

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211493

不对称电压跌落下虚拟同步机改进低电压穿越控制策略

丁一凡¹, 季亮¹, 常潇², 洪启腾³, 李振坤¹, 米阳¹, 郭佳龙¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001;
3. 英国思克莱德大学, 英国 格拉斯哥 G11XQ)

摘要: 虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)是提高以新能源为主体的新型电力系统稳定性的有效途径。应用于逆变型新能源(Inverter-Interfaced Renewable Generation, IIRG)并网的虚拟同步机在不对称电压跌落情况下可能丧失 VSG 特性, 并因低压穿越能力不足或电压电流越限而导致切机, 危害电力系统安全稳定运行。对此, 提出了一种新型 VSG 控制策略。该方法在不对称电压跌落情况下, 既能持续提供系统惯性和阻尼, 又能提供主动电压支撑, 有效提高 VSG 低压穿越能力, 并保证扰动下的系统稳定性。首先, 分析了传统 VSG 在不平衡电压跌落情况下的响应特性。然后, 提出了一种基于平衡电流的改进 VSG 控制结构, 将传统 VSG 单电流环控制改为双电流环控制, 维持 VSG 在电压跌落条件下的惯性阻尼特性, 并实现对正负序分量的精准控制。接着, 基于改进的双电流环控制拓扑, 在逆变器安全运行条件下, 对正负序参考电流整定方法进行优化, 以实现 VSG 主动电压支撑和电流限幅。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台, 验证了所提控制策略在多种系统运行条件下的响应特性及有效性。

关键词: 虚拟同步机; 不对称电压跌落; 电压支撑能力; 低电压穿越; 电流限幅

Improved low voltage ride-through control strategy of a virtual synchronous generator during unbalanced voltage sags

DING Yifan¹, JI Liang¹, CHANG Xiao², HONG Qiteng³, LI Zhenkun¹, MI Yang¹, GUO Jialong¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute of Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China;
3. University of Strathclyde, Glasgow G11XQ, United Kingdom)

Abstract: The virtual synchronous generator (VSG) is an effective way to improve the stability of a new power system based on new energy. The VSG applied to inverter-interfaced renewable generation (IIRG) may lose VSG characteristics under unbalanced voltage drops, and may cause generator tripping because of insufficient low-voltage ride-through capability or voltage and current over-limit. This endangers the safe and stable operation of the power system. A new VSG control strategy is proposed in this paper. This method can not only provide system inertia and damping, but also provide active voltage support when there is unbalanced voltage drop, effectively improve the low voltage ride-through capability of VSG, and ensure system stability under disturbance. First, the response characteristics of a traditional VSG with an unbalanced voltage drop are analyzed. Then, an improved control structure based on balanced current is proposed, one which changes the traditional single current loop control of VSG to double current loop control, maintains the inertial damping characteristics of VSG under voltage drop conditions, and realizes the accurate control of positive and negative sequence components. Then, based on the improved control topology, in a safe operational condition of the inverter, the positive and negative sequence reference current setting is optimized to realize VSG active voltage support and current limiting. Finally, based on the Matlab/Simulink simulation platform, the response characteristics of the proposed control strategy in various system operating conditions are verified. This ensures the effectiveness of the method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873159).

Key words: virtual synchronous generator; unbalanced voltage sag; voltage support capability; low voltage ride-through; current limitation

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873159); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900); 上海市电站自动化技术重点实验室项目资助

0 引言

随着能源稀缺与全球变暖问题的日益严重, 低碳发展逐渐成为世界各国的发展战略。以光伏、风电为代表的新能源发电将逐渐取代传统火力发电, 给电力系统的稳定运行带来挑战^[1-3]。传统的同步发电机由于转子的存在, 可以储存能量为电网提供惯性和阻尼。而分布式发电单元大多都是通过逆变器并网的, 此类逆变型新能源发电单元(IIRG)大多不具备同步发电机的惯性和阻尼, 导致电力系统中的旋转备用容量及转动惯量相对减少, 此时电力系统容易受到功率波动和故障的影响造成系统失稳^[4]。因此, 有学者提出了虚拟同步机控制策略, 可以模拟同步发电机为系统提供转动惯量、下垂特性以及阻尼特性。文献[5-6]介绍了电压控制型和电流控制型 VSG 的原理和实现方法。目前, VSG 得到了广泛的研究, 主要针对其稳态工况进行, 包括小信号分析^[7-8]、并列运行^[9-10]以及惯性自适应^[11-13]等。

然而, 实际配电网运行环境复杂, 经常出现电压跌落、三相不平衡等故障, 故障下 VSG 控制策略输出电能质量明显降低, 严重时可能会造成 IIRG 切机甚至连锁切机等事故, 危害电网的运行稳定性^[14-15]。并网准则要求, 新能源发电单元在电网电压跌落期间需要具备低电压穿越(Low Voltage Ride-through, LVRT)能力^[16]。因此, 研究故障下改进 VSG 控制, 提升其低电压穿越能力, 从而保证故障下 IIRG 的安全运行具有实际意义。

目前, 针对故障下 VSG 的改进控制研究相对较少, 主要分为改进逆变器本身控制和引入硬件设备来辅助低电压穿越两个方面。

在对于逆变器本身改进控制的研究中, 一部分学者致力于研究模式切换算法, 即在故障时由 VSG 控制切换到其他控制^[17-18]。文献[17]提出了一种基于平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制策略, 并详细介绍了平滑切换算法。但是, 该方案并没有对切换过程进行深入分析且故障下改变了 VSG 的电压源外特性。文献[18]通过对故障期间的电流进行状态跟随, 实现了 VSG 控制和传统低电压穿越控制的平滑切换。但是, 该方案在故障期间对 VSG 控制进行切换后, IIRG 将不能够继续为电网提供惯量和阻尼以降低故障对系统的冲击, 丧失了 VSG 控制的特性。相比较切换控制策略的思路, 还有一部分学者研究了针对于 VSG 控制本身的改进方法^[19-21]。文献[19]将虚拟阻抗与相量限流相结合提出一种适用于直接电压型 VSG 的限流方法。然

