

DOI: 10.7667/PSPC171236

电压跌落下虚拟同步发电机故障穿越控制

高怀正, 李华, 常兴, 刘佳晨, 郭鹤飞

(内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010080)

摘要: 针对虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)传统平衡电流控制在电压发生跌落时无法实现穿越问题, 提出一种满足 VSG 平衡电流控制的低电压穿越(Low Voltage Ride-Through, LVRT)控制策略。分析了 VSG 传统平衡电流控制基本原理以及在电压跌落时无法实现穿越的原因。在此基础上, 提出一种限功率给定的控制方案。按照传统 LVRT 电流指令计算出功率给定值, 在维持 VSG 机械惯性属性不变的前提下, 通过减小无功环惯性系数和维持有功功率差额以改善系统对称故障时无功输出速率和有功调节时间, 引入相位调节控制消除了故障解除瞬间系统功率失稳问题。仿真结果验证了该控制策略的正确性和有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 低电压穿越; 平衡电流控制; 限功率给定; 相位调节

Fault ride-through of virtual synchronous generator under voltage drop

GAO Huaizheng, LI Hua, CHANG Xing, LIU Jiachen, GUO Hefei

(College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China)

Abstract: According to the problem that the traditional VSG balanced current control is not able to ride through faults during the voltage drop, a Low Voltage Ride-Through (LVRT) control strategy is proposed to meet the VSG balanced current control. The basic principle of VSG balanced current control and the reason why it cannot ride through low voltage fault are analyzed, on this basis, a control method of power limit is proposed. According to the traditional LVRT current command, the power reference value is calculated. Under the premise of maintenance of VSG mechanical inertia properties, and by reducing the reactive ring inertia coefficient and maintaining active power difference, the system reactive power output rate and active adjustment time are improved during symmetrical fault, the problem of power instability during the fault release is eliminated by introducing a phase adjustment. The validity and effectiveness of this control strategy is verified by simulation results.

This work is supported by Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (No. 2016BS0508).

Key words: virtual synchronous generator; low voltage ride-through; balanced current control; power limit; phase adjustment

0 引言

随着分布式电源不断接入电网, 以逆变器为并网接口的分布式电源在传统矢量控制下无法向电网输送惯性和阻尼, 这对电网安全稳定运行带来了严峻挑战^[1-3]。为此, 一些国内外学者提出一种逆变器新型控制技术——虚拟同步发电机(VSG)技术^[4-6]。将同步发电机转子运动方程和阻尼特性引入控制算法中, 以模拟同步发电机转动惯量特性, 相比传统矢量控制, 在弱电网下具有更好的运行稳定性^[7-8], 可适用于光伏发电^[9]、风力发电^[10]和微电网^[11-13]等多种领域。

在实际电网运行中, 易受到雷击或线路老化等原因而发生短路故障, 造成电压跌落^[14-15], 为此有必要研究适用于 VSG 的 LVRT 问题。若通过投切旁路电阻等^[16]硬件电路的方式不仅增加了系统损耗, 而且提高了投入成本, 显然方案并不理想。现阶段相关研究主要分两种方向: 一种是在 VSG 原有控制基础上进行操作^[17-18]。文献^[17]通过引入电流内环控制, 在保持 VSG 特性不变的同时有效抑制电流不平衡分量, 但电流限幅能力不足, 对于电压深度跌落故障, 仍存在电流越限状况, 威胁设备安全; 文献^[18]结合虚拟电阻技术和向量限流技术分别对对称故障时的电流暂态和稳态成分实施限制, 但在故障恢复阶段, 三相电流调节不平衡度过高, 功率振

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目资助 (2016BS0508)

荡严重。另一种是与传统 LVRT 控制作模式切换^[19], 但改变了 VSG 的本质属性。

本文以 VSG 三相电流平衡控制为基础, 针对 LVRT 控制问题, 提出在故障期间限制系统馈网功率方案以实现降低输出电流幅值的目的。针对对称故障采取了进一步的措施, 改善了故障期间的馈网功率调节速率。首先分析了在电压跌落时 VSG 平衡电流控制存在的问题和原因, 其次详述了 LVRT 控制策略, 最后利用仿真验证了所提策略的有效性。

1 VSG 基本原理

虚拟同步发电机主电路拓扑如图 1 所示。其中: 全控型器件 Q₁—Q₆ 构成三相逆变桥, 电感 L₁ 和电容 C 构成逆变器侧 LC 滤波器, 桥臂中点电压 e_a、e_b、e_c 模拟同步发电机内电势, U_{dc} 为直流侧电压。

