6 VSG小信号模型

Fig. 6 The small signal model of VSG

2.2 惯量阻尼对系统性能的影响

为了分析在电网频率波动的情况下,如何通过调整惯量和阻尼来提升频率的稳定性,在此主要分析惯量和阻尼对有功频率环的影响。根据图6所示的VSG小信号模型可推导出有功—频率控制环的开环传递函数 $G_{kp}(s)$ 和闭环传递函数 $G_p(s)$ 分别为

$$G_{kp}(s) = \frac{3EU}{JZ\omega_n s^2 + DZ\omega_n s} \quad (13)$$

$$G_p(s) = \frac{3EU}{JZ\omega_n s^2 + DZ\omega_n s + 3EU} \quad (14)$$

根据式(13)、(14),通过劳斯判据可得出有功—频率环稳定的充要条件为

$$\begin{cases} J > 0 \\ D > 0 \end{cases} \quad (15)$$

式(14)属于一个典型的二阶系统,针对该二阶系统可以计算出系统阻尼比 ζ 以及自然振荡角频率 ω_n 分别为:

$$\zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{Z\omega_n}{3JEU}} \quad (16)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{3EU}{JZ\omega_n}} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可看出,阻尼比 ζ 和自然振荡角频率 ω_n 相关于惯量 J 和阻尼系数 D 。为了研究 J 和 D 对有功一频率环控制的影响,在欠阻尼工作状态下对该二阶系统的性能指标进行分析讨论, J 和 D 的改变对动态性能指标的影响见表1。

表1 J 和 D 对动态性能指标的影响

Table 1 Influence of J and D on dynamic performance index

参数指标	上升时间	调节时间	超调量	峰值时间
D 不变, J 增大	增大	增大	增大	减小
J 不变, D 增大	增大	减小	减小	增大

为了更加直观的分析出 J 和 D 对系统性能的影响。以 D 作为常量,以 J 作为变量变化时的有功环根轨迹见图7。由图7可以看出,随着 J 的增大,有功环的根轨迹逐渐向虚轴靠近,这将会导致系统的稳定性下降,因此 J 的取值不能太大,在文中 J 的初始取值为0.5。

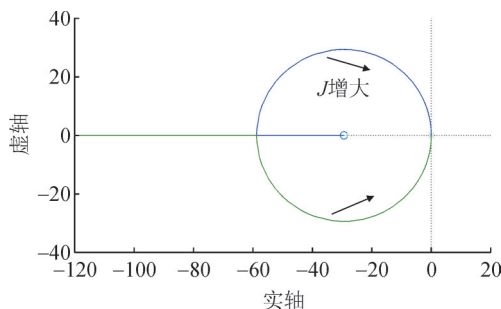


图7 有功环根轨迹受 J 变化的影响

Fig. 7 The root locus of active power loop affected by the change of J

在 J 不变,以 D 作为变量变化时的有功环根轨迹见图8。由图8可以分析出,随着 D 的增大,有功环的根轨迹逐渐远离虚轴,系统的稳定性得以提升。若 D 继续增大,则根轨迹将与负实轴重合,出现系统过阻尼的情况,系统的响应速度将会减慢。

3 电网频率波动下VSG的自适应控制

3.1 惯量阻尼控制

VSG 功角曲线见图9(a), 频率暂态变化曲线见图9(b)。当系统受扰动后,功率会发生变化,根据有

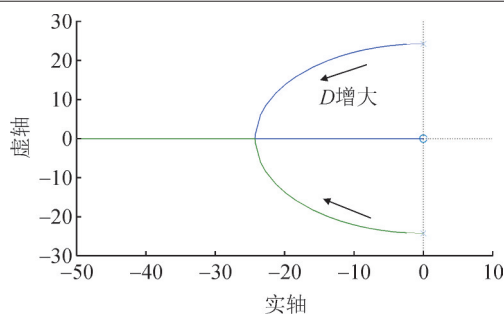
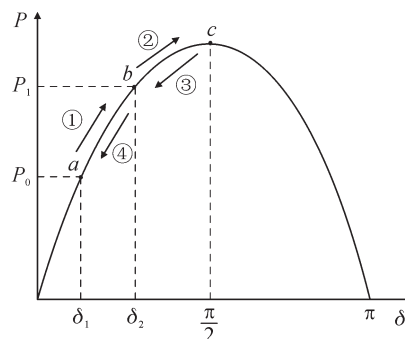