而, 该方法只适用于对称故障, 局限性比较强。文献[20]提出了一种考虑不平衡电网电压的 VSG 平衡电流控制方法, 该方案实现了在电网电压不平衡时有效控制 VSG 输出三相平衡电流, 提出的改进控制拓扑对后续研究具有重要意义。文献[21]在文献[20]的基础上分别实现了有功功率恒定、无功功率恒定的控制目标, 给出了对应的参考电流计算方法, 但是该策略仍然无法实现同时输出恒定有功、无功功率。

对于引入硬件设备来辅助 VSG 低压穿越的研究, 目前仍处于起步阶段。现有研究主要引入的设备是超导故障限流器(Superconducting Fault Current Limiter, SFCL)。文献[22]设计了在并网点装设 SFCL 的 VSG 并网结构, 仿真表明 SFCL 可以很好地限制 VSG 故障电流以及改善 VSG 的电压分布, 提升 VSG 电压穿越能力。与研究改进控制策略相比, 使用附加硬件设备避免了对现有逆变器控制进行重新设计, 安装灵活度高, 具备良好的发展前景。

上述研究主要是针对电压控制型 VSG 提出的, 故障下只能按照给定参考值输出恒定功率, 无法在故障下保留 VSG 特性, 这主要是因为电压型 VSG 外特性为电压源, 有功无功耦合, 无法直接控制功率^[23]导致的。而电流控制型 VSG 基于常规矢量控制技术附加了频率调节控制, 保留了电流内环控制结构, 控制电流指令即可精准控制输出功率^[24]。目前, 针对于电流型 VSG 的低电压穿越控制特别是对称故障下的研究较少。

对此, 本文基于电流控制型 VSG 提出了一种电压跌落下的改进低电压穿越控制策略。首先, 分析了 VSG 故障下的输出特性; 然后, 提出了全新的改进 VSG 控制结构, 可实现不对称故障下正负序分量的精准调节; 最后, 提出了优化后的参考电流整定方法, 故障下保证 VSG 特性主动支撑电网的同时电流电压不超限。

1 VSG 拓扑结构及数学模型

典型虚拟同步机控制拓扑图^[6]如图 1 所示, 忽略直流侧出力波动性, 新能源发电单元用理想直流电压源取代。图 1 中, V_{dc} 为理想直流电压源; L_r 、 C_r 分别为逆变器出口侧滤波电感和电容; L_g 为线路电感。VSG 通过采集输出电压的角速度和相电压幅值输入到其功率环进行处理, 得到有功功率控制参考电流 I_{dref} 和无功功率控制参考电流 I_{qref} 输出到电流内环控制, 最后通过 PWM 发生器产生 6 路开关信号控制逆变器关断, 得到输出三相正弦电压。

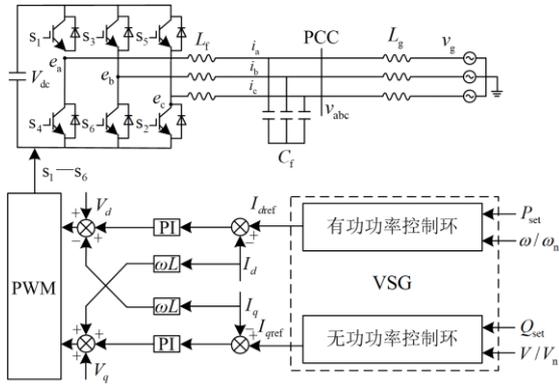


图 1 VSG 拓扑结构及控制策略

Fig. 1 Topology and control scheme of the VSG

VSG 控制策略主要由两个功率控制环构成，其中有功功率控制环模拟同步发电机的惯性和一次调频特性，无功功率控制环模拟同步发电机的一次调压特性^[4-6]。电流控制型 VSG 的数学方程由电机控制方程推导而来，电机控制方程数学表达式如式(1)所示^[25]。

$$\begin{cases} T_{set} - T_e + (\omega_n - \omega)D_p = Js\omega \\ T_e = P_e / \omega \approx P_e / \omega_n \\ T_{set} = P_{set} / \omega \approx P_{set} / \omega_n \\ \omega = s\theta \\ Q_{set} - Q_e + (V_n - V)D_q = KsE_m \end{cases} \quad (1)$$

式中： J 为虚拟转动惯量； T_{set} 和 T_e 分别为额定电磁转矩和输出电磁转矩； D_p 和 D_q 分别为阻尼系数和电压下垂系数； ω_n 和 ω 分别为额定电角速度和输出电角速度； V_n 和 V 分别为额定相电压幅值和输出相电压幅值； P_{set} 和 Q_{set} 分别初始有功和无功出力； P_e 和 Q_e 分别为输出有功和无功功率； θ 为电机内部电势的相位角； K 为无功功率控制回路的惯性系数； E_m 为电机内电势的幅值； s 表示微分计算。

由式(1)可以推导出 P_e 和 Q_e 的表达式如式(2)。

$$\begin{cases} P_e = P_{set} + (J\omega_n s + D_p \omega_n)(\omega_n - \omega) \\ Q_e = Q_{set} + (D_q + Ks)(V_n - V) \end{cases} \quad (2)$$

由 P_e 和 Q_e 可进一步得到 VSG 有功无功参考电流为

$$\begin{cases} I_{dref} = \frac{P_e}{1.5V_d} \\ I_{qref} = \frac{Q_e}{1.5V_d} \end{cases} \quad (3)$$

到此就得到了电流控制型 VSG 的数学模型。电

网电压和频率的变化通过电压幅值和电角速度的变化最终反映在 VSG 有功无功控制指令发生改变，进而改变参考电流，通过电流内环控制实现对输出功率的调节。这就是 VSG 模拟同步发电机的过程。

2 VSG 故障特性分析

传统 VSG 控制是基于电网稳态运行提出的，正常工况下可以主动参与调节电网频率与电压，提高系统稳定性。但是当电网受到扰动，电压跌落时，传统 VSG 控制将面临输出电流越限、控制系统失稳等问题，故障期间无法发挥 VSG 特性主动支撑电网。

