

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191507

不对称电压跌落下考虑场景区分的逆变型 分布式电源控制策略研究

施佳斌¹, 季亮¹, 常潇², 洪启腾³, 曹喆¹, 米阳¹, 包正楷¹, 张林楠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 G1 1XQ)

摘要: 逆变型分布式电源(Inverter-Interfaced Distributed Generation, IIDG)在电网电压跌落下可能存在电流越限、切机等风险, 进而影响其自身和系统的安全稳定运行。对此, 提出一种考虑不同运行场景的 IIDG 控制策略。首先, 以相电压幅值为约束条件, 构建了基于正序分量的电压支撑方程, 实现了正序电压的最大化支撑。其次, 为保证逆变器在安全的前提下充分利用自身容量, 提出一种考虑电压跌落程度和 IIDG 有功出力大小的场景区分方法。然后, 根据不同场景下的电流注入模式和控制目标推导参考电流, 使 IIDG 兼具电压支撑、电流限幅能力。同时, 通过输出有功功率和负序无功功率, 提升了系统稳定性, 降低了电压不平衡度。最后, 基于 Matlab/Simulink 搭建了含 IIDG 的仿真模型, 算例结果验证了所提策略的有效性。

关键词: 不对称电压跌落; 逆变型分布式电源; 控制策略; 电压支撑; 电流限幅; 场景区分

Control strategy for inverter-interfaced distributed generation during unbalanced voltage sag considering scenario classification

SHI Jiabin¹, JI Liang¹, CHANG Xiao², HONG Qiteng³, CAO Zhe¹, MI Yang¹, BAO Zhengkai¹, ZHANG Linnan¹

(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 G1 1XQ, United Kingdom)

Abstract: During voltage sag, the Inverter-Interfaced Distributed Generation (IIDG) may suffer from overcurrent and disconnection, which affect the safe and stable operation of IIDG and the power system. Thus, a new IIDG control strategy considering different operation scenarios is proposed. First, by considering the phase voltage amplitude constraint, a positive sequence components-based voltage support method is established. This maximizes the voltage support capability. To fully use the inverter capacity and ensure its safety, a scenario classification method considering the severity of voltage sag and the active power of the IIDG is presented. Based on the current injection mode of each scenario and the control objectives, the reference currents are calculated to ensure voltage support and current limitation. By delivering the active power and negative sequence reactive power, both system stability and voltage imbalance are improved. Finally, a simulation model with IIDG is established based on Matlab/Simulink. The simulation results verify the effectiveness of the proposed strategy.

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

Key words: unbalanced voltage sag; inverter-interfaced distributed generation; control strategy; voltage support; current limitation; scenario classification

0 引言

近年来, 推动以光伏和风电为代表的分布式新

能源的发展, 正逐步成为许多国家的战略目标^[1-5]。逆变型分布式电源(Inverter-Interfaced Distributed Generation, IIDG)以其高效性和灵活性得到了广泛的应用。然而, 在新能源渗透率不断提高的背景下, IIDG 的输出特性不仅关乎自身的运行安全, 还对电

网的稳定运行带来了重要影响^[6-7]。在电网电压跌落情况下,逆变器可能存在电流越限和电压支撑能力弱等问题,严重时还可能导致 IIDG 的切机、连锁切机等事故,破坏电网的稳定性。并网准则要求^[8-9], DG 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。因此,研究如何保证 IIDG 在安全运行的前提下提升它的电压支撑能力,从而提升其低压穿越能力具有实际意义。

对此,许多学者展开了一系列研究工作。其中,文献[10-11]提出了基于正负序电压矢量定向的 LVRT 策略,通过调节正负序电流分量的比例系数,实现了有功和无功功率的灵活控制。文献[12]以级联型光伏逆变器为研究对象,提出了基于旁路原理的 LVRT 策略,根据电压降落情况,确定旁路的功率单元以实现限流目标。但是,以上方案下的 IIDG 不具备电压支撑能力,不利于实现低压穿越。为提升电压支撑能力,文献[13-15]提出了基于有功、无功功率比例分配的控制策略。然而,该类方法难以精确地选取有功、无功功率参考值。对此,一些学者提出了基于电压跌落的实时参考电流计算控制策略^[16-23],即正序电压每跌落 1%,逆变器需提供的无功电流至少为额定电流的 2%。其中,文献[16-19]所提的 LVRT 的控制方案,在实现电压支撑的同时兼具了限流能力。文献[20]提出了考虑逆变器与直流卸荷电路协调控制的 LVRT 策略,该策略在保证电压支撑的同时,利用卸荷电路抑制了直流母线电压的升高。文献[21]提出了一种基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系的正负序分量分配系数方法,该方法在对称故障时能够提高正序电压,不对称故障时降低电压不平衡度。考虑到实际应用中多种 LVRT 策略之间切换的可能,文献[22-23]提出了一种灵活控制方案,该方案通过调整转移因子,保证了 DG 在不同控制策略下均能实现电压支撑和限流目标。然而,上述控制策略均按照 LVRT 标准要求来注入无功电流,因此电压支撑能力有限。为解决电压支撑能力弱的问题,文献[24-26]提出了基于正负序电压控制的改进控制策略,该类策略以相电压幅值上下限和相电流为约束,实现了电压的最大化支撑。然而,由于该策略同时考虑了正负序电压的控制,对逆变器容量要求较高,可能导致小容量 IIDG 控制器无法正常工作。

对此,本文提出了一种基于正序分量的电压支撑方法,实现了正序电压的最大化支撑。在此基础上,提出了一种考虑电压跌落程度和 IIDG 有功出力大小的场景区分和参考电流计算方法,能够保障 IIDG 在安全运行前提下充分利用自身容量,通过注入有功功率和负序无功功率,提升系统稳定性,并