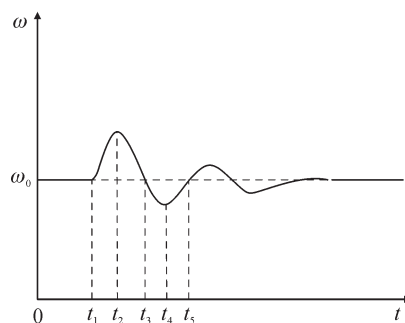
图8 有功环根轨迹受 D 变化的影响

Fig. 8 The root locus of active power loop is affected by the change of D

功调频原理可知,系统的频率也随之变化。由VSG的功角曲线中可以看出,当功率发生变化,由 P_0 上升至 P_1 时,功角会出现重复振荡衰减的一个过程,稳态点也将会从原来的 a 点变化至 b 点。将一个振荡周期分为不同的区间,如图9(a)中的①-④,分别对应 $t_1 \sim t_2$ 、 $t_2 \sim t_3$ 、 $t_3 \sim t_4$ 、 $t_4 \sim t_5$ 。由于不同区间内具有不同的功角变化特性,因此为了获取更好的控制效果,需要采用的转动惯量以及阻尼系数也不同。



(a) 同步发电机的功角曲线



(b) 同步发电机转子角频率振荡曲线

图9 VSG 功角曲线和频率暂态变化曲线

Fig. 9 Power angle and frequency transient change curve of VSG

在系统发生功率扰动时采用传统的固定转动惯量以及阻尼系数下的频率偏差以及频率变化率的仿真波形见图10。通过分析在一个振荡周期内的4个区间中角频率的偏差以及角频率的变化率,对转动惯量大小的调节进行分析讨论。

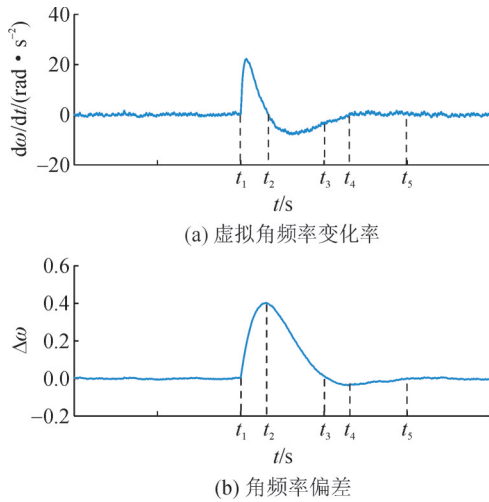


图10 VSG 虚拟角频率变化率及偏差

Fig. 10 Virtual angular frequency change rate and deviation of VSG

在VSG的有功调频控制中,除了虚拟转动惯量以外,阻尼系数也是很关键的参数,也可以起到提升频率稳定性的作用。转动惯量阻尼自适应控制的分析过程如下:

1) $t_1 \sim t_2$ 区间。 $\Delta\omega > 0, (d\omega/dt) > 0$, 说明了在此区间内频率的偏差正在向增大的方向变化。由于 J 的变化趋势和频率变化率的变化趋势相反,若只考虑调节转动惯量,该区间内可以通过增大 J 来减小频率的变化率,进而抑制频率的快速增加。如若考虑在此区间内增加 D , D 的增大会降低系统的峰值频率偏差,但是增加了频率的初始变化率,这和增大 J 的作用是相反的。在初始阶段应该减小频率的初始变化率。因此,在该区间内只增大转动惯量 J , 保持阻尼系数 D 不变。