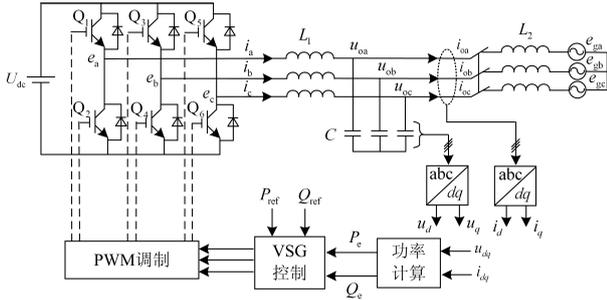


图 1 逆变器 VSG 控制主电路拓扑结构

Fig. 1 Inverter main circuit topology based VSG control

由图 1, 对并网点电压 u_{oa} 、 u_{ob} 、 u_{oc} 和电流 i_{oa} 、 i_{ob} 、 i_{oc} 作 $3s/2r$ 变换, 即将三相电压电流依据磁动势等效原则由三相静止坐标系变换到两相旋转坐标系中, 根据瞬时功率理论计算 VSG 输出有功功率 P_e 和无功功率 Q_e , 则

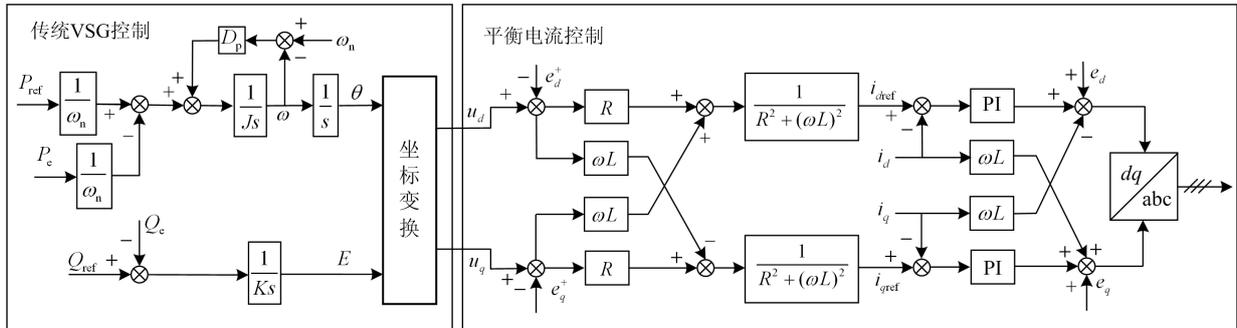


图 2 传统 VSG 平衡电流控制框图

Fig. 2 Configuration of traditional VSG balanced current control

平衡电流控制的思想源自传统 LVRT 方案中对电流的直接控制, 而传统 VSG 控制与直接电流控制时的输入输出接口和控制机理存在差异, 为此根据在 dq

$$P_e = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (1)$$

$$Q_e = \frac{3}{2}(u_q i_d - u_d i_q) \quad (2)$$

式中: u_d 和 u_q 为逆变器并网电压在 dq 坐标系下的电压分量; i_d 和 i_q 为逆变器并网电流在 dq 坐标系下的电压分量。

2 VSG 平衡电流控制

VSG 平衡电流控制框图如图 2 所示。主要包括传统 VSG 控制和平衡电流控制。其中 VSG 控制由有功-频率控制环和无功-电压控制环构成, 分别模拟了同步发电机的旋转惯性、一次调频特性和一次调压特性。与传统矢量控制相比, VSG 控制通过引入转动惯量和阻尼特性以实现频率稳调的目的, 一定程度上, 弥补了传统矢量控制关于频率调节的不足。

传统 VSG 双功率控制环数学模型可表示为

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{ref}}{\omega_n} + D_p (\omega_n - \omega) - \frac{P_e}{\omega_n} \quad (3)$$

$$K \frac{dE}{dt} = Q_{ref} - Q_e \quad (4)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

式中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率参考值; P_e 和 Q_e 分别为并网有功功率和无功功率实际值; J 为有功-频率控制环虚拟转动惯量, 模拟同步发电机的惯性特性; 阻尼系数 D_p 模拟同步发电机阻尼特性; ω_n 为角频率额定值; K 为 VSG 励磁调节的惯性系数; E 为 VSG 输出电压的参考幅值。