降低电压不平衡度。最后,基于 Matlab/Simulink 仿真软件验证了所提控制策略的有效性。

1 不对称电压跌落下 IIDG 输出特性分析

本文以 IIDG 为研究对象,其拓扑及控制结构如图 1 所示。为简化控制和分析, IIDG 的直流侧采用了直流电压源,并省略了直流控制回路,该简化模型已得到了广泛的运用^[17]。直流电压源与逆变器相连,经 LC 滤波后接于 PCC 母线,继而与电网相连。逆变器控制系统利用实时量测的并网点电压、电流和设定的有功功率参考值,计算 dq 坐标系下的正负序参考电流,以实现本文的控制目标。

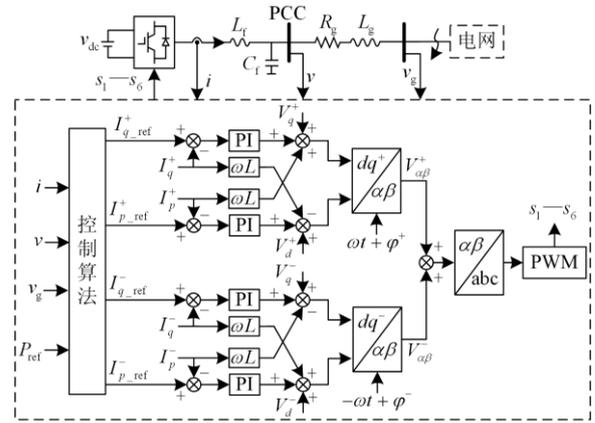


图 1 IIDG 拓扑结构及控制系统

Fig. 1 Topology and control system of IIDG

电压不对称情况下,交流系统任一点 k 的电压矢量在 dq 同步旋转坐标系下可表示为^[27]

$$v_k = v_k^+ + v_k^- = \begin{bmatrix} V_k^+ \cos(\omega t + \varphi^+) + V_k^- \cos(-\omega t + \varphi^-) \\ V_k^+ \sin(\omega t + \varphi^+) + V_k^- \sin(-\omega t + \varphi^-) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: v_k^+ 和 v_k^- 表示交流系统任一点 k 的正序和负序电压; V_k^+ 和 V_k^- 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

$$i = i^+ + i^- = \begin{bmatrix} I_p^+ \cos(\omega t + \varphi^+) - I_q^+ \sin(\omega t + \varphi^+) \\ I_p^+ \sin(\omega t + \varphi^+) + I_q^+ \cos(\omega t + \varphi^+) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_p^- \cos(-\omega t + \varphi^-) - I_q^- \sin(-\omega t + \varphi^-) \\ I_p^- \sin(-\omega t + \varphi^-) + I_q^- \cos(-\omega t + \varphi^-) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: i^+ 和 i^- 表示逆变器输出的正序和负序电流; I_p^+ 、 I_q^+ 、 I_p^- 和 I_q^- 分别为正序有功、无功电流和负序有功、无功电流分量的幅值。

结合图 1 所示的拓扑结构和对称分量法, 在不对称电压跌落时, IIDG 的电压支撑方程可表示为

$$v^+ = v_g^+ + L_g \frac{di^+}{dt} + R_g i^+ \quad (3)$$

$$v^- = v_g^- + L_g \frac{di^-}{dt} + R_g i^- \quad (4)$$

式中: v^+ 和 v^- 为 PCC 母线正负序电压; v_g^+ 和 v_g^- 为电网侧母线正负序电压; L_g 和 R_g 为线路等效电感和等效电阻。由于 IIDG 的电压支撑能力主要反映为支撑 PCC 母线正序电压的能力, 故本文只需利用式(3)来推导参考电流。将式(1)和式(2)代入式(3), 得到以幅值表示的 IIDG 电压支撑方程。

$$V_g^+ = \sqrt{(V^+ - \omega L_g I_q^+ - R_g I_p^+)^2 + (\omega L_g I_p^+ - R_g I_q^+)^2} \quad (5)$$

式中, V^+ 和 V_g^+ 分别为 PCC 和网侧母线正序电压的幅值, 式(5)是下文实现正序电压支撑目标的基础。

2 不对称电压跌落下 IIDG 控制目标

为保证 IIDG 在安全的前提下更好地提升其 LVRT 能力, 并充分利用逆变器的输出容量, 本文将正序电压支撑和电流限幅作为首要目标, 将有功功率输出和降低电压不平衡度作为次要目标。

2.1 正序电压支撑

传统的电压支撑主要通过注入固定的无功功率或根据标准注入一定的无功电流来实现, 无法充分抬升正序电压。同时, 电网运行导则要求系统最高工作电压不能超过 1.1 倍额定电压。因此, 本方法以最大化正序电压支撑为目标, 以相电压幅值作为约束条件, 推导最大可能的正序无功参考电流。由式(1)知, 不平衡条件下, PCC 母线三相电压幅值为

$$\begin{cases} V_a = \sqrt{[V_L \cos(\gamma)]^2 + [V_S \sin(\gamma)]^2} \\ V_b = \sqrt{[V_L \cos(\gamma + \frac{\pi}{3})]^2 + [V_S \sin(\gamma + \frac{\pi}{3})]^2} \\ V_c = \sqrt{[V_L \cos(\gamma - \frac{\pi}{3})]^2 + [V_S \sin(\gamma - \frac{\pi}{3})]^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} V_L = V^+ + V^- \\ V_S = V^+ - V^- \end{cases} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\varphi^+ + \varphi^-}{2} \quad (8)$$