1) 输出电流越限

传统 VSG 一般可以等效为电压源，其并网等效模型如图 2 所示。

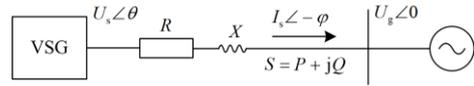


图 2 VSG 并网等效模型

Fig. 2 Grid-connected equivalent model of VSG

本文假设 VSG 并网联络线主要为感性，即 $X \gg R$ ，线路总阻抗 $Z = X = \omega L$ 。此时，由图 2 可以推导出 VSG 并网向量图，如图 3 所示。

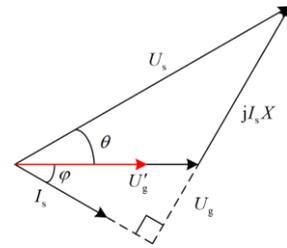


图 3 VSG 并网向量图

Fig. 3 Grid-connected vector diagram of VSG

VSG 电压向量 u_s 和电网电压向量 u_g 设定为

$$\begin{cases} u_s = U_s \sin(\omega t + \theta) \\ u_g = U_g \sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

正常情况下 VSG 输出电流可以表示为

$$\begin{cases} i_s = I_s \sin(\omega t - \phi) \\ I_s = \sqrt{\frac{U_s^2 + U_g^2 - 2U_s U_g \cos \theta}{X^2}} \\ \phi = \arcsin\left(\frac{U_s \sin \theta}{\sqrt{U_s^2 + U_g^2 - 2U_s U_g \cos \theta}}\right) \end{cases} \quad (5)$$

假设电网电压幅值 U_g 在 $t = t_0$ 时刻跌落到 U'_g ，由于 VSG 自身的惯性特性，VSG 输出电压在短时间将保持不变，此时电感上电压可表示为

$$L \frac{di'_s}{dt} = u_s(t) - u'_g(t) = U_s \sin(\omega t + \theta) - U'_g \sin(\omega t) \quad (6)$$

式中, i'_s 和 u'_g 分别为电压暂降期间的瞬时输出电流和电网电压。由式(6), i'_s 可进一步推导为

$$\begin{cases} i'_s = I'_s \sin(\omega t - \varphi') + [I_s \sin(\omega t_0 - \varphi) - I'_s \sin(\omega t_0 - \varphi')] \\ I'_s = \sqrt{\frac{U_s^2 + U_g'^2 - 2U_s U_g' \cos \theta}{X^2}} \\ \varphi' = \arcsin\left(\frac{U_s \sin \theta}{\sqrt{U_s^2 + U_g'^2 - 2U_s U_g' \cos \theta}}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: i'_s 由交流分量与直流分量两部分组成; I'_s 为暂态下输出电流交流分量幅值; φ' 为暂态下功率因数角。输出电流 i'_s 的峰值与瞬态直流分量有关, 电压跌落瞬间, 会出现很大的瞬态直流分量, 造成 VSG 输出电流幅值越限, 危害逆变器安全运行。

2) 控制系统失稳

当电网发生不对称电压跌落时, 此时三相电压幅值不相等, 传统 VSG 控制的幅值计算公式为

$$V = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (8)$$

式中, V_d 、 V_q 分别表示输出电压的 d 、 q 轴分量。

由于电网中负序分量的存在, 传统 VSG 控制所采用的单同步旋转坐标系锁相环无法精准锁相, 导致 V_d 、 V_q 不再为直流量, 由此得到的相电压幅值 V 也将会是一个波动的量, 进而造成 VSG 无功电流参考值发生波动, 无法继续发挥 VSG 调节特性。

又因为电流内环控制中的 PI 调节器无法对波动的参考值进行无差调节, 控制系统失稳, 此时 VSG 输出电流波形畸变, 三相不对称。

3 不对称电压跌落下 VSG 改进控制策略

当电网发生不对称电压跌落时, 为继续发挥 VSG 特性进行主动电压支撑, 持续为系统提供惯性和阻尼并保证合乎要求的电能质量, 本文设计了全新的控制拓扑以及电压支撑、限流方法。

3.1 基于平衡电流的改进 VSG 控制拓扑

当电网发生不对称电压跌落时, 电流中将出现负序分量, 从而导致三相不平衡。为实现三相电流恢复平衡, 本文引入经典电流矢量控制中的平衡电流控制对 VSG 控制进行了改进, 与经典 VSG 控制对比, 改进控制在原电流环的基础上, 增加了负序电流环, 通过对正负序参考指令的调节即可实现对电网正负序分量的精准控制。

改进的 VSG 控制拓扑如图 4 所示。其中正序电

流环采用传统 VSG 电流环结构, 以在电压跌落下维持 VSG 特性对电网正序电压进行主动支撑同时为系统提供惯性和阻尼, 减少扰动对系统的冲击。由于电压为不对称跌落, 三相电压幅值不相等, 为了尽量保证电压支撑后各相电压都在安全范围内, 取幅值最大相的电压幅值 V_{\max} 代替相电压幅值 V 进行无功功率控制。同时为了避免故障瞬间频率闪变对控制系统的影响, 故障时闭锁 VSG 有功环下垂环节, 保持原指令值输出有功功率。

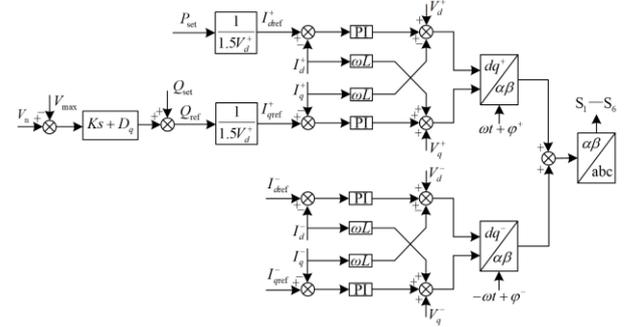


图 4 改进 VSG 控制拓扑

Fig. 4 Topology of the improved VSG control

此时 VSG 参考电流可表示为

$$\begin{cases} I_{d_vsg} = \frac{P_{set}}{1.5V_d^+} \\ I_{q_vsg} = \frac{Q_{set} + (D_q + K_s)(V_n - V_{max})}{1.5V_d^+} \end{cases} \quad (9)$$

