

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.011

考虑多控制目标的 IIDG 低压穿越控制方法

何晋, 李智轩, 左金花, 李维希, 孙琮岳, 李光耀

(云南民族大学电气信息工程学院, 云南 昆明 650031)

摘要: 现有逆变型分布式电源(IIDG)低压穿越控制有电压支撑效果不理想, 控制目标单一, 输出电流存在越限风险等不足, 针对此问题, 文中提出一种考虑多控制目标的低压穿越控制方法。首先以预设相电压为约束条件, 构建得出电压支撑方程, 据此实现电压支撑控制; 其次, 通过约束 IIDG 向电网注入负序无功电流的大小, 实现有功输出振荡抑制控制。同时为充分利用 IIDG 的剩余容量, 文中通过最大有功功率输出和电流限幅控制计算出 IIDG 正序有功电流参考值, 保证在 IIDG 输出电流不发生越限的前提下, 实现 IIDG 最大有功功率输出。仿真算例表明, 与现有正序无功电流注入控制方法相比, 文中多控制目标低压穿越控制方法具有更加良好的故障控制效果。

关键词: 不对称故障; 逆变型分布式电源(IIDG); 电压支撑; 最大有功功率输出控制; 有功输出振荡抑制控制; 电流限幅

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)03-0092-10

0 引言

随着新能源发电在电网中所占比重的不断增加, 采用逆变器接口与电网相连的光伏、风电等逆变型分布式电源(inverter-interfaced distributed generators, IIDG)以其控制的高效性和灵活性等受到广泛的关注和应用^[1-4]。在电网发生不对称故障时, 若不对并网运行的 IIDG 采取合理的控制, 将可能导致 IIDG 的大规模解列, 严重影响电网运行安全。因此并网规程要求, IIDG 应能在电网发生不对称故障时支撑电网电压, 实现低压穿越运行^[5-6]。

国内外学者对此进行了大量研究, 文献[7-10]基于光伏、风电并网规程, 提出正序分量控制方法, 在 IIDG 公共连接点(point of common coupling, PCC)电压跌落时, 注入一定比例正序无功电流, 但这一方法在三相电压不平衡度较高时的电压支撑效果较弱。文献[11]中提出正负序无功电流注入的电压支撑控制方法, 但须对故障情况和 IIDG 出力情况进行运行场景划分, 控制较为繁琐。文献[12]提出采用序列二次规划对所需正负序无功电流进行求解, 但未考虑有功功率的控制。文献[13]提出正负序无功功率注入的电压支撑方法, 同样未考虑有功功率输出控制。文献[14-15]提出了在 $\alpha\beta$ 坐标系下, 含系数分配的正负序分量控制方法, 可有效提升 PCC 正序电压, 降低三相电压不平衡度, 同时考虑了故障时 IIDG 的有功功率输出, 但未能给出有效的有功和无功功率参考值计算方法。文献

[16]在实现有功和无功功率的灵活调节时, 有效解决了变流器过流问题。文献[17]提出一种 IIDG 有功功率控制方法, 但故障时, IIDG 应优先向电网注入无功功率。文献[18-19]分析了不对称故障下对 IIDG 有功和无功功率振荡抑制的控制, 实现有功和无功振荡抑制的灵活控制, 但未考虑 IIDG 的电压支撑控制。文献[20-21]提出一种动态调整正负序电压参考值的正负序无功电流注入方法, 虽然电压支撑效果较好, 但未考虑有功输出振荡抑制控制。

分析上述文献可知, 目前针对 IIDG 的低压穿越控制或是单独考虑电压支撑和电流限幅控制, 或是只考虑有功和无功功率振荡抑制控制, 控制策略均存在一定缺陷。因此文中提出一种考虑多控制目标的 IIDG 低压穿越控制方法, 实现了电网发生不对称故障时 IIDG 的电压支撑控制、有功输出振荡抑制控制, 最大有功功率输出和电流限幅控制这 3 个控制目标, 有效提升了 IIDG 的运行稳定性。最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型, 验证了该控制策略的可行性。

1 不对称故障下 IIDG 输出特性

图 1 为 IIDG 并网结构拓扑, 由 DG 发电单元、直流升压电路、逆变电路、LC 滤波器构成。PWM 为脉宽调制; V_{dc} 为直流母线电压; R_f, L_f, C_f 分别为 LC 滤波器的等效电阻、电感和电容; R_g, L_g 分别为电网线路等效电阻和电感; i_{abc}, V_{abc} 分别为 PCC 电流和电压相量; m_{abc} 为 PWM 调制波信号; v_g 为电网侧电压相量; P_{DG} 为 IIDG 发电单元输出功率。

当电网侧出现短路故障或是突然接入不对称

收稿日期: 2021-12-21; 修回日期: 2022-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52061042)