坐标系下建立的 VSG 内电势端至并网点间的电压电流矢量关系, 推导出电流内环控制的电流指令, 从而形成传统 VSG 控制至内环电流控制之间的链接模块。

电流平衡控制中的电流参考值由式(6)给出。

$$\begin{pmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{pmatrix} = \frac{1}{R^2 + (\omega L)^2} \begin{pmatrix} R & \omega L \\ -\omega L & R \end{pmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_d^+ \\ e_q^+ \end{bmatrix} \quad (6)$$

然而, VSG 传统平衡电流控制仅仅考虑得是对电流不平衡分量的抑制, 电流限幅能力有限, 无法满足电压跌落期间系统对故障穿越性能的要求。在电网电压发生跌落工况下, 若不改变输入功率指令, 将难以向电网提供无功支撑, 同时会出现电流幅值越限现象, 可能造成设备损坏。为此有必要对 VSG 传统平衡电流控制做一些改进。

3 改进控制

3.1 限功率控制

相比实际同步发电机, VSG 可以对惯性系数、功率给定等作灵活多变的调节, 当电压发生跌落时, 根据国家并网标准规定, 设置向电网注入的动态无功电流 I_q 满足

$$\begin{cases} I_q \geq 1.5 \times (0.9 - U^+ / U_N) I_N & 0.2 \leq U^+ / U_N \leq 0.9 \\ I_q \geq 1.05 \times I_N & U^+ / U_N < 0.2 \\ I_q = 0 & U^+ / U_N > 0.9 \end{cases} \quad (7)$$

为限制故障电流在额定范围以内, 设置有功电流 I_d 满足

$$I_d = \sqrt{I_N^2 - I_q^2} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中: U^+ 为并网点电压正序分量幅值; U_N 为并网点电压额定值; I_N 为并网点电流额定值。

针对对称跌落时, 根据式(7)及式(8)求得的电流指令, 利用式(1)和式(2)就可计算出对应的 VSG 并网功率值, 由于不存在电压负序分量, 即

$$U_d = U_d^+ \quad (9)$$

$$U_q = U_q^+ \quad (10)$$

式中, U_d^+ 和 U_q^+ 分别为并网点电压 U 在 dq 坐标系下的电压正序分量。所以 VSG 并网功率(亦即输入功率参考)为

$$P_1 = \frac{3}{2} (U_d^+ I_d + U_q^+ I_q) \quad (11)$$

$$Q_1 = \frac{3}{2} (U_q^+ I_d - U_d^+ I_q) \quad (12)$$

电压非对称跌落时, 由于存在负序电压, 即

$$U_d = U_d^+ + U_d^- e^{-j2\omega t}; \quad U_q = U_q^+ + U_q^- e^{-j2\omega t}$$

代入式(1)和式(2)中并整理, 得 VSG 馈网功率为

$$P_2 = \underbrace{\frac{3}{2} (U_d^+ I_d + U_q^+ I_q)}_{\text{有功直流分量}} + \underbrace{\frac{3}{2} (U_d^- I_d + U_q^- I_q) e^{-j2\omega t}}_{\text{有功波动分量}} \quad (13)$$

$$Q_2 = \underbrace{\frac{3}{2} (U_q^+ I_d - U_d^+ I_q)}_{\text{无功直流分量}} + \underbrace{\frac{3}{2} (U_q^- I_d - U_d^- I_q) e^{-j2\omega t}}_{\text{无功波动分量}} \quad (14)$$

由于平衡电流控制以抑制电流负序分量为控制目标, 在电流幅值被限制时, 并网功率存在二倍工频波动属正常现象。由此选取功率直流分量作为 VSG 输入参考指令。

综上所述, 电压对称跌落和非对称跌落的功率指令可统一为如式(15)和式(16)所示。

$$P^* = \frac{3}{2} (U_d^+ I_d + U_q^+ I_q) \quad (15)$$

$$Q^* = \frac{3}{2} (U_q^+ I_d - U_d^+ I_q) \quad (16)$$

在电网电压跌落时, VSG 功率指令由额定状态切换至式(15)和式(16)计算值, 根据上述理论, 系统稳定时 VSG 输出总功率被限制, 输出电流将不会出现过流现象。