3.2 控制目标

1) 电压支撑

为了故障下保留 VSG 特性主动支撑电压, 控制策略需要保证其支撑后的相电压幅值不越限。但是当电网电压发生跌落时, VSG 控制策略产生的无功功率增量无法直观地体现其电压支撑效果, 无法验证支撑后电压是否满足电网安全运行要求。因此, 本文研究了功率增量与相电压幅值的关系, 对 VSG 参数设计加入了新的约束即保证任何电压跌落下 VSG 主动电压支撑后相电压幅值均不越限。

故障下逆变器的电压支撑主要体现在对电网正序电压的主动支撑上, 本文改进 VSG 也针对正序电压支撑进行, 故只需针对正序电压进行分析。

电网电压不对称时, 在 dq 坐标系下的逆变器并网点(PCC)电压和电流可表示为

$$v = v^+ + v^- = \begin{bmatrix} V^+ \cos(\omega t + \varphi^+) + V^- \cos(-\omega t + \varphi^-) \\ V^+ \sin(\omega t + \varphi^+) + V^- \sin(-\omega t + \varphi^-) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: v^+ 和 v^- 分别表示逆变器并网点的正序和负序

电压； V^+ 和 V^- 分别表示正序和负序电压对应的幅值； φ^+ 和 φ^- 分别为正负序电压的初相角。此时，逆变器输出电流在 dq 坐标系下可以表示为

$$i = i^+ + i^- = \begin{bmatrix} I_d^+ \cos(\omega t + \varphi^+) - I_q^+ \sin(\omega t + \varphi^+) \\ I_d^+ \sin(\omega t + \varphi^+) + I_q^+ \cos(\omega t + \varphi^+) \end{bmatrix}^+ + \begin{bmatrix} I_d^- \cos(-\omega t + \varphi^-) - I_q^- \sin(-\omega t + \varphi^-) \\ I_d^- \sin(-\omega t + \varphi^-) + I_q^- \cos(-\omega t + \varphi^-) \end{bmatrix}^- \quad (11)$$

式中： i^+ 和 i^- 分别表示电流的正负序分量； I_d^+ 、 I_q^+ 和 I_d^- 、 I_q^- 分别表示正负序电流的 d 轴和 q 轴分量。

根据图 1 所示网络拓扑，在不对称电压跌落时，电压正负序分量可表示为

$$v^+ = v_g^+ + L_g \frac{di^+}{dt} \quad (12)$$

$$v^- = v_g^- + L_g \frac{di^-}{dt} \quad (13)$$

式中， v_g^+ 和 v_g^- 表示电网电压的正负序分量。将式(10)和式(11)代入式(12)，得到以幅值表示的正序电压支撑方程：

$$V^+ = \sqrt{(V_g^+)^2 - (\omega L_g I_d^+)^2} + \omega L_g I_q^+ \quad (14)$$

式中， V_g^+ 表示电网正序电压的幅值。式(14)为下文分析电压支撑效果的基础。

电压不对称时，PCC 母线三相电压幅值可表示为

$$\begin{cases} V_a = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^- \cos(\phi)} \\ V_b = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^- \cos(\phi - \frac{2}{3}\pi)} \\ V_c = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^- \cos(\phi + \frac{2}{3}\pi)} \end{cases} \quad (15)$$

式中， $\phi = \varphi^+ + \varphi^-$ 。在发生不对称电压跌落时，为保证电压支撑后三相电压均不超限，建立约束如式(16)。

$$V_{\max} = \max(V_a, V_b, V_c) \leq V_{\text{upper}} \quad (16)$$

式中： V_{\max} 表示幅值最大相的电压幅值； V_{upper} 表示相电压幅值约束上限。联立式(15)和式(16)，幅值最大相的电压可表示为

$$V_{\max} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^- \lambda} \quad (17)$$

其中：

$$\lambda = \max \left[\cos(\phi), \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}), \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \right] \quad (18)$$

式(17)建立了幅值最大相的电压幅值 V_{\max} 和正序电压幅值 V^+ 之间的关系，当 V_{\max} 被提升到 V_{upper}

时，逆变器在相电压幅值不超限的同时实现了对正序电压的最大化支撑。令 $V_{\max} = V_{\text{upper}}$ ，由式(17)可推出最大化电压支撑下对应的正序参考电压。

$$V_{\text{ref}}^+ = -V^- \lambda + \sqrt{(V^- \lambda)^2 - (V^-)^2 + (V_{\text{upper}})^2} \quad (19)$$

将式(19)与式(14)联立，可以得出最大化电压支撑下对应的无功参考电流。

$$I_{q_upper}^+ = \frac{V_{\text{ref}}^+ - \sqrt{(V_g^+)^2 - (X_g I_d^+)^2}}{X_g} \quad (20)$$

到此就推导出了注入无功电流大小和电压支撑效果的关系，即注入无功电流的大小和电压支撑能力强弱成正比。当注入 $I_{q_upper}^+$ 时，幅值最大相的电压幅值可以达到相电压上限约束，正序电压得到最大化支撑；当注入无功电流超过 $I_{q_upper}^+$ 时，输出相电压幅值将超限，危害逆变器安全运行。

当电压跌落时，电流型 VSG 的功率增量是由其无功指令电流控制发出的，因此，在设计 VSG 无功环参数 D_q 以及 K 时，需要增加安全电压支撑的约束，保证任意电压跌落时， I_{q_vsg} 小于 $I_{q_upper}^+$ ，此时 VSG 在进行主动电压支撑时相电压幅值即可均不超限。

2) 电流限幅

为保证控制策略在逆变器安全运行的前提下，尽可能主动支撑电网，本文控制策略需要维持 VSG 特性，并保证电流不超限。

根据式(11)，逆变器输出各相电流可以表示为

$$\begin{cases} I_{abc} = \sqrt{A^2 + B^2} \\ A = (I_d^+ + I_d^-) \cos \delta + (I_d^+ - I_d^-) \sin \delta \\ B = -(I_q^+ - I_q^-) \cos \delta + (I_q^+ + I_q^-) \sin \delta \\ \delta = \left[\gamma, \gamma + \frac{\pi}{3}, \gamma - \frac{\pi}{3} \right] \end{cases} \quad (21)$$