2) $t_2 \sim t_3$ 区间。 $\Delta\omega > 0, (d\omega/dt) < 0$, 若只考虑调节转动惯量,则在该区间内应该减小 J , 增大频率的变化率,实现频率的快速稳定。但是由于 $t_4 \sim t_5$ 区间和该区间的转动惯量调节方式一样,频率变化率的提高可能会导致振荡次数增加,在 $t_4 \sim t_5$ 区间内会抑制频率快速的稳定在额定值内。若在此区间内增大 D , 则会减小频率的偏差,有助于提高频率的稳定性。因此,在此区间内选择增大 D , 保持转动惯量 J 不变。

3) $t_3 \sim t_4$ 区间。 $\Delta\omega < 0, (d\omega/dt) < 0$, 该区间内 J 和 D 的调节方式和 $t_1 \sim t_2$ 区间一致,即增大 J , 保持 D 不变。

4) $t_4 \sim t_5$ 区间。 $\Delta\omega < 0, (d\omega/dt) > 0$, 该区间内 J 和 D 的调节方式和 $t_2 \sim t_3$ 区间一致,即增大 D , 保持 J 不变。

基于上述分析可得出转动惯量 J 以及阻尼系数 D 的调节方式分别为:

$$J = \begin{cases} J_0 & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} \leq 0 \cup \left| \frac{d\omega}{dt} \right| < G_j \\ J_0 + k \left| \frac{d\omega}{dt} \right| & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} > 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > G_j \end{cases} \quad (18)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} \geq 0 \cup \left| \frac{d\omega}{dt} \right| < G_d \\ D_0 + \lambda |\Delta\omega| & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} < 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > G_d \end{cases} \quad (19)$$

式(18)、(19)中: J_0 、 D_0 分别为 J 、 D 的初始值; G_j 、 G_d 分别为 $\left| \frac{d\omega}{dt} \right|$ 阈值; k 、 λ 分别为 J 、 D 的调节系数。

该惯量阻尼自适应方法是将频率的一个振荡周期分为不同的区间来进行分析,实现了 J 和 D 的交错控制,但由于 J 和 D 均是可变的,并且是相对独立的。系统的阻尼比在不同的区间内也是不同的,有可能会出现过或过小的情况,影响系统的稳定运行,因此在控制过程中考虑系统的阻尼比是至关重要的。

3.2 考虑阻尼比的惯量阻尼自适应控制

为了分析阻尼比对频率的影响,将式(2)可以改写为

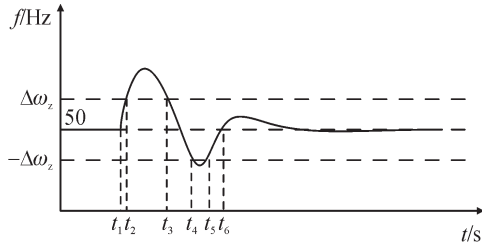
$$T_m - T_e - J \frac{d\omega}{dt} = D(\omega - \omega_n) = D\Delta\omega \quad (20)$$

由式(20)可以看出,在 $T_m - T_e - J(d\omega/dt)$ 一定时, D 和 $\Delta\omega$ 成反比关系, D 越大,频率的偏差 $\Delta\omega$ 越小。同时根据式(14)可知,阻尼比 ζ 和阻尼系数 D 成正比关系,进而可知增大阻尼比 ζ 有利于频率的稳定。

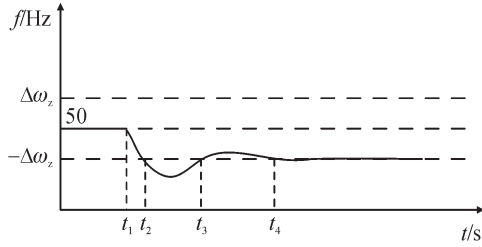
在实际的系统控制方案设计中,一般需要综合考量阻尼、响应速度、超调等各项性能指标,为此,一般将二阶系统的阻尼比设置在 0.4~0.8 之间。为了更加直观的分析在频率波动过程中阻尼比该如何选取,现分别在系统频率受到扰动情况下以及在系统频率跌落情况下对频率的波形图进行分析。当系统功率发生扰动变化时,系统频率的变化曲线见图 11(a); 当系统频率受到负载扰动发生跌落时,频率的变化曲线见图 11(b)。