3.2 提升功率调节速率控制

VSG 控制因引入了同步发电机的机械惯性和励磁惯性特性, 相较于传统矢量控制具有更优的稳定性, 但这两种惯性同样会减慢低电压期间对并网功率的调节速率。需要说明的是, 许多学者在有关 VSG 的研究和操作中, 认为模拟同步发电机应当以解决频率稳定为主, 甚至在有些方案中, 对同步发电机励磁惯性特性完全忽略, 认为 VSG 无功功率控制与下垂控制可以等效^[20]。为此, 本文以故障期间维持 VSG 机械惯性不变为前提, 优先考虑对无功功率的调节。为实现 VSG 在故障期间能够快速输出无功功率, 在故障发生时, 可降低无功控制环中的惯性系数, 使输出无功功率快速调整至指令值。但是, K 值的减小同样会降低系统的稳定裕度, 在不考虑有功控制环与无功控制环相互耦合的前提下, VSG 无功-电压环的开环传递函数为^[21]

$$G_{QE}(s) = \frac{1}{K_S} \cdot \frac{as^2 + bs + c}{(R + sL)^2 + X^2} \quad (17)$$

式中:

$$\begin{cases} a = \frac{L^2}{R^2 + X^2} (EX - UR \sin \alpha - UX \cos \alpha) \\ b = \frac{2RL}{R^2 + X^2} (EX - UR \sin \alpha - UX \cos \alpha) \\ c = 2EX - UR \sin \alpha - UX \cos \alpha \end{cases}$$

式中： α 为VSG输出电压与电网电压的夹角； $X = \omega_n L$ 。

图3给出了不同 K 值下，无功-电压控制环的开环波德图，图中箭头方向代表 K 值减小。可以看出，随着 K 值减小，幅频特性谐振峰最终超过0 dB，系统失去稳定，综合系统稳定性能及动态性能考虑，设置故障期间 K 值由100降至1。

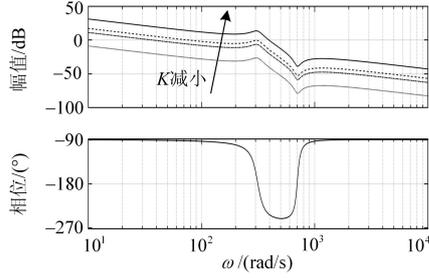


图3 无功功率开环传递函数波特图

Fig. 3 Bode plots of reactive power transfer function

引入励磁惯性系数调节后的无功环控制框图如图4所示。

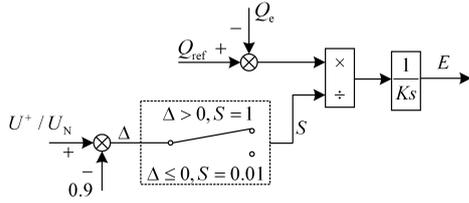


图4 无功环控制框图

Fig. 4 Reactive power loop control block diagram

图中： Δ 为电压跌落程度与0.9的差值，以此来判断是否变动励磁惯性系数； S 为开关状态值，当 $\Delta > 0$ 时， S 输出为1，反之输出为0.01。

针对有功功率的调节，由于保持了VSG机械惯性特性不变，不易实现有功功率的快速稳定，但为了尽量缩短有功功率的调节时间，有必要对功率指令切换控制进行改进。分析如下：

由同步发电机的调频特性可知，频率调节速率直接影响着有功调节速率。对于式(3)，当忽略阻尼模块时，可简化为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{\text{ref}} - P_e}{J\omega_n} \quad (18)$$

可知频率的调节速率与惯性系数成反比，与有功功率差额(即 $P_{\text{ref}} - P_e$)成正比。由前述可知，本文维持VSG的机械惯性特性不变，因此 J 不变，为使故障期间频率快速调节，只能通过控制功率差额来实现。因此，故障期间有功给定设置为

$$P_{\text{ref}} = P_n \quad |P^* - P_e| > M \quad (19)$$

$$P_{\text{ref}} = P^* \quad |P^* - P_e| \leq M \quad (20)$$

式中： P_n 为电压正常时VSG有功功率额定参考指令； M 为衡量VSG实际输出有功功率与LVRT的功率指令间功率差额的阈值，以此来判断VSG有功输出是否跟踪至LVRT指令值。

值得注意的是，提升功率调节速率控制仅适用于电压对称跌落故障，非对称故障下若降低励磁惯性系数，会增大系统带通，并且削弱对电流负序分量的抑制效果。因此本控制仅用在对称故障下的控制中。