其中：

$$\gamma = \frac{\varphi^+ + \varphi^-}{2} \quad (22)$$

式中， I_{abc} 分别表示三相电流的幅值 I_a 、 I_b 、 I_c 。

为了逆变器安全运行考虑，故障下应满足三相电流幅值都小于等于最大允许电流 I_{lim} ，建立如下约束：

$$\max(I_a, I_b, I_c) \leq I_{\text{lim}} \quad (23)$$

由于需要实现输出电流三相平衡的目标，负序参考电流需要置零，即

$$I_{dref}^- = 0 \quad (24)$$

$$I_{qref}^- = 0 \quad (25)$$

将式(24)和式(25)代入式(21), 此时相电流幅值三相相等, 可表示为

$$I_{abc} = \sqrt{(I_d^+)^2 + (I_q^+)^2} \quad (26)$$

为在逆变器安全运行前提下充分发挥 VSG 特性主动支撑电网电压, 无功电流参考值整定为

$$I_{qref}^+ = \min(I_{q_vsg}, I_{lim}) \quad (27)$$

此时, 为了尽量维持原有有功出力, 充分利用逆变器容量注入一定的有功功率, 同时电流不越限, 将式(27)代入式(26), 并令 $I_{abc} = I_{lim}$, 得到有功参考电流整定值:

$$I_{dref}^+ = \min(I_{d_vsg}, \sqrt{(I_{lim})^2 - (I_{qref}^+)^2}) \quad (28)$$

4 仿真验证

为验证所提改进 VSG 控制策略在故障下的输出特性以及不同运行场景下的电压支撑效果, 基于 Matlab/Simulink 建立了如图 1 所示的含逆变型新能源发电单元并网仿真系统。逆变器最大允许输出电流 I_{lim} 设为 1.2 p.u., 相电压幅值约束上限 $V_{upper} = 1.1$ p.u.。具体参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

参数	数值	参数	数值
IIRG 额定功率 S_b	10 kVA	虚拟转动惯量 J	0.2
直流电压 V_{dc}	800 V	阻尼系数 D_p	5
额定线电压 V	380 V	电压下垂系数 D_q	320
额定电流 I_n	15.2 A	惯性系数 K	7
滤波电感 L_r	10 mH	正序比例系数 k_p^+	100
滤波电容 L_c	20 μ F	正序积分系数 k_i^+	0.1
线路电阻 R_g	0 Ω	负序比例系数 k_p^-	60
线路电感 L_g	4 mH	负序积分系数 k_i^-	0.1

其中 VSG 功率环中关于虚拟转动惯量 J 以及惯性系数 K 的整定需要同时考虑系统良好的稳定性以及动态性能, 而阻尼系数 D_p 和电压下垂系数 D_q 则需要考虑系统调节容量以及电网准则的影响。针对 VSG 功率环控制参数的整定, 目前有一些学者对此展开了深入的研究。本文参考文献[26]的分析方法, 并在无功环参数 D_q 以及 K 的整定上加入 3.2 节提到的安全电压支撑以保证相电压不越限的新约束, 最终将参数整定为 $J = 0.2$, $K = 7$, $D_p = 5$, $D_q = 320$ 。

总仿真时间设为 0.4 s, 当 $t = 0.1$ s 时电网侧母线发生电压跌落, $t = 0.3$ s 时切除故障。其中正常运行时采用传统 VSG 控制策略, 故障期间($t = 0.1 \sim 0.3$ s)切换为本文改进 VSG 控制策略。为验证控制策略在

对称以及不对称故障下的控制效果, 分别设计了两个算例进行实验验证, 具体算例设置如表 2 所示。

表 2 仿真算例设置

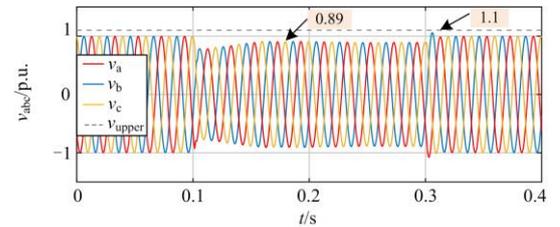
Table 2 Simulation scenario setting

算例	$V_g^+ / \text{p.u.}$	$V_g^- / \text{p.u.}$	$\varphi^+ + \varphi^- / (^\circ)$	$P_{set} / \text{p.u.}$
1	0.8	0	0	1.0
2	0.6	0.25	12	1.0

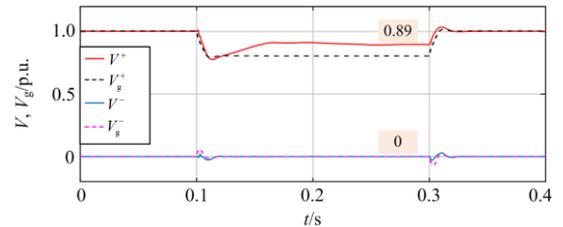
4.1 算例 1: 对称电压跌落

在 $t = 0.1$ s 时, 交流侧发生对称故障, 网侧母线发生对称电压跌落($V_g^+ = 0.8$ p.u., $V_g^- = 0$ p.u.), VSG 有功出力设定值 P_{set} 设定为 1 p.u.。

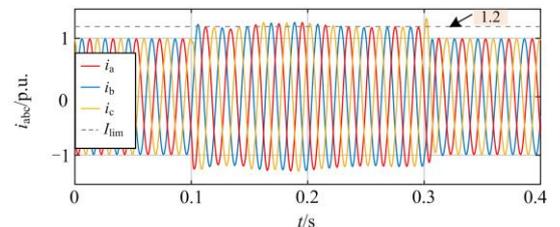
图 5 展示了场景 1 下改进 VSG 控制 IIRG 的输出特性。由图 5(a)和图 5(b)可知, 当发生对称电压跌落时, 本文改进 VSG 控制策略能够在故障时继续发挥 VSG 特性, 为系统提供惯性与阻尼, 主动支撑电压, PCC 母线正序电压 V^+ 被缓缓支撑到 0.89 p.u., 同时支撑后相电压幅值 V 不越限。如图 5(c)所示, 由于 VSG 有功出力设定值 P_{set} 比较大, 本文改进 VSG 控制根据逆变器容量重新计算有功功率参考值, 实现了电流限幅的目标。由图 5(d)可知, IIRG 在发挥 VSG 特性输出无功功率进行自主电压支撑的同时, 也输出了较多的有功功率 $P = 0.81$ p.u., 这有利于提高系统运行稳定性。