首先分析图 11(a)。在频率的一个振荡周期内,以 $\pm\Delta\omega_c$ 为界限将其分为不同的区间。 $\Delta\omega_c$ 为设定的频率波动阈值, $\Delta\omega_c = 2\pi\Delta f = 0.4\pi$ 。在 $t_1 \sim t_2$ 区间内,系统频率偏移额定频率较小,此时设置阻尼比为最佳阻尼比 0.707。在 $t_2 \sim t_3$ 区间内,由于系统频率偏移较大,需要选择较大的阻尼系数来减小频率的偏差。因此,在此区间内选择阻尼比为 0.8。在 $t_3 \sim t_4$ 区间系统频率的偏移均在阈值 $|\Delta\omega_c|$ 以内,在该区间内选取阻尼比为最佳阻尼比。同理可得出, $t_4 \sim t_5$ 区间以及 $t_5 \sim t_6$ 区间内的阻尼比分别选取为 0.8 以及 0.707。图 11(b)的阻尼比选取分析同理,在 $t_1 \sim t_2$ 区间以及 $t_3 \sim t_4$ 区间内,频率偏移小,不需要较大的阻尼比。在 $t_2 \sim t_3$ 区

间内,由于频率偏移较大,需要选择较大的阻尼比。



(a) 频率波动波形图



(b) 频率跌落波形图

图 11 频率波动变化曲线

Fig. 11 The curve of frequency fluctuation

根据式(16)可知,阻尼系数和转动惯量以及阻尼比之间存在函数关系,因此当转动惯量以及阻尼比确定时,阻尼系数 D 的大小可以通过计算得出,其计算公式为

$$D = \frac{2\zeta}{\sqrt{\frac{Z\omega_n}{3JEU}}} \quad (21)$$

因此,当采用考虑系统阻尼比的惯量阻尼自适应控制时, J 和 D 的计算方法可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} J &= \begin{cases} J_0 & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} \leq 0 \cup \left| \frac{d\omega}{dt} \right| < G_j \\ J_0 + k \left| \frac{d\omega}{dt} \right| & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} > 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > G_j \end{cases} \\ D &= \frac{2\zeta}{\sqrt{\frac{Z\omega_n}{3JEU}}} \\ \zeta &= \begin{cases} 0.707 & |\Delta\omega| < |\Delta\omega_z| \\ 0.8 & |\Delta\omega| \geq |\Delta\omega_z| \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (22)$$

综上所述,考虑阻尼比的转动惯量及阻尼自适应控制的控制框图见图12。首先根据频率的波动程度选定阻尼比,并结合转动惯量的初始值 J_0 以及自适应调节系数 k 得出相位信号 θ 及电压幅值信号 E_{ref} ,再通过电压电流双环控制得到输出电压信号,经SVPWM调制,最后生成开关信号对变流器进行控制,进而实现在电网频率波动的情况下改善系统的暂态性能,进一步提升频率的稳定性。

4 仿真分析

为了验证文中所提的考虑阻尼比的惯量阻尼

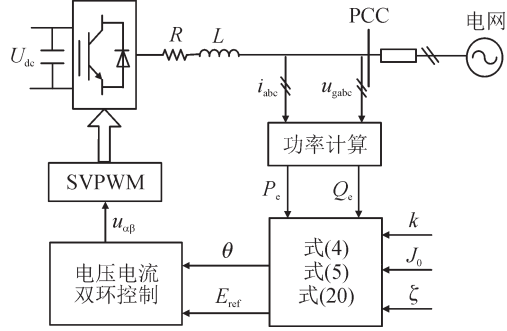


图 12 考虑阻尼比的惯量阻尼自适应控制框图

Fig. 12 Block diagram of inertia damping adaptive control considering damping ratio