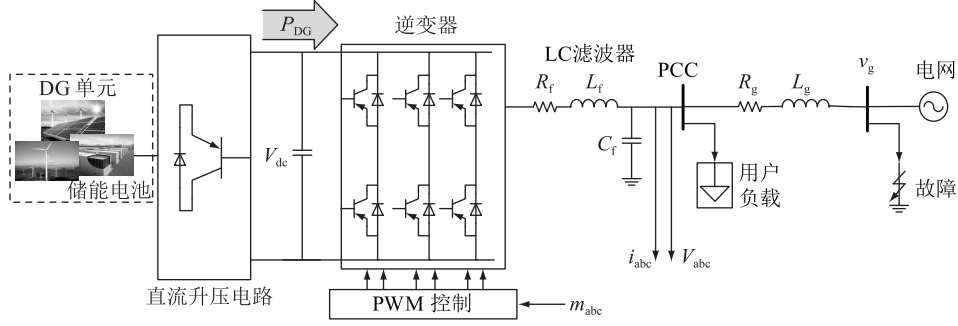


图1 IIDG 并网拓扑

Fig.1 IIDG grid-connected topology

大容量负载时将会导致IIDG的并网电压出现不对称跌落。对于电网中任意不对称故障,PCC处电压相量在 $\alpha\beta$ 坐标下由正负序分量可表示为式(1)。考虑到IIDG多并入三相三线制配电网运行,故下文分析中忽略零序分量^[5]。

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}^+ + \mathbf{v}^- = \begin{bmatrix} v_\alpha^+ + v_\alpha^- \\ v_\beta^+ + v_\beta^- \end{bmatrix} =$$

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

式中: $\mathbf{v}^+, \mathbf{v}^-$ 分别为电压的正负序分量; v_α^+, v_β^+ 为 $\alpha\beta$ 坐标下的正序电压相量; v_α^-, v_β^- 为 $\alpha\beta$ 坐标下的负序电压相量; V^+, V^- 分别为PCC正负序电压幅值; φ^+, φ^- 分别为正负序电压相量初相角; ω 为角频率。文中采用双二阶广义积分器来实现电压和电流信号正负序分量的提取^[22-24]。同理式(1),可将IIDG输出电流相量由正负序有功和无功电流分量表示为^[25]:

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}^+ + \mathbf{i}^- = \begin{bmatrix} i_\alpha^+ + i_\alpha^- \\ i_\beta^+ + i_\beta^- \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} I_P^+ \cos(\omega t + \varphi^+) + I_P^- \cos(\omega t + \varphi^-) \\ I_P^+ \sin(\omega t + \varphi^+) + I_P^- \sin(\omega t + \varphi^-) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I_Q^+ \sin(\omega t + \varphi^+) - I_Q^- \sin(\omega t + \varphi^-) \\ I_Q^+ \cos(\omega t + \varphi^+) + I_Q^- \cos(\omega t + \varphi^-) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{i}^+, \mathbf{i}^-$ 分别为电流的正负序分量; i_α^+, i_β^+ 为 $\alpha\beta$ 坐标下的正序电流相量; i_α^-, i_β^- 为 $\alpha\beta$ 坐标下的负序电流相量; I_P^+, I_P^- 分别为有功电流的正序和负序分量幅值; I_Q^+, I_Q^- 分别为无功电流的正序和负序分量幅值。

进一步将式(1)中的正负序电压分量进行Park变换,可得到正负序电压 dq 分量为:

$$\begin{cases} V_d^+ = V^+ \\ V_q^+ = 0 \\ V_d^- = V^- \\ V_q^- = 0 \end{cases} \quad (3)$$

同理,对式(2)中正负序电流分量进行Park变换,可得到正负序电流 dq 分量为:

$$\begin{cases} I_d^+ = I_P^+ \\ I_q^+ = I_Q^+ \\ I_d^- = I_P^- \\ I_q^- = I_Q^- \end{cases} \quad (4)$$

由图1所示网络结构可列出PCC电压与电网侧电压 v_g 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的关系为:

$$\begin{cases} v_\alpha = v_{g\alpha} + L_g \frac{di_\alpha}{dt} + R_g i_\alpha \\ v_\beta = v_{g\beta} + L_g \frac{di_\beta}{dt} + R_g i_\beta \end{cases} \quad (5)$$

将式(1),式(2)和式(4)代入式(5),可得到电压支撑幅值为:

$$\begin{cases} V^+ - V_g^+ = I_d^+ R_g + I_q^+ \omega L_g \\ V^- - V_g^- = I_d^- R_g - I_q^- \omega L_g \end{cases} \quad (6)$$

式中: V_g^+, V_g^- 分别为电网侧正负序电压幅值。由式(4)和式(6)可知,当电网发生不对称故障造成PCC电压跌落时,通过控制IIDG向电网注入适当比例的正负序有功和无功电流,即可将PCC电压抬升控制在限定范围内。但同时也可以看出,若电网呈现为感性甚至是纯感性,有功电流分量对电压支撑产生的效果将十分微弱,因此在感性网络情况下,电压支撑的实现应以注入无功电流分量为主,可忽略有功电流分量的影响^[26-27]。若考虑电网线路为阻感性,有功电流分量对电压支撑的影响则不能被忽略。故此可得IIDG的电流内环控制框图,即图2。