为保证电压支撑过程中三相电压幅值均不超限, 建立了如式(9)的约束。

$$V_{\max} = \max(V_a, V_b, V_c) \leq V_{\text{upper}} \quad (9)$$

式中: V_{\max} 表示三相电压幅值中的最大值; V_{upper} 表示相电压幅值上限, 取 1.1 倍额定电压。联立式(6)一式(9)可得三相电压幅值最大为

$$(V_{\max})^2 = (V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^- \lambda_{\max} \quad (10)$$

式中

$$\lambda_{\max} = \max \left\{ \cos(2\gamma), \cos(2\gamma + \frac{2\pi}{3}), \cos(2\gamma - \frac{2\pi}{3}) \right\} \quad (11)$$

由式(9)可知, 只需将幅值最大相的电压 V_{\max} 抬升至 V_{upper} , 即可最大程度地支撑正序电压, 同时保证电压不超限。根据式(10), 首先令 $V_{\max} = V_{\text{upper}}$, 即可得到最大电压支撑下的正序参考电压

$$V_{\text{ref}}^+ = -V^- \lambda_{\max} + \sqrt{(V^- \lambda_{\max})^2 - (V^-)^2 + (V_{\text{upper}})^2} \quad (12)$$

然后, 将式(12)代入电压支撑方程(5), 得到初始正序无功参考电流为

$$I_{q_ini}^+ = \frac{B - \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{cases} A = (R_g)^2 + (X_g)^2 \\ B = X_g V_{\text{ref}}^+ \\ C = (V_{\text{ref}}^+ - R_g I_p^+)^2 + (X_g I_p^+)^2 - (V_g^+)^2 \end{cases} \quad (14)$$

式(13)中的下标“ini”代表初始计算值。当按初始正序无功电流 $I_{q_ini}^+$ 进行输出时, 电压支撑可以达到最大。但在电压跌落严重时, 受电流限幅影响, 最终的无功参考电流需要在 $I_{q_ini}^+$ 基础上进行调整。此外, 由于所提的电压支撑方法仅需对正序电压进行控制, 控制器的正常工作将不受 DG 容量的影响。

2.2 有功功率控制

在电压跌落期间, IIDG 通常以牺牲有功功率注入为代价(降低了稳定性), 而将无功电压支撑作为首要任务, 以提升 LVRT 能力。本文在实现电压支撑的前提下, 通过尽可能地注入有功功率, 提升了电网的稳定性。由瞬时功率理论可知^[27], 电压不平衡下, 逆变器输出有功功率的平均值可表示为

$$P = V^+ I_p^+ + V^- I_p^- \quad (15)$$

由上式可知, 通过注入正序和负序有功电流, 逆变器可以实现对有功功率的控制。为简化控制, 本文主要通过注入正序有功电流 I_p^+ 来控制有功功率的输出, 即负序有功电流 I_p^- 始终控制为零。根据式(15), 正序有功电流参考值可表示为

$$I_{p_ini}^+ = \frac{P_{ref}}{V^+} \quad (16)$$

式中: $I_{p_ini}^+$ 为注入该有功功率所需的初始正序有功参考电流; P_{ref} 为 IIDG 有功出力参考值(由于采用了简化模型, 其值可人为设定)。对于不同严重程度的电压降落, 为满足电压支撑和限流的目标, 可能需要对最终有功参考电流进行调整(比如在严重故障下, 最终有功参考电流会小于 $I_{p_ini}^+$)。

2.3 电流限幅

为保证逆变器在低压穿越运行过程的安全, 需要将其输出的三相电流幅值控制在一定范围。根据式(2), 逆变器三相电流幅值可表示为

$$I_{abc} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \quad (17)$$

$$A_1 = (I_p^+ + I_p^-) \cos \delta + (I_p^+ - I_p^-) \sin \delta \quad (18)$$

$$A_2 = -(I_q^+ - I_q^-) \cos \delta + (I_q^+ + I_q^-) \sin \delta \quad (19)$$

式中: I_{abc} 代表三相电流幅值 I_a 、 I_b 和 I_c ; δ 分别取 γ 、 $\gamma + \frac{\pi}{3}$ 和 $\gamma - \frac{\pi}{3}$ 。IIDG 的最大允许输出电流一般为额定电流的 1~2 倍, 记作 I_{lim} 。同时, 为充分利用逆变器输出容量, 三相电流中幅值最大相的电流应满足如下条件。

$$\max(I_a, I_b, I_c) = I_{lim} \quad (20)$$

式(17)~式(19)包含了 4 个电流分量, 无法直接计算出各个电流分量对应的参考值。因此, 需要对不同运行场景进行区分, 并确定不同运行场景下的参考电流注入模式, 方能推导出满足控制目标所需的参考电流, 将在下节进行详细讨论。

3 基于场景区分的 IIDG 控制算法

考虑到 IIDG 有功出力大小和电网电压跌落程度等因素, 系统在运行时会呈现出不同的运行场景。为保证 IIDG 在任何场景下均能实现限流和电压支撑, 并尽可能地注入有功功率以维持系统稳定, 需要对运行场景进行划分, 以推导出不同场景下的参考电流, 实现控制目标。

本文控制算法的流程如图 2 所示。首先, 采用二阶广义积分器(Second Order Generalized Integrator, SOGI)对实时量测的电压、电流进行正负序分离,

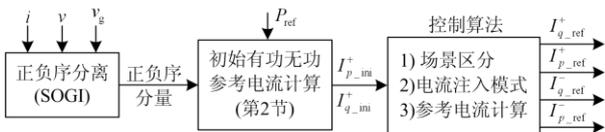


图 2 IIDG 控制算法流程

Fig. 2 Flowchart of IIDG control algorithm

并利用初始参考电流来反映电压跌落及 IIDG 有功输出情况, 实现对运行场景的区分。然后, 根据控制目标实现的优先级, 确定各个场景对应的参考电流注入模式。最后, 结合场景区分结果和参考电流注入模式计算最终的参考电流, 以实现控制目标。