(a) PCC 母线三相电压



(b) PCC 及网侧母线正负序电压幅值



(c) 逆变器输出三相电流

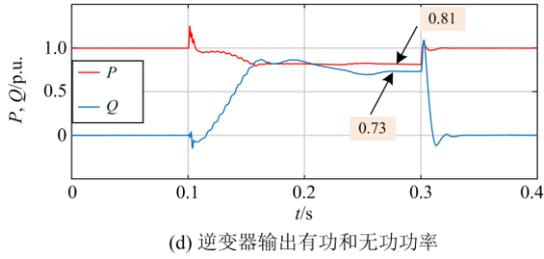


图 5 场景 1 下改进 VSG 控制输出特性

Fig. 5 Improved VSG control output performance in scenario 1

图 6 展示了场景 1 下传统 VSG 控制 IIRG 的输出特性。在电网发生对称电压跌落下，传统 VSG 控制可以实现对电网的主动电压支撑，由于没有限流措施，其在故障下保持原有有功出力，输出电流超限，达到了 1.35 p.u.，如图 6(c)所示。

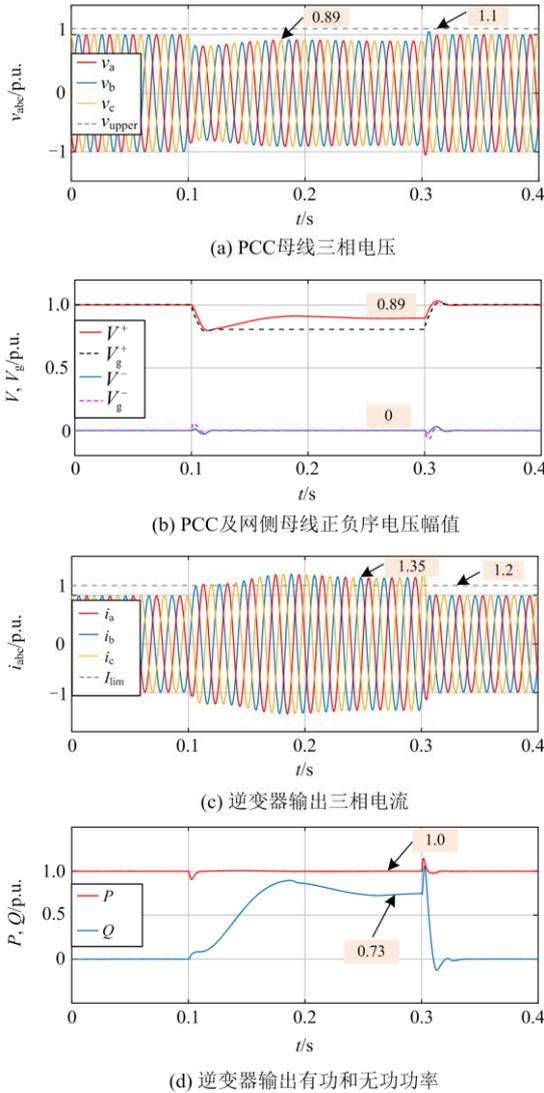


图 6 场景 1 下传统 VSG 控制输出特性

Fig. 6 Classical VSG control output performance in scenario 1

4.2 算例 2：不对称电压跌落

在 $t = 0.1$ s 时，网侧母线发生不对称电压跌落 ($V_g^+ = 0.6$ p.u., $V_g^- = 0.25$ p.u.)，VSG 有功出力设定值 P_{set} 设定为 1 p.u.。

图 7 展示了场景 2 下改进 VSG 控制 IIRG 的输出特性。由图 7(a)和图 7(b)可知，不对称电压跌落下本文 VSG 控制策略依然可以发挥 VSG 特性主动支撑电网，且支撑后相电压幅值均低于 1.1 p.u.，属于安全范围。PCC 母线正序电压 V^+ 提升了 0.08 p.u.，达到了 0.68 p.u.。如图 7(c)和图 7(d)所示，本文控制输出电流三相平衡，且电流达到限值，充分利用了逆变器容量发挥 VSG 特性进行电压支撑，同时也注入了一定的有功功率，输出有功功率平均值 $\bar{P} = 0.66$ p.u.。