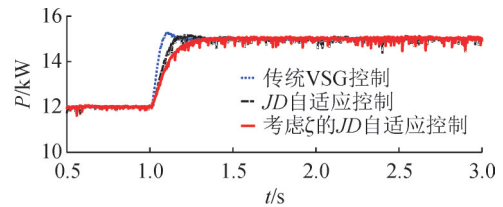
自适应方法的有效性,在MATLAB/Simulink环境中对并网变流器进行了仿真分析见表2,同时还与传统固定惯量阻尼系数VSG控制以及文[12]所提的JD自适应交错控制进行了对比,对比结果表明了所提方案具有优越性。

表 2 仿真参数

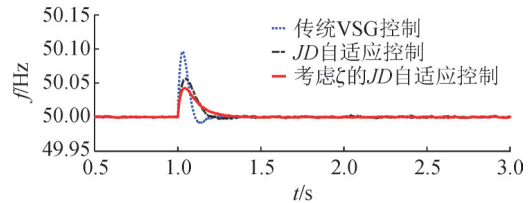
Table 2 Simulation parameters

参数	数值
直流电压 U_{dc}/V	800
电网电压 U_{abc}/V	380
阻尼系数 D	29.6
转动惯量 $J_0/(kg \cdot m^2)$	0.5
无功调节系数 K	0.05
滤波电感 L/mH	6
滤波电容 $C/\mu F$	20
转动惯量自适应调节系数 k	0.01

为了验证本节所提出的考虑阻尼比的JD自适应控制具有较好的暂态性能,在系统运行至1s时将VSG的功率参考指令由12 kW突增至15 kW,其仿真波形见图13。



(a) VSG功率响应



(b) VSG频率响应

图 13 VSG的功率及频率响应曲线对比

Fig. 13 Comparison of power and frequency response curves of VSG

由图13可以看出,在功率出现扰动时,传统的

固定惯量阻尼 VSG 控制的响应速度最快,并且其功率的超调量以及频率的偏移量也是最大的,调节时间约为 1.2 s,频率最高达到 50.1 Hz。采用 JD 自适应控制时,虽然系统功率以及频率的超调量均得到了改善,但是相比于考虑阻尼比的 JD 自适应控制,其超调量还是略高。采用考虑阻尼比的 JD 自适应控制在功率发生扰动的情况下其频率的偏移量最小,不超过 0.05 Hz,证明了所提方案的正确性及优越性。

为了验证所提控制策略在电网频率跌落情况下的控制性能,在 0.5 s 时电网频率由 50 Hz 跌落至 49.7 Hz。在电网频率发生跌落情况下,采用不同控制方案的频率对比波形图见图 14。

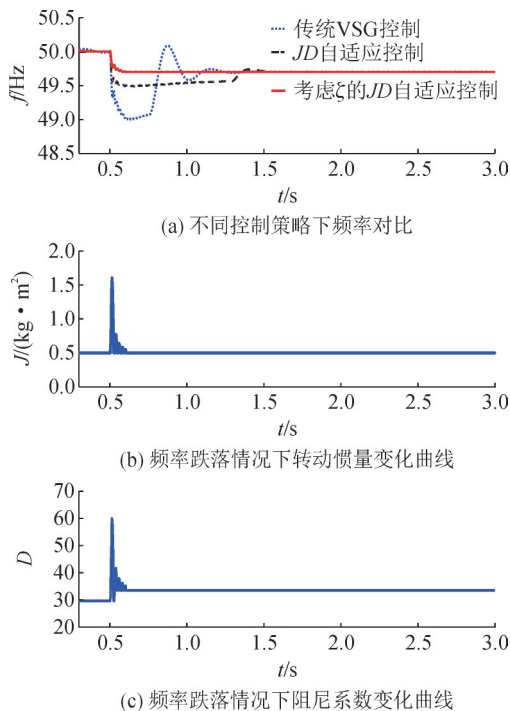


图 14 电网频率跌落下的频率及 JD 曲线

Fig. 14 Frequency and JD curves under grid frequency drop

由图 14 可看出,采用传统的固定惯量阻尼 VSG 控制策略下的频率跌落最深,已达 49 Hz,一般情况下,电网所允许频率的波动范围为 ± 0.5 Hz,这显然已经超出了安全运行所限定的 0.5 Hz 了,不利于系统的稳定。采用文[12]所提的 JD 自适应控制在频率的跌落程度上得到了明显的改善,频率波动的最大幅值不超过 0.5 Hz。采用本节所提的考虑阻尼比的 JD 自适应控制策略下的频率波动幅值是最小的,频率跌落的速度也是较慢的。