3.1 运行场景区分依据

由于正序电压支撑和有功功率控制分别为本文所提策略的主、次目标, 在考虑场景区分时, 将电压跌落程度和 IIDG 有功出力情况作为区分的依据。

当正序电压跌落至 0.9 倍额定电压以下时, 控制系统即开始计算初始正序有功、无功参考电流 $I_{p_ini}^+$ 和 $I_{q_ini}^+$ 。其中, $I_{q_ini}^+$ 由电压支撑目标得到, 通过比较 $I_{q_ini}^+$ 和电流限值 I_{lim} , 可间接、直观地反映电压跌落程度, 并作为电压跌落程度的评判标准。

而初始正序有功参考电流 $I_{p_ini}^+$ 由有功控制目标得到, 可间接反映 IIDG 有功出力的大小。需要注意的是, 只有当逆变器满足电压支撑目标, 同时具备输出余量 ($I_{q_ini}^+ < I_{lim}$) 时, 才对 IIDG 有功出力大小进行评估。首先, 建立如下方程

$$I_{ini}^+ = \sqrt{(I_{q_ini}^+)^2 + (I_{p_ini}^+)^2} \quad (21)$$

式中, I_{ini}^+ 表示初始正序参考电流。通过比较 I_{ini}^+ 和电流限值 I_{lim} , 即可评估 IIDG 有功出力 P_{ref} 的大小。

3.2 运行场景区分及参考电流计算

1) 场景 1: 电压跌落严重

此场景下电压跌落较为严重, 为实现电压支撑, 所需的初始正序无功电流 $I_{q_ini}^+$ 会超过逆变器最大允许输出电流 ($I_{q_ini}^+ > I_{lim}$)。因此, 将该条件作为判定严重电压跌落的依据。此时, 为保证电压支撑效果, 电流注入模式设定为仅注入正序无功电流 I_q^+ 。

考虑到相电流幅值的约束, 注入的正序无功电流 I_q^+ 不能超过 I_{lim} 。因此, 最终参考电流应调整为

$$I_{q_ref}^+ = I_{lim} \quad (22)$$

式中, $I_{q_ref}^+$ 为最终的正序无功参考电流。此时, 其余参考电流分量 $I_{p_ref}^+$ 、 $I_{q_ref}^-$ 和 $I_{p_ref}^-$ 均为零。

2) 场景 2: 电压跌落小而 IIDG 有功出力较大

此场景下, 正序电压支撑目标可以实现, 即初始正序无功参考电流 $I_{q_ini}^+$ 尚未超过 I_{lim} , 故将该场景定义为电压跌落较小。此时, 最终的正序无功参考电流应取为 $I_{q_ini}^+$, 以最大程度支撑正序电压, 即

$$I_{q_ref}^+ = I_{q_ini}^+ \quad (23)$$

由于 IIDG 容量未完全利用, 为提高系统的稳

定性, 可继续注入有功功率。但是, 有功电流若按照初始有功参考电流 $I_{p_ini}^+$ 进行注入, 会导致电流越限, 即 $I_{ini}^+ > I_{lim}$ 。因此, 也将该场景定义为 IIDG 有功出力较大, 电流注入模式设为同时注入 I_p^+ 和 I_q^+ 。

这时, 为满足限流要求, 需要限制部分有功功率输出, 正序有功参考电流应按照限流目标重新计算。根据此场景下的电流注入模式, 令式(17)一式(19)中 I_p^- 和 I_q^- 为零, 并将式(23)代入得

$$I_{p_ref}^+ = \sqrt{(I_{lim}^+)^2 - (I_{q_ini}^+)^2} \quad (24)$$

值得注意的是, 在该参考电流下, 逆变器的输出有功功率会小于 P_{ref} 。

3) 场景 3: 电压跌落小且 IIDG 有功出力较小

该场景下, 正序电压支撑和有功功率控制均能实现, 且电流未越限, 即同时满足 $I_{q_ini}^+ < I_{lim}$ 和 $I_{ini}^+ < I_{lim}$ 。因此, 将该场景定义为电压跌落较小且 IIDG 有功出力较小, 最终的正序有功、无功电流参考值应按照初始参考电流来确定, 即

$$I_{q_ref}^+ = I_{q_ini}^+ \quad (25)$$

$$I_{p_ref}^+ = I_{p_ini}^+ \quad (26)$$

为充分利用逆变器容量, 同时降低电压不平衡度, 可注入一定的负序无功电流, 此时的电流注入模式设定为同时注入 I_p^+ 、 I_q^+ 和 I_q^- 。根据该电流注入模式, 令式(17)一式(19)中 I_p^- 为零, 并代入式(25)和式(26), 可得到初步的负序无功参考电流

$$I_{q_abc}^- = A + \sqrt{A^2 - B} \quad (27)$$

$$\begin{cases} A = I_{q_ini}^+ \cos(2\delta) - I_{p_ini}^+ \sin(2\delta) \\ B = (I_{p_ini}^+)^2 + (I_{q_ini}^+)^2 - (I_{lim}^+)^2 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $I_{q_abc}^- = \{I_{q_a}^-, I_{q_b}^-, I_{q_c}^-\}$, 表示当三相电流 I_a 、 I_b 和 I_c 分别达到 I_{lim} 时所需注入的负序无功电流,