3.3 故障恢复期间控制

在电网电压恢复时，伴随着网侧电压相位和幅值的跳变，同时需要VSG功率指令、无功环惯性系数等调整至原来状态。若不能及时协调控制好这些状态变动，仅由VSG本身难以适应电网调节，期间可能会出现功率过调和电流越限的状况，危害设备的安全运行。

为使在电压恢复时VSG能快速适应网侧电压相位跳变，对VSG相位输出端引入相位调节单元，如图5所示。

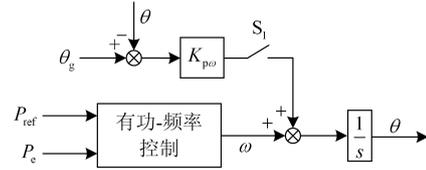


图5 相位调节控制框图

Fig. 5 Bloch diagram of phase adjustment control

建立平衡点处相位同步单元小信号模型，其传递函数 $G(s)$ 和误差传递函数 $E(s)$ 分别为

$$G(s) = \frac{\hat{\theta}(s)}{\hat{\theta}_g(s)} = \frac{K_{p\omega}}{K_{p\omega} + s} = \frac{1}{1 + \frac{s}{K_{p\omega}}} \quad (21)$$

$$E(s) = \frac{s}{K_{p\omega} + s} \quad (22)$$

式中， $1/K_{p\omega}$ 为惯性系数。

可见，VSG输出相位与电网电压相位间为一阶惯性系统。在施加单位阶跃激励时，由终值定理可得稳态误差为

$$e_{ss}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [sE(s)(1/s)] = 0 \quad (23)$$

因此，相位预同步单元可以保证相位无误差跟踪，使VSG输出相位与电网电压相位实时同步。

由于保证了 VSG 输出相位对电网电压的快速跟踪, 在检测到电网电压恢复后, 功率输入参考值可自动调整至额定值。

4 仿真验证

为了验证上述所提控制策略的有效性和正确性, 依照图 1 所示系统拓扑结构, 在 Matlab/Simulink 仿真平台下搭建了直流侧为恒定电压源的逆变器 VSG 控制仿真模型, 具体参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真主要参数

Table 1 Main parameters of system simulation

参数	数值	参数	数值
直流电压 U_d/V	800	有功设定值 P_n/kW	100
滤波电感 L_1/mH	3.2	无功设定值 $Q_n/kvar$	0
滤波电容 $C/\mu F$	4	转动惯性系数 J	1
线路电感 L_2/mH	0.5	阻尼系数 D_p	50
电阻 R/Ω	0.1	励磁惯性系数 K	100
电网电压 U_g/V	220	开关频率 f_s/kHz	100

分别在三相电压对称跌落故障和非对称跌落故障下对所提控制策略进行仿真验证, 故障均设定电压下降为额定值的 45%。以下仿真时长均设定为 2.5 s: 其中, 0~0.5 s 系统正常工作, 0.5~1.5 s 电网电压故障, 即 0.5 s 时短路故障发生, 1.5 s 故障解除; 1.5~2.5 s 电网电压恢复, 系统回归正常工作。

4.1 电压对称跌落故障

图 6 给出了电压对称跌落时, 在 VSG 传统平衡电流控制下三相输出电流波形和输出功率波形。可以看出故障期间三相输出电流幅值显著增加。在本文设定的电压跌落 45% 工况下, 三相输出电流幅值最高达 350 A, 超过了正常额定值 200 A 的 75%, 严重危害逆变器设备的安全稳定运行。在 1.5 s 故障解除时, 由于电网电压相位和幅值发生突变, VSG 平衡电流控制难以适应这种变动, 在自身调节过程中出现电流畸变与严重越限状况。

图 7 为引入限功率给定控制策略和降低励磁惯性系数后的三相输出电流波形和输出功率波形。从图中可以看出, 在引入限功率给定策略后, 由于系统输出总功率参考值降低, 故障期间的三相电流幅值降至 200 A 左右, 相较于图 6 有了明显改善。根据传统 LVRT 方案中的有功电流和无功电流分配原则, 向电网中注入了一定的无功功率(37 kvar 左右), 降低了有功功率的输出(由 100 kW 降至 41 kW 左右), 并且根据需要, 由于在故障期间减小了 VSG 励磁惯性系数, 由图 7 可知, 无功功率能够快速响应