图 14(b)、(c)分别表示采用考虑阻尼比的惯量阻尼自适应控制下的转动惯量 J 以及阻尼系数 D 的变化曲线,根据式(16)可知 J 和 D 是存在函数关系的,

在阻尼比确定的情况下, D 随着 J 的变化也随之变化,仿真结果也验证了这一点,在 J 增大的情况下 D 也随之增大。在 0.6 s 时系统已经基本达到稳定状态,此时的频率变化率很小,因此转动惯量 J 恢复至初始值。值得注意的是,由于频率的最终跌落程度大于所设定的频率阈值 $|\Delta\omega_z|$,因此,在控制过程中系统的阻尼比是有变化的。当系统稳定后阻尼比采用的是较大的阻尼比 0.8,要大于最初的阻尼比。当 J 不变时, D 和阻尼比是成正比关系的,因此,当系统稳定后阻尼系数 D 是高于初始值的。

为了能够更加直观的分析文中所提控制策略的控制性能,将传统 VSG 控制、文[12]所提惯量阻尼自适应控制以及文中所提考虑阻尼比的惯量阻尼自适应控制在功率突增以及频率跌落状态下的频率响应进行量化对比,对比结果见表 3。由表 3 可知,在功率突增的情况下,虽然采用传统 VSG 控制以及文[12]所提惯量阻尼自适应控制下的调节时间较短,但是频率超调量较大。在频率跌落情况下,文中所提考虑 ζ 的 JD 自适应控制策略调节时间以及频率超调量均最小,并且频率的跌落速度也是最慢的,验证了所提控制方案具有优越性。

表 3 性能指标量化对比

Table 3 Quantitative comparison of performance indicators

控制方案	状态 1:功率突增		状态 2:频率跌落	
	频率超调量/%	调节时间/s	频率超调量/%	调节时间/s
传统 VSG 控制	0.20	1.25	2.00	1.35
JD 自适应控制 ^[12]	0.12	1.25	1.00	1.50
考虑 ζ 的 JD 自适应控制	0.08	1.35	0.60	0.70

5 结论

VSG 控制技术发展迅猛,由于可以模拟同步发电机的特性,因此该技术广泛应用在并网系统中。当电网频率出现波动时,针对传统固定参数控制暂态超调较大,频率易超出频率波动阈值的问题,提出了一种考虑阻尼比的 JD 自适应控制方法。主要的贡献有以下几方面:

1)建立了 VSG 的小信号模型,分析了转动惯量 J 和阻尼系数 D 对系统稳态及动态性能的影响。

2)研究了阻尼比的大小对改善频率稳定性的作用,在频率偏差较小的情况下采用最佳阻尼比,在频率偏差较大时采用较大的阻尼比。通过惯量阻尼的综合自适应控制,进而来提升系统频率的稳定性。

3)根据仿真结果可得出,与传统 VSG 控制以及

JD交错自适应控制相比,所提控制方案在功率突增的情况下频率的超调量分别降低了60%、33%;在频率跌落的情况下,频率的超调量分别降低了70%、40%,验证了所提控制方案在提升频率稳定性方面是具有优越性的。

参考文献:

- [1] 吉会峰,刘吉堂,宋心刚,等. 基于ERA5数据的江苏海域风能资源评估[J]. 太阳能学报,2023,44(1):320-324.
Ji Huifeng, Liu Jitang, Song Xingang, et al. Evaluation of wind energy resources in Jiangsu sea area based on ERA5 data[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2023, 44(1): 320-324.
- [2] 朱茂林,刘 灏,毕天姝. 考虑风电场量测相关性的双馈风力发电机鲁棒动态状态估计[J]. 电工技术学报,2023,38(3):726-740.
Zhu Maolin, Liu Hao, Bi Tianshu. Robust dynamic state estimation of doubly-fed induction generator considering measurement correlation in wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 726-740.
- [3] 韩 佶,苗世洪,李力行,等. 基于多视角迁移学习的风场内机群划分及等值风场参数综合优化[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15):4866-4880.
Han Ji, Miao Shihong, Li Liheng, et al. Wind turbines clustering in wind farm based on multi-view transfer learning and synthetic optimization of parameters in equivalent wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4866-4880.
- [4] 周 博,艾小猛,方家琨,等. 计及超分辨率风电出力不确定性的连续时间鲁棒机组组合[J]. 电工技术学报,2021,36(7):1456-1467.
Zhou Bo, Ai Xiaomeng, Fang Jiakun, et al. Continuous-time modeling based robust unit commitment considering beyond-the-resolution wind power uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1456-1467.
- [5] 王 彤,高明阳,黄世楼,等. 基于自适应容卡尔曼滤波的双馈风力发电机动态状态估计[J]. 电网技术,2021,45(5):1837-1843.
Wang Tong, Gao Mingyang, Huang Shilou, et al. Dynamic state estimation for doubly fed induction generator wind turbine based on adaptive cubature Kalman filter[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1837-1843.
- [6] 李龙源,付瑞清,吕晓琴,等. 接入弱电网的同型机直驱风电场单机等值建模[J]. 电工技术学报,2023,38(3):712-725.
Li Longyuan, Fu Ruiqing, Lyu Xiaoqin, et al. Single machine equivalent modeling of weak grid connected wind farm with same type PMSGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 712-725.
- [7] 郭磊磊,郑铭哲,李琰琰,等. 三相LCL并网逆变器无参数滑模预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(18):72-82.
Guo Leilei, Zheng Mingzhe, Li Yanyan, et al. Nonparametric sliding mode predictive control strategy for a three-phase LCL grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 72-82.
- [8] 于晶荣,孙 文,于佳琪,等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(4):137-144.
Yu Jingrong, Sun Wen, Yu Jiaqi, et al. Virtual synchronous generator control of a grid-connected inverter based on adaptive inertia[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 137-144.
- [9] 谭丽平,谭 鑫,王立娜,等. 电网电压不平衡下考虑电流峰值限制的储能变流器协调控制策略[J]. 高压电器,2022,58(7):111-118.
Tan Liping, Tan Xin, Wang Lina, et al. Coordinated control strategy of power conversion system considering current peak limit under unbalanced grid voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 111-118.
- [10] 袁 敞,丛诗学,徐衍会. 应用于微电网的并网逆变器虚拟阻抗控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(9):144-154.
Yuan Chang, Cong Shixue, Xu Yanhui. Overview on grid-connected inverter virtual impedance technology for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 144-154.
- [11] 于彦雪,关万琳,陈晓光,等. 基于序阻抗的虚拟同步机同步率谐振现象[J]. 电工技术学报,2022,37(10):2584-2595.
Yu Yanxue, Guan Wanlin, Chen Xiaoguang, et al. Synchronous frequency resonance in virtual synchronous generator based on sequence-impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2584-2595.
- [12] 任碧莹,邱姣姣,刘 欢,等. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自适应优化控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(1):128-138.
Ren Biying, Qiu Jiaojiao, Liu Huan, et al. Optimization control strategy of self-adjusting parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 128-138.
- [13] 张瀚宇,盘宏斌,陈燕东,等. 计及频率动态响应的VSG自适应暂态稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(23):90-100.
Zhang Hanyu, Pan Hongbin, Chen Yandong, et al. VSG adaptive transient stability control strategy considering frequency dynamic response[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(23): 90-100.
- [14] 刘彦军,何 维,朱东海,等. 基于二阶VSG的变换器频率支撑能力评估及提升方法[J]. 电力建设,2024,45(11):102-113.
Liu Yanjun, He Wei, Zhu Donghai, et al. Evaluation and improving method of frequency support of converters based on second-order VSG section[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 102-113.
- [15] 李 威,马美玲,孙伟卿. 考虑功率耦合的构网型多VSG系统频率振荡特性分析[J]. 电力工程技术,2025,44(2):44-54.
Li Wei, Ma Meiling, Sun Weiqing. Analysis of frequency oscillation characteristics in grid-forming multi-VSG systems considering power coupling[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 44-54.
- [16] 王振浩,杜成林,庞 丹,等. 基于VSG-AVDG的多端柔性互联配电系统控制策略[J]. 智慧电力,2025,53(4):29-37.
Wang Zhenhao, Du Chenglin, Pang Dan, et al. Control strategy for multi-terminal flexible interconnected distribution system based on VSG-AVDG[J]. Smart Power, 2025, 53(4): 29-37.
- [17] 祝龙记,王 丹. 光伏逆变电源可变虚拟惯量控制策略的研究[J]. 太阳能学报,2016,37(4):823-828.