对应的 δ 分别取为 γ 、 $\gamma + \frac{\pi}{3}$ 和 $\gamma - \frac{\pi}{3}$ 。为保证任意相电流达到 I_{lim} 时其他两相电流都不会越限, 最终的负序无功参考电流应取为

$$I_{q_ref}^- = \min(I_{q_a}^-, I_{q_b}^-, I_{q_c}^-) \quad (29)$$

4 仿真分析

为验证所提控制策略在不同运行场景下的有效性, 基于 Matlab/Simulink 建立了图 1 所示含 IIDG 的并网仿真系统。其中, 直流电压源与逆变器相连, 最后经 LC 滤波器和线路与大电网相连。逆变器最大允许输出电流 I_{lim} 设为 1.2 p.u., 相电压幅值上限

V_{upper} 设为 1.1 p.u., 具体参数如表 1 所示。

在 $t=0.5$ s 时刻, 电网侧母线发生不对称电压跌落, 持续至 $t=0.3$ s 时刻电压恢复正常。其中, IIDG 在 $t=0 \sim 1$ s 内采用传统的恒功率控制策略 (PQ 控制), 在 $t=1$ s 时刻切换为本文的低压穿越控制策略。通过改变网侧母线电压跌落程度以及 IIDG 有功出力参考值 P_{ref} , 本文设计了三个算例以验证第 3 节中分析的三种运行场景, 算例的设置如表 2 所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

参数	数值及单位	参数	数值及单位
IIDG 额定功率 S_b	15 kVA	线路电感 L_g	4 mH
额定线电压 V	400 V	直流电压 V_{dc}	1 000 V
额定电流 I_n	21.6 A	正序比例系数 k_p^+	50
滤波电感 L_r	20 mH	正序积分系数 k_i^+	1
滤波电容 L_c	20 μ F	负序比例系数 k_p^-	50
线路电阻 R_g	0 Ω	负序积分系数 k_i^-	1

表 2 仿真算例设置

Table 2 Simulation scenario setting

算例	$V_g^+ / \text{p.u.}$	$V_g^- / \text{p.u.}$	$\varphi^+ + \varphi^-$	$P_{ref} / \text{p.u.}$
1	0.50	0.20	180°	1.0
2	0.70	0.30	120°	1.0
3	0.83	0.20	120°	0.4

4.1 运行场景区分结果

电压发生跌落后, 控制系统通过计算和比较初始有功、无功参考电流 $I_{p_ini}^+$ 和 $I_{q_ini}^+$, 对电压跌落程度和 IIDG 有功出力进行评估, 从而实现场景区分, 具体的区分结果如表 3 所示。

表 3 场景区分结果

Table 3 Results of scenario classification

算例	$I_{q_ini}^+ / \text{p.u.}$	电压跌落程度	$I_{p_ini}^+ / \text{p.u.}$	$I_{ini}^+ / \text{p.u.}$	有功出力大小	场景区分结果
1	4	严重	1.5	4.27	—	1
2	0.88	较小	1.2	1.49	较大	2
3	0.95	较小	0.42	1.04	较小	3

从表 3 可以看出: 在算例 1 中, 由电压支撑目标得到的初始正序无功电流较大 ($I_{q_ini}^+ > 1.2 \text{ p.u.}$), 会导致电流越限, 故此场景区分为严重电压跌落。在算例 2 中, 由于初始正序无功电流较小 ($I_{q_ini}^+ < 1.2 \text{ p.u.}$), 未导致电流越限, 所以该场景区分为电压跌落较小。但是, 由于初始正序有功电流 $I_{p_ini}^+$ 较大, 按该值进行注入时会导致正序电流越限

($I_{ini}^+ > 1.2$ p.u.), 故此场景下 IIDG 有功出力也较大。在算例 3 中, 由于 $I_{q_ini}^+$ 和 I_{ini}^+ 均未超过 1.2 p.u., 故此场景区分为电压跌落较小且 IIDG 有功出力较小。

4.2 算例 1: 严重电压跌落

在 $t = 0.5$ s 时, 网侧母线发生严重不对称电压跌落($V_g^+ = 0.5$ p.u., $V_g^- = 0.2$ p.u.), 有功功率参考值 P_{ref} 设定为逆变器额定功率 1 p.u.。

由图 3(a)和 3(b)可知, 采用 PQ 控制策略的 IIDG 在电压跌落时不具备电压支撑能力, V^+ 仅为 0.48 p.u.。而本文的控制方法能将 PCC 母线正序电压 V^+ 提升 0.18 p.u., 达到了 0.66 p.u., 能够显著提升 IIDG 的低压穿越能力。如图 3(a)所示, 由于电压跌落较严