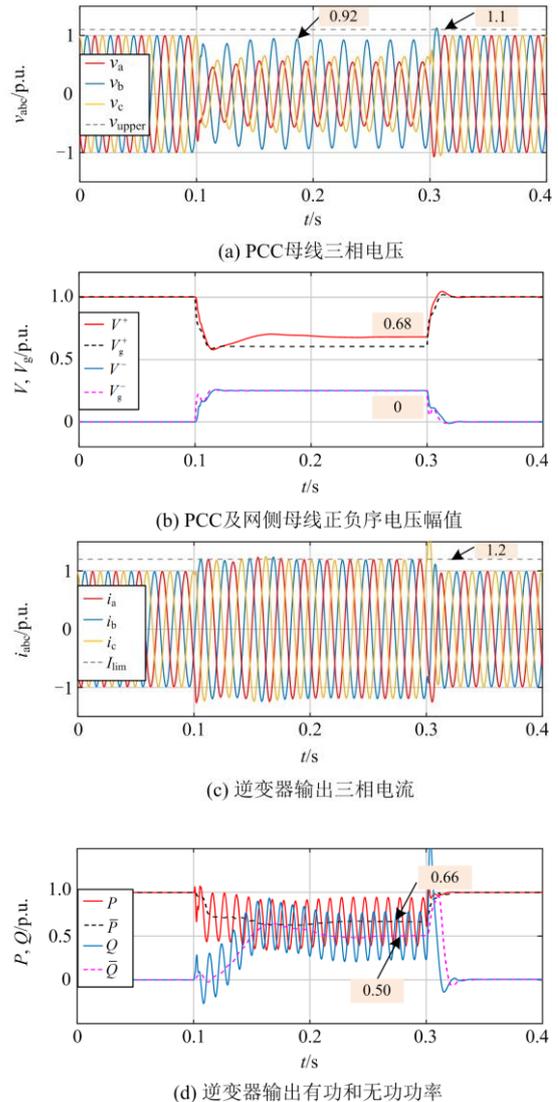


图 7 场景 2 下改进 VSG 控制输出特性

Fig. 7 Improved VSG control output performance in scenario 2

图 8 展示了场景 2 下传统 VSG 控制 IIRG 的输出特性。如图 8(a)和图 8(b)所示, 当电压三相不对称时, 传统 VSG 控制有功无功指令电流出现振荡。此时 VSG 输出功率不稳定进而导致 PCC 正负序电压发生振荡, 如图 8(c)所示。由图 8(d)可知, 和本文控制策略相比, 传统 VSG 输出电流三相不平衡且严重越限, 最大相电流的幅值达到了 1.84 p.u., 危害逆变器安全运行。

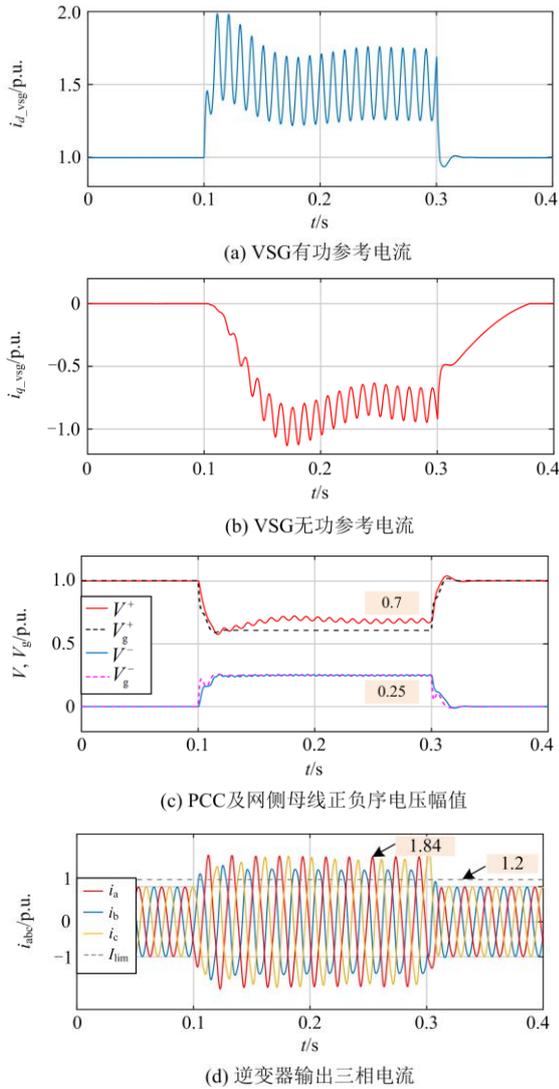


图 8 场景 2 下传统 VSG 控制输出特性

Fig. 8 Classical VSG control output performance in scenario 2

4.3 与其他 VSG 低压穿越控制效果比较

与本文改进控制策略相比, 现有 VSG 低压穿越控制大多无法在故障时发挥 VSG 特性支撑电网, 只能维持恒定功率输出。本节选取文献[20]提出的考虑不平衡电网电压的 VSG 平衡电流控制进行对比。

上述两种控制的效果对比环节, 选择本文 4.2

节算例 2 ($V_g^+ = 0.6 \text{ p.u.}, V_g^- = 0.25 \text{ p.u.}$)的不平衡电压跌落场景, 仿真结果如图 9 所示。

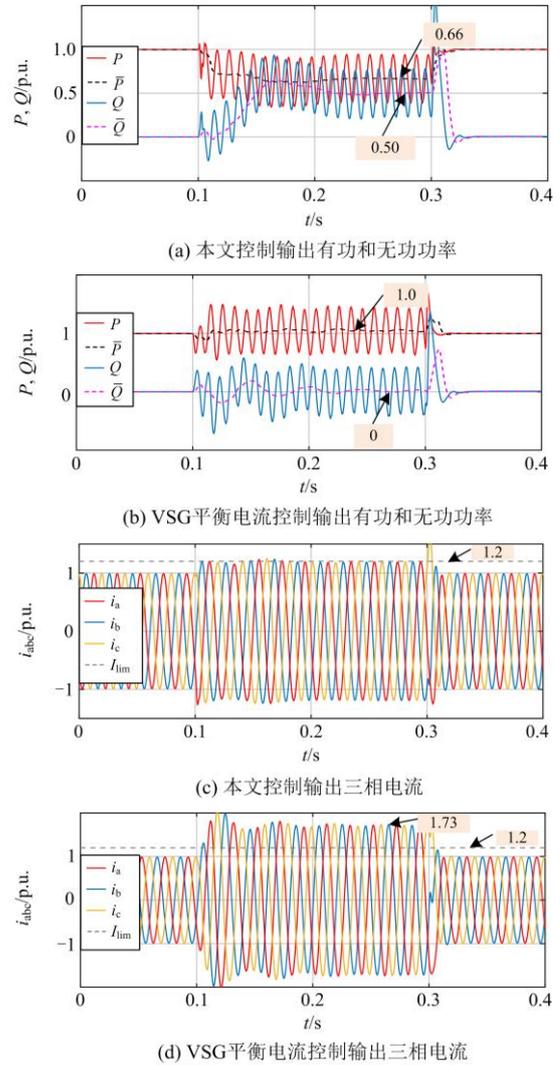


图 9 本文控制与 VSG 平衡电流控制效果对比

Fig. 9 Comparison between the proposed control and the VSG balance current control

由图 9(a)和图 9(b)可知, 当电网发生不对称电压跌落时, 本文控制策略在故障期间发挥了 VSG 阻尼惯量特性, 为电网注入了一定量的无功功率, 主动支撑电网电压, 故障时产生的无功功率增量达到了 0.5 p.u., 而 VSG 平衡电流控制在电压跌落情况下只能保持原有功率设定值输出, 输出无功功率为 0 p.u., 故障时失去了 VSG 特性, 不能有效支撑电网。如图 9(c)和图 9(d)所示, 本文控制策略中加入了限流算法, 优先保证电压支撑能力, 故障期间限制有功功率的输出以保证逆变器安全运行, 而 VSG 平衡电流策略由于缺少相应的限流策略, 仍然保持正常运行时功率指令输出, 电流严重越限, 电