- Zhu Longji, Wang Dan. Control strategy research of PV inverter with variable virtual inertia[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2016, 37(4): 823-828.
- [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 Dongdong, Zhu Qianwei, Cheng Yunzhi, 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] 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] 张亚楠, 朱 淼, 张健文, 等. 基于自适应调节的微源逆变器虚拟同步发电机控制策略[J]. *电源学报*, 2016, 14(3): 11-19.
- Zhang Yanan, Zhu Miao, Zhang Jianwen, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting for distributed inverters[J]. *Journal of Power Supply*, 2016, 14(3): 11-19.
- [21] 李美依, 黄文焘, 邵能灵, 等. 频率扰动下虚拟同步电机控制型分布式电源自适应惯性控制策略[J]. *电网技术*, 2020, 44(4): 1525-1533.
- Li Meiyi, Huang Wendao, Tai Nengling, et al. Adaptive inertial control strategy for inverter interfaced distributed generator based on virtual synchronous generator under frequency disturbances[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(4): 1525-1533.
- [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] 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): 412-423.
- Song Qiong, Zhang Hui, Sun Kai, 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): 412-423.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Li Dongdong, Zhu Qianwei, Lin Shunfu, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(1): 397-398.
- [27] 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.
- [28] Wang Fei, Zhang Lijun, Feng Xiayun, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(5): 5124-5133.
- [29] Zhao Chencong, Liu Jun, Xie Zhouhua, et al. Coordinate control of power/current for grid-connected inverter based on PCI controller under unbalanced grid conditions[J]. *Complexity*, 2019: 5968984.
- [30] 王素娥, 狄 嘉, 郝鹏飞, 等. 基于测速反馈的VSG惯量和阻尼自适应控制策略[J]. *智慧电力*, 2025, 53(3): 53-61.
- Wang Sue, Di Jia, Hao Pengfei, et al. Speed feedback based adaptive control strategy for VSG inertia and damping[J]. *Smart Power*, 2025, 53(3): 53-61.
- [31] 冯 浩, 王 博, 葛树俊, 等. 基于VSG的光储系统参与一次调频研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2026, 47(2): 30-36.
- Feng Hao, Wang Bo, Ge Shujun, et al. Research on primary frequency regulation of photovoltaic - storage system based on virtual synchronous generator[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2026, 47(2): 30-36.
- [32] 刘俊翔, 夏向阳, 巩 宇, 等. 基于暂态惯量阻尼优化的VSG多机振荡抑制研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(6): 67-76.
- Liu Junxiang, Xia Xiangyang, Gong Yu, et al. Research on oscillation suppression of multi-VSG based on transient inertia and damping optimization[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(6): 67-76.
- 赵晨聪(1991—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为风力发电相关控制技术 & 智能算法等(通信作者)(E-mail: zccbstqk@163.com)。
- 谢宙桦(1991—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为复杂工业环境下的算法以及新能源发电等。
- 周飞航(1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为风力发电相关控制技术。