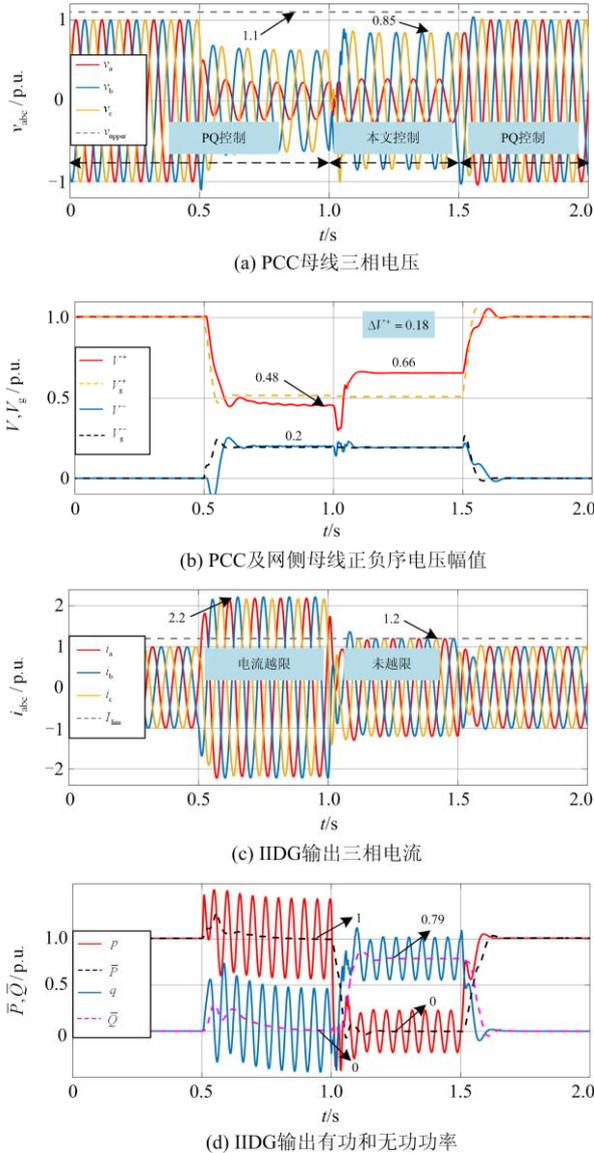


图 3 场景 1 下 IIDG 输出特性

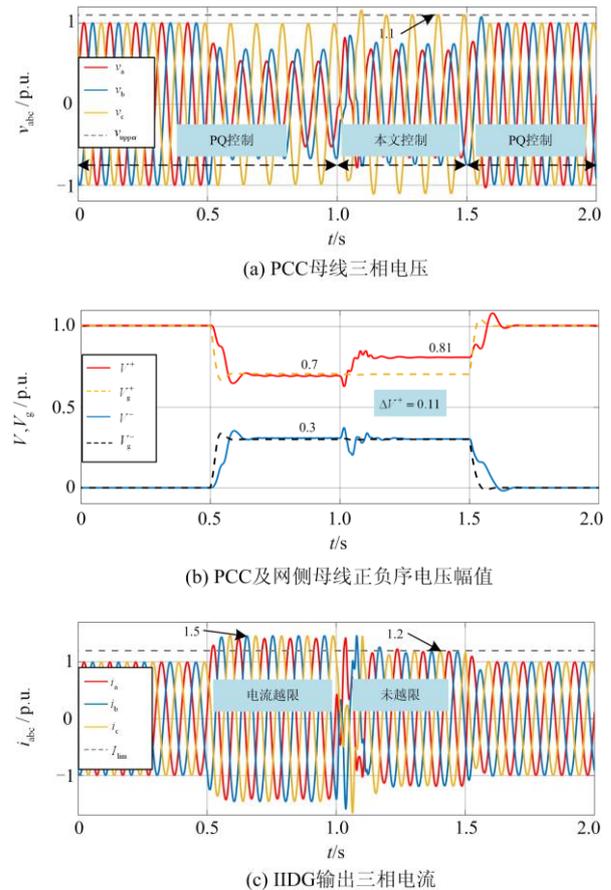
Fig. 3 IIDG output performance under scenario 1

重, 同时受逆变器电流限幅的作用, PCC 母线相电压的最大值无法达到控制目标所要求的 1.1 倍额定电压(符合理论分析结果)。由图 3(c)和 3(d)可以看出, PQ 控制策略为维持恒定的有功功率输出, 会导致输出电流严重越限。而利用本文的控制算法, 可以很好地实现电流限幅, 同时无功电流输出的高优先级也保证了较好的电压支撑能力。然而, 此场景下 IIDG 输出有功功率平均值为零, 即 \bar{P} 为零。

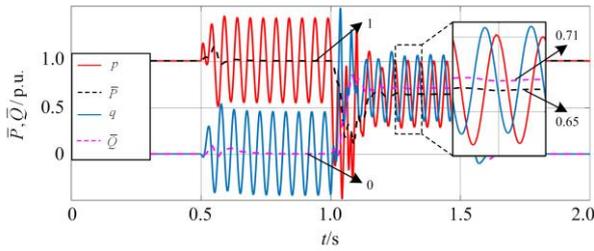
4.3 算例 2: 电压跌落较小而有功功率较大

在 $t = 0.5$ s 时, 网侧母线发生较小的不对称电压跌落($V_g^+ = 0.7$ p.u., $V_g^- = 0.3$ p.u.), 有功功率参考值 P_{ref} 设定为逆变器额定功率 1 p.u.。

由图 4(a)和 4(b)知, 此场景下本文的控制方法能够在相电压不越限的前提下, 将 PCC 母线正序电压 V^+ 提高 0.11 p.u., 达到了 0.81 p.u.。如图 4(c)所示, 由于有功功率参考值 P_{ref} 较大, 传统 PQ 控制会导致电流越限, 而本文方法通过限制部分有功功率的输出, 实现了电流限幅的目标。从图 4(d)可以看出, 在 $t = 1 \sim 1.5$ s 期间, 逆变器在输出无功功率的同时, 输出了较多的有功功率 $\bar{P} = 0.65$ p.u., 有助于维持系统稳定性。