流幅值达到了 1.73 p.u.。由此可见, 本文控制策略通过改进控制结构以及限流算法的加入, 在电压跌落情况下仍可以发挥 VSG 特性主动支撑电网, 较 VSG 平衡电流策略提升显著。

5 结论

传统 VSG 控制策略在正常工况下可以实现 IIRG 对电网频率、电压的自主调节, 模拟同步发电机的输出特性, 维持电力系统稳定运行。但当电网发生电压跌落时, 其调节特性受到影响且低电压穿越能力不足。针对以上问题, 本文提出了一种改进 VSG 控制策略, 在故障下有效地改善了输出电能质量且可以保持 VSG 特性支撑电网。本文提出的改进控制策略具有如下几点特性:

1) 提出了改进 VSG 控制拓扑结构, 不对称电压跌落下仍能保持 VSG 阻尼与惯性特性, 有效支撑电网正序电压。

2) 提出了新的电压支撑方法, 对 VSG 参数设计建立了新的约束, 保证 VSG 在进行电压支撑时, 相电压均不越限。

3) 提出的改进 VSG 控制策略, 提高了 VSG 的低压穿越能力, 故障时可持续为系统提供惯性和阻尼, 提升了 VSG 的并网适应性。

参考文献

- [1] 米阳, 王鹏, 邓锦, 等. 孤岛交直流混合微电网群分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 48(20): 1-8.
MI Yang, WANG Peng, DENG Jin, et al. Hierarchical coordinated control of island AC/DC hybrid microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2021, 48(20): 1-8.
- [2] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3507.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507.
- [3] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 506-515.
ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515.
- [4] ZHONG Q. Power-electronics-enabled autonomous power systems: architecture and technical routes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5907-5918.
- [5] WANG Dongxu, WU Hongbin. Application of virtual synchronous generator technology in microgrid[C] // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), May 22-26, 2016, Hefei, China: 3142-3148.
- [6] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [7] 刘辉, 高舜安, 孙大卫, 等. 光伏虚拟同步发电机并网小信号稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 417-424.
LIU Hui, GAO Shun'an, SUN Dawei, et al. Small signal stability analysis of grid-connected photovoltaic virtual synchronous generators[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(2): 417-424.
- [8] WU H, RUAN X, YANG D, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.
- [9] 袁健, 杨伟. 独立微网中多虚拟同步机功率精确分配控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 35-42.
YUAN Jian, YANG Wei. Accurate power sharing control strategy of multiple virtual synchronous generators in independent micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 35-42.
- [10] LIU J, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [11] 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.
- [12] 程子霞, 于洋, 柴旭峥. 基于协同自适应控制的光储 VSG 运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 79-85.
CHENG Zixia, YU Yang, CHAI Xuzheng. Research on operation control of a photovoltaic system with storage VSG based on cooperative adaptive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 79-85.
- [13] 温春雪, 陈丹, 胡长斌, 等. 微网逆变器的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 120-126, 183.
WEN Chunxue, CHEN Dan, HU Changbin, et al. Self-adaptive control of rotational inertia and damping coefficient of VSG for converters in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 120-126, 183.
- [14] 杨明, 高龙将, 王海星, 等. 电网不平衡下虚拟同步发电机功率-电流协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2019, 47(6): 17-23.
- YANG Ming, GAO Longjiang, WANG Haixing, et al. Coordinate control of power and current for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 17-23.
- [15] 高怀正, 李华, 常兴, 等. 电压跌落下虚拟同步发电机故障穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 39-46.
- GAO Huaizheng, LI Hua, CHANG Xing, et al. Fault ride-through of virtual synchronous generator under voltage drop[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 39-46.
- [16] 中国电力科学研究院. 光伏电站接入电力系统技术规范: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- China Electric Power Research Institute. Technical rule for connecting PV power station to electric power systems: GB/T 19964—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [17] 陈天一, 陈来军, 郑天文, 等. 基于模式平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2134-2140.
- CHEN Tianyi, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2134-2140.
- [18] SHI K, SONG W, XU P, et al. Low-voltage ride-through control strategy for a virtual synchronous generator based on smooth switching[J]. IEEE Access, 2018, 6: 2703-2711.
- [19] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-412.
- SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-412.
- [20] 陈天一, 陈来军, 汪雨辰, 等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步发电机平衡电流控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 904-909.
- CHEN Tianyi, CHEN Laijun, WANG Yuchen, et al. Balanced current control of virtual synchronous generator considering unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 904-909.
- [21] 万晓凤, 胡海林, 聂晓艺, 等. 电网电压不平衡时的改进虚拟同步机控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3573-3581.
- WAN Xiaofeng, HU Hailin, NIE Xiaoyi, et al. An improved control strategy for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3573-3581.
- [22] CHEN L, LI G, CHEN H, et al. Investigation of a modified flux-coupling-type SFCL for low-voltage ride-through fulfillment of a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-6.
- [23] 颜湘武, 崔森, 贾焦心. 虚拟稳态同步负阻抗的 VSG 功率解耦策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 102-113.
- YAN Xiangwu, CUI Sen, JIA Jiaoxin. Virtual steady state synchronous negative impedance of a VSG power decoupling strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 102-113.
- [24] 葛俊, 刘辉, 江浩, 等. 虚拟同步发电机并网运行适应性分析及探讨[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 26-35.
- GE Jun, LIU Hui, JIANG Hao, et al. Analysis and investigation on grid-connected operation adaptability of virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 26-35.
- [25] WU W, ZHANG M, CHEN Y, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6460-6472.
- [26] 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.

收稿日期: 2021-11-03; 修回日期: 2022-01-14

作者简介:

丁一凡(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为逆变型新能源发电并网控制; E-mail: 879527858@qq.com

季亮(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: jihome2002@sina.cn

常潇(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网、电能质量分析和储能应用技术等。

(编辑 魏小丽)