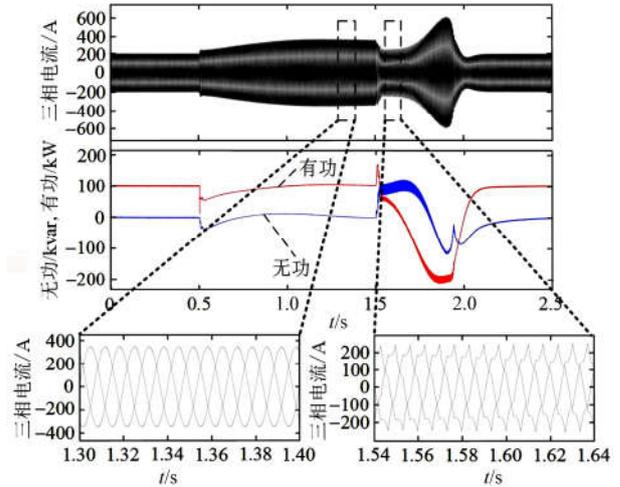


图 6 对称故障下三相电流和功率输出波形

Fig. 6 Three-phase current and power output waveform under symmetrical fault

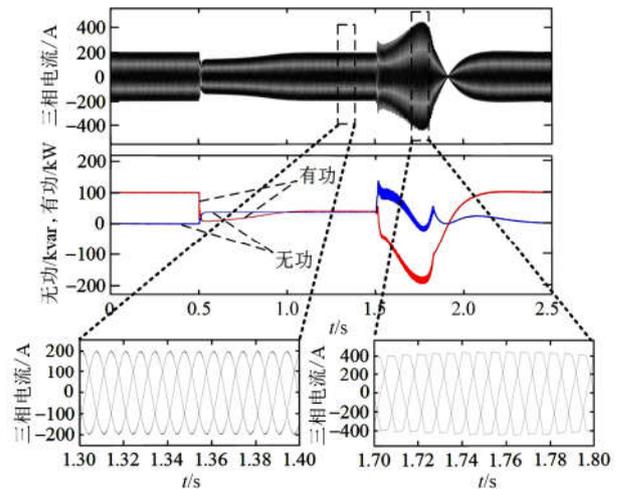


图 7 对称故障下(含限功率控制)三相电流和功率输出波形

Fig. 7 Three-phase current and power output waveform under symmetrical fault (with power limit control)

至指令值。然而有功功率的调节较为缓慢, 这是由 VSG 的虚拟机械惯性所引起的。

在不改变 VSG 虚拟机械惯性属性的基础上, 图 8 给出了引入维持有功差额思想后的仿真结果。可以看出, 相较于图 7, 输出有功功率调节时间由原来的 0.5 s 缩短至 0.25 s, 提高了有功输出调节速率。

为改善 VSG 在故障恢复后的暂态调节过程, 引入了相位调节控制。图 9 给出了三相输出电流和功率波形图。由此可以看出, 在故障恢复后, 由于相位调节单元快速调整了 VSG 的相位走向, 避免了 VSG 输出电流越限和畸变的现象, 提高了系统暂态稳定性。

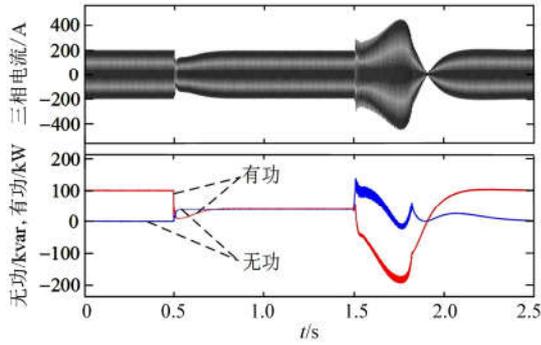


图 8 三相电流和功率输出波形(含有功差额控制)
Fig. 8 Three-phase current and power output waveform (with active power difference control)

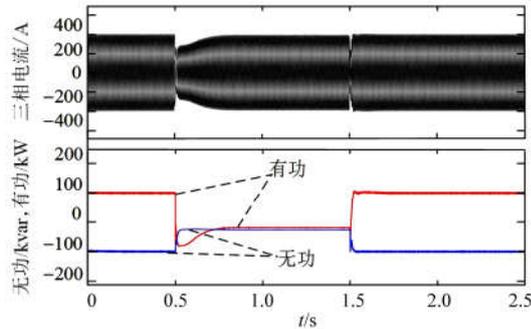


图 9 整体控制策略下三相电流和功率输出波形
Fig. 9 Three-phase current and power output waveform under overall control strategy