(c) IIDG 输出三相电流



(d) IIDG输出有功和无功功率

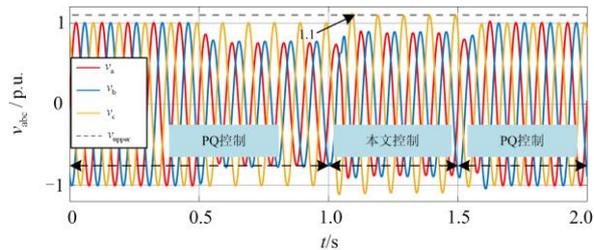
图4 场景2下IIDG输出特性

Fig. 4 IIDG output performance under scenario 2

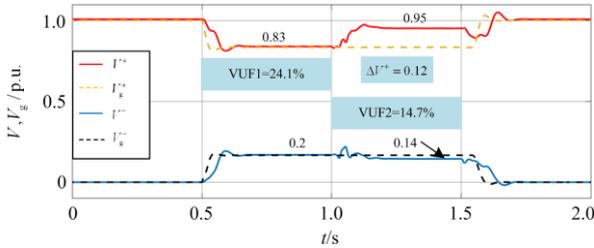
4.4 算例3: 电压跌落较小且有功功率较小

在 $t=0.5\text{ s}$ 时, 网侧母线发生较小的不对称电压跌落 ($V_g^+ = 0.83\text{ p.u.}$, $V_g^- = 0.2\text{ p.u.}$), 有功功率参考值 P_{ref} 设定为 0.4 p.u. 。

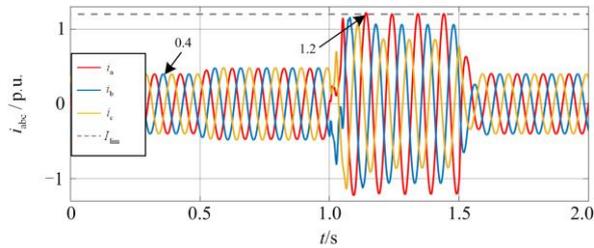
如图 5(a)和 5(b)所示, 正序电压实现了最大化支撑, 即 PCC 母线正序电压 V^+ 在相电压约束下提高了 0.12 p.u. , 达到了 0.95 p.u. 。由于此场景下电压跌落和有功功率均较小, 逆变器的容量还未充分利用(即输出电流未达到限流上限)。从图 5(b)和图 5(c)可以看出, 通过注入负序无功电流, 逆变器输出电流到了最大值, 同时 IIDG 出口母线负序电压 V^- 由 0.2 p.u. 减小为 0.14 p.u. , 电压不平衡度 VUF 由 24.1%



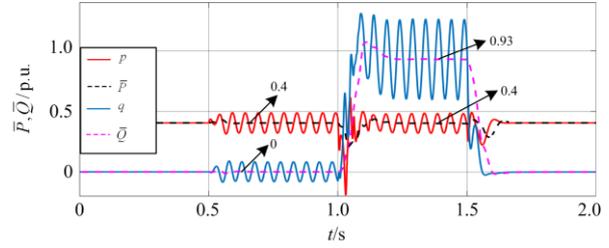
(a) PCC母线三相电压



(b) PCC及网侧母线正负序电压幅值



(c) IIDG输出三相电流



(d) IIDG输出有功和无功功率

图5 场景3下IIDG输出特性

Fig. 5 IIDG output performance under scenario 3

降至了 14.7% 。此外, 从图 5(d)可以看出, IIDG 能够按照初始有功功率进行输出(即 $\bar{P} = 0.4\text{ p.u.}$)。

4.5 低压穿越能力提升效果

在电压发生跌落时, 抬升 IIDG 并网点电压能够显著提升其低压穿越能力(反映为延长其并网运行的时间), 图 6 描述了不同国家 LVRT 标准的 $V-t$ 曲线^[8,28]。为了更直观地体现本文电压支撑方法对提升 IIDG 穿越能力的效果, 表 4 结合算例中的电压支撑数据和图 6 的 LVRT 曲线, 给出了在不同正序电压抬升情况下, IIDG 延长的并网运行时间。

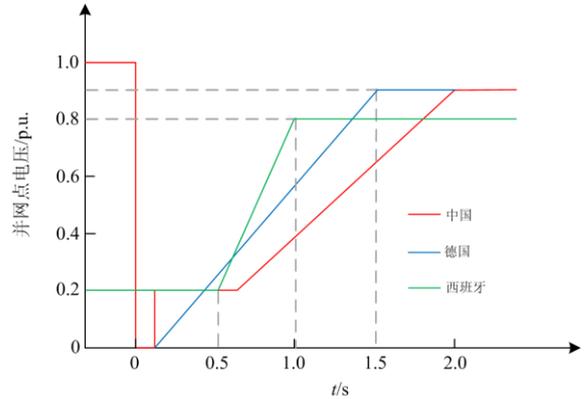


图6 不同国家的LVRT曲线图

Fig. 6 LVRT requirements curves in different countries

表4 不同LVRT标准下电压抬升延长IIDG并网的时间

Table 4 Extended connection time of IIDG by voltage support under different LVRT grid codes

国家	电压支撑延长的并网运行时间 t/ms		
	场景1 ($\Delta V^+ = 0.18\text{ p.u.}$)	场景2 ($\Delta V^+ = 0.11\text{ p.u.}$)	场景3 ($\Delta V^+ = 0.12\text{ p.u.}$)
中国	353	216	235
德国	270	165	180
西班牙	150	92	100

由表 4 可以看出, 采用本文所提出的正序电压支撑策略, 能够较大幅度地抬升 PCC 母线正序电压, 同时显著延长了 IIDG 在电压跌落时的并网运行时间。以中国的 LVRT 标准为例, 本文策略在

景 1 下能够延长并网时间约 353 ms; 对于西班牙的 LVRT 标准, 并网时间至少延长了约 92 ms, 对电网的稳定运行具有重要意义。

5 结论

针对 IIDG 在电网电压发生不对称跌落期间存在电流越限、电压支撑能力较弱等问题, 本文提出了一种基于场景区分的新型低电压穿越控制策略, 达到了以下效果:

1) 所提的电压支撑方法以正序分量为目标, 以相电压幅值作为约束条件, 实现了不同运行条件下正序电压的最大化支撑, 保证了相电压幅值不越限。

2) 利用所提的场景区分方法, 确定了不同运行场景下逆变器的参考电流注入模式, 通过调整参考电流, 有效解决了电压支撑过程中电流越限的问题。

3) 本文的控制策略还兼具有功功率输出和负序无功功率输出能力, 在充分利用逆变器的容量的同时, 能够提升系统稳定性, 并降低电压不平衡度。

参考文献

- [1] JIA J D, YANG G Y, NIELSEN A H. A review on grid-connected converter control for short-circuit power provision under grid unbalanced faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 649-661.
- [2] WANG Mengjiao, WANG Guizhou, SUN Zhenxin, et al. Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 437-444.
- [3] 孙亮, 张秀琦, 吕凌虹, 等. 含分布式电源的配电网电压控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(10): 1-5.
SUN Liang, ZHANG Xiuqi, LÜ Linghong, et al. Study on voltage control strategy for the distribution network with distributed generation[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(10): 1-5.
- [4] MERRITT N R, CHAKRABORTY C, BAJPAI P. New voltage control strategies for VSC-based DG units in an unbalanced microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1127-1139.
- [5] YI Z, DONG W, ETEMADI A H. A unified control and power management scheme for PV-battery-based hybrid microgrids for both grid-connected and islanded modes[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5975-5985.
- [6] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A I. Asymmetrical ride-through and grid support in converter-interfaced DG units under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1130-1141.
- [7] ONGSAKUI W, TENG K, MARICHEZ S, et al. An innovation idea for energy transition towards sustainable and resilient societies: global energy interconnection[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 312-318.
- [8] 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.
- [9] 陈波, 朱晓东, 朱凌志, 等. 光伏电站低电压穿越技术要求与实现[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 77-81.
CHEN Bo, ZHU Xiaodong, ZHU Lingzhi, et al. Requirements and realization of the low voltage ride through technologies in PV power stations[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 77-81.
- [10] 郭小强, 刘文钊, 王宝诚, 等. 光伏并网逆变器不平衡故障穿越限流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 177-187.
GUO Xiaoqiang, LIU Wenzhao, WANG Baocheng, et al. Fault ride through control of PV grid-connected inverter with current-limited capability under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 177-187.
- [11] GUO Xiaoqiang, LIU Wenzhao, LU Zhigang. Flexible power regulation and current-limited control of the grid-connected inverter under unbalanced grid voltage faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7425-7432.
- [12] 王书征, 李先允, 许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 84-91.
WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 84-91.
- [13] 陈亚爱, 刘劲东, 周京华. 太阳能并网逆变器故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3405-3412.
CHEN Ya'ai, LIU Jingdong, ZHOU Jinghua. Fault ride-through control strategy for solar grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3405-3412.

- [14] WANG F, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1511-1521.
- [15] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A I. An analytical method to obtain maximum allowable grid support by using grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1558-1571.
- [16] 苗常海, 杨东升, 寇健. 基于负序电压前馈的非对称故障下低电压穿越控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 1149-1155.
- MIAO Changhai, YANG Dongsheng, KOU Jian. Research of low voltage ride through control strategy based on negative sequence voltage feedforward under unsymmetrical fault[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(4): 1149-1155.
- [17] LEE C T, HSU C W, CHENG P T. A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1821-1832.
- [18] 陈琪蕾, 范忻蓉, 张沛超, 等. 逆变型分布式电源的灵活正负序电流控制方法与等值序网模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 57-62.
- CHEN Qilei, FAN Xinrong, ZHANG Peichao, et al. Flexible positive and negative sequence current control strategy and equivalent sequence network model of inverter interfaced distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 57-62.
- [19] 杨超颖, 王金浩, 杨赟磊, 等. 不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 103-111.
- YANG Chaoying, WANG Jinhao, YANG Yunlei, et al. Control strategy to suppress peak current for grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 103-111.
- [20] 刘素梅, 毕天姝, 王晓阳, 等. 具有不对称故障穿越能力逆变型新能源电源故障电流特性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 66-73.
- LIU Sumei, BI Tianshu, WANG Xiaoyang, et al. Fault current characteristics of inverter interfaced renewable energy generators with asymmetrical fault ride-through capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 66-73.
- [21] 欧阳森, 马文杰. 考虑电压故障类型的光伏逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 21-26.
- OUYANG Sen, MA Wenjie. Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter considering voltage fault type[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 21-26.
- [22] 郭文明, 牟龙华. 考虑灵活控制策略及电流限幅的逆变型分布式电源故障模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6359-6367.
- GUO Wenming, MU Longhua. Fault model of inverter-based distributed generator considering flexible control strategy and current limitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6359-6367.
- [23] GUO Wenming, MU Longhua, ZHANG Xing. Fault models of inverter-interfaced distributed generators within a low-voltage microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 453-461.
- [24] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A I. Asymmetrical ride-through and grid support in converter-interfaced DG units under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1130-1141.
- [25] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6224-6234.
- [26] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A I. Advanced voltage support and active power flow control in grid-connected converters under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1855-1864.
- [27] TAFTI H D, MASWOOD A I, KONSTANTINOU G, et al. Active/reactive power control of photovoltaic grid-tied inverters with peak current limitation and zero active power oscillation during unbalanced voltage sags[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(6): 1066-1073.
- [28] DUONG M Q, LEVA S, MUSSETTA M, et al. A comparative study on controllers for improving transient stability of DFIG wind turbines during large disturbances[J]. Energies, 2018, 11(3): 480-490.

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-01-16

作者简介:

施佳斌(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为逆变型分布式电源故障控制; E-mail: 736892015@qq.com

季亮(1985—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 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 姜新丽)