4.2 电压非对称跌落故障

VSG 传统平衡电流控制尽管能够消除非对称故障期间的电流负序分量,但对故障电流限幅能力有限,尤其是在电压发生深度跌落时,依然存在故障电流越限的可能。图 10 和图 11 分别给出了电网 a 相电压发生跌落时, VSG 传统平衡电流控制下的电流输出波形和在引入限功率控制策略后的电流输出波形。可以看出,在引入限功率控制策略后,故障电流由 223 A 降至额定电流 200 A 左右,保证了系统设备的安全运行。且故障恢复后,系统能够快速调整至原始运行状态。

图 12 和图 13 则是发生两相电压跌落时, VSG 传统平衡电流控制下的电流输出波形和在引入限功率控制策略后的电流输出波形。可知在同等跌落程度下,两相电压跌落引起的故障电流远大于单相电压跌落引起的故障电流,达到 267 A,这严重威胁设备的安全稳定运行。在引入限功率控制策略后,由于重新调整了输出功率指令,故障电流幅值降至额定值 200 A,并且在故障解除后,系统能够快速恢复至额定状态。

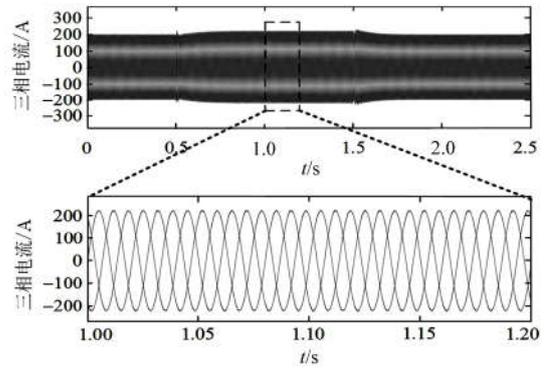


图 10 单相电压跌落时 VSG 传统平衡电流控制下的三相电流输出波形

Fig. 10 Three-phase current output waveform under VSG traditional balanced current control when one-phase voltage drops

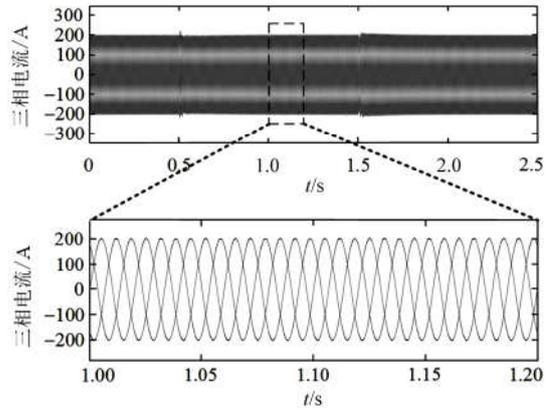


图 11 单相电压跌落时引入限功率给定后三相电流输出波形

Fig. 11 Three-phase current output waveform under the power limit when one-phase voltage drops

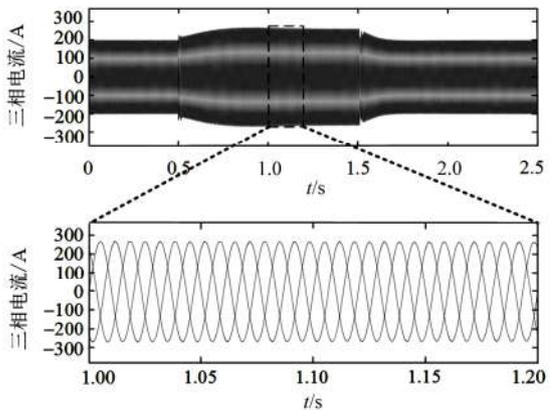


图 12 两相电压跌落时 VSG 传统平衡电流控制下的三相电流输出波形

Fig. 12 Three-phase current output waveform under VSG traditional balanced current control when two-phase voltage drops

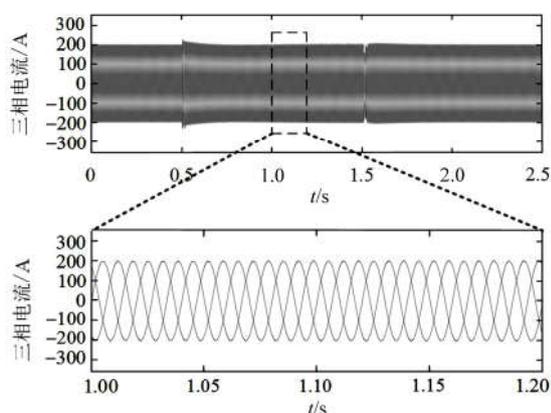


图 13 两相电压跌落时引入限功率给定后
三相电流输出波形

Fig.13 Three-phase current output waveform under the
power limit when two-phase voltage drops

5 结论

VSG 传统平衡电流控制仅适用于电网非对称跌落故障时对电流负序分量的抑制, 无法满足电压跌落时系统对故障穿越性能的要求。本文针对 VSG 传统平衡电流控制在电网电压跌落故障下难以实现穿越问题进行了研究。

1) 提出了限功率给定的控制策略, 对有功和无功重新分配, 可有效抑制故障期间电流幅值越限状况;

2) 为提高对称故障期间功率响应速度, 提出维持有功功率差额和降低无功励磁惯性系数相结合的方法, 在电压对称故障期间可保证功率快速响应至给定值;

3) 引入相位调节单元, 使系统快速恢复至额定状态, 提高了故障恢复期间的暂态稳定性。

VSG 故障期间的调节机理相对复杂, 需要开展大量研究工作。

参考文献

[1] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
LIU Yanghua, WU Zhengqiu, XU Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76.

[2] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.
WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,

2012, 24(2): 12-20.

[3] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[4] DRIESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous generators[C] // Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 2008: 1-3.

[5] ZhONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

[6] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.
MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.

[7] LIU J, MIURA Y S, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.

[8] ALIPOOR J, MIURA Y S, 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.

[9] 郑光辉. 基于虚拟同步发电机功率控制策略的光伏发电系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
ZHENG Guanghui. Research on power control strategy for photovoltaic generation system based on virtual synchronous generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[10] 王克. 基于虚拟同步发电机的风力发电系统接口特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
WANG Ke. Research on interface characteristics of wind power generation system based on virtual synchronous generator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[11] ZHAO H L, YANG Q, ZENG H M, et al. Multi-loop virtual synchronous generator control of inverter-based DGs under microgrid dynamics[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(3): 795-803.

[12] 米阳, 夏洪亮. 基于虚拟同步发电机的微电网改进下

垂控制策略[J]. 广东电力, 2016, 29(2): 54-58.

MI Yang, XIA Hongliang. Improved droop control strategy for micro-grid based on virtual synchronous generator[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(2): 54-58.

[13] 张玉治, 张辉, 贺大为, 等. 具有同步发电机特性的微电网逆变器控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 261-268.

ZHANG Yuzhi, ZHANG Hui, HE Dawei, et al. Control strategy of micro grid converters with synchronous generator characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 261-268.

[14] 周士琼, 王倩, 吕潇, 等. 定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风力发电机组低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 33-39.

ZHOU Shiqiong, WANG Qian, LÜ Xiao, et al. Control strategy of low voltage ride-through for double-fed wind generator with the stator crowbar circuit mode switch[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.

[15] 张谦, 李凤婷, 蒋永梅, 等. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 62-67.

ZHANG Qian, LI Fengting, JIANG Yongmei, et al. Comprehensive control strategy for improving low voltage ride through capability of permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 62-67.

[16] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64.

ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.

[17] 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(4): 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(4): 904-909.

[18] 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): 403-411.

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): 403-411.

[19] 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.

[20] 王振雄, 易皓, 卓放, 等. 应用于光伏微网的一种虚拟同步发电机结构及其动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 444-453.

WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A hardware structure of virtual synchronous generator in photovoltaic microgrid and its dynamic performance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 444-453.

[21] 李武华, 王金华, 杨贺雅, 等. 虚拟同步发电机的功率动态耦合机理及同步频率谐振抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 381-390.

LI Wuhua, WANG Jinhua, YANG Heya, et al. Power dynamic coupling mechanism and resonance suppression of synchronous frequency for virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 381-390.

收稿日期: 2017-08-15; 修回日期: 2017-10-24

作者简介:

高怀正(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网运行控制; E-mail: 1334653429@qq.com

李华(1983—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为微电网运行控制、微电网能量优化管理。E-mail: lihua0806@qq.com

(编辑 魏小丽)