图中, u_{da}^+, u_{qa}^+ 为正序电流内环控制输出; u_{da}^-, u_{qa}^- 为负序电流内环控制输出; $I_{d,ref}^+, I_{d,ref}^-$ 分别为正序和负序电流内环 d 轴电流参考值; $I_{q,ref}^+, I_{q,ref}^-$ 分别为正序和负序电流内环 q 轴电流参考值。

2 IIDG 电压支撑控制

在IIDG容量充足和电网线路阻抗并不是特别

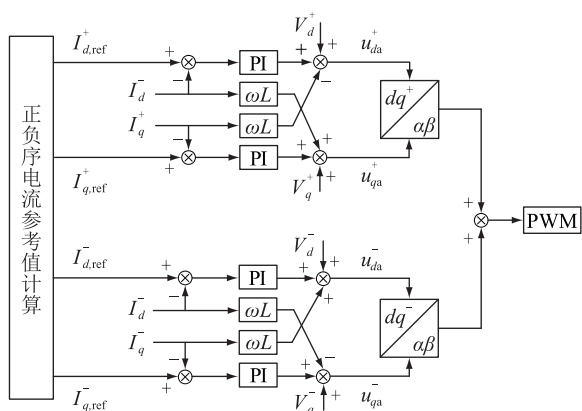


图2 电流内环控制框图

Fig.2 The block diagram of the current inner loop control

小的情况下,通过对 IIDG 输出电流进行合理的控制,PCC 三相电压幅值可较为准确地控制在限定电压范围内,确保不出现过电压或电压低于限值的情况。同时做出 2 点假设:(1) 电网线路阻抗 Z_g 已知;(2) 电网侧电压 v_g 已知。实际上 Z_g 和 v_g 可利用电网阻抗检测技术获得^[25],但计算 Z_g 和 v_g 不是讨论重点,故假设这 2 个值为已知条件。根据并网规程规定,设定相电压上、下限值 $V_{set,max}$, $V_{set,min}$ 分别为 1.1 p.u. 和 0.9 p.u.。因此电压支撑控制应满足以下约束条件:

$$\begin{cases} V_{max} = \max\{V_a, V_b, V_c\} \leq V_{set,max} \\ V_{min} = \min\{V_a, V_b, V_c\} \geq V_{set,min} \end{cases} \quad (7)$$

在电压不对称跌落情况下,PCC 三相电压幅值可表示为:

$$\begin{cases} V_a = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+ V^- \cos \varphi} \\ V_b = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+ V^- \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3})} \\ V_c = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+ V^- \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3})} \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_a, V_b, V_c 分别为 PCC 三相电压幅值;相角 $\varphi = \varphi^+ - \varphi^-$, 为正负序电压相量初相角差,其值可由下式求出:

$$\cos \varphi = \frac{v_{\alpha}^+ v_{\alpha}^- - v_{\beta}^+ v_{\beta}^-}{V^+ V^-} \quad (9)$$

由式(8)可定义不对称电压跌落时 PCC 三相电压幅值最大和最小值为:

$$\begin{cases} V_{max} = \max\{V_a, V_b, V_c\} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+ V^- \lambda_{max}} \\ V_{min} = \min\{V_a, V_b, V_c\} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+ V^- \lambda_{min}} \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} x = \lambda_{max} = \max\left\{\cos \varphi, \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)\right\} \\ y = \lambda_{min} = \min\left\{\cos \varphi, \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)\right\} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(7)的相电压约束条件,可定义正负序电压参考限值 $V_{ref,max}$ 和 $V_{ref,min}$ 为:

$$\begin{cases} V_{ref,max} = \min\{V_{set,max}, V_{set,min} + (V_{max} - V_{min})\} \\ V_{ref,min} = V_{set,min} \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)中 $V_{ref,max}$ 和 $V_{ref,min}$ 反代入式(10),替换式(10)中的 V_{max} 和 V_{min} 即可求解得出正负序电压参考值为:

$$\begin{cases} V_{ref}^+ = \sqrt{\frac{A + \sqrt{B - C^2}}{2(x - y)}} \\ V_{ref}^- = \sqrt{\frac{A - \sqrt{B - C^2}}{2(x - y)}} \end{cases} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} A = xV_{ref,min}^2 - V_{ref,max}^2 \\ B = (yV_{ref,max}^2 - xV_{ref,min}^2)^2 \\ C = V_{ref,max}^2 - V_{ref,min}^2 \end{cases} \quad (14)$$

将式(13)所求的正负序电压参考值代入电压支撑方程式(6)中,即可求出实现电压支撑目标所需的正负序电流参考值,其计算如下:

$$\begin{cases} I_{d,ref}^+ = \frac{V_{ref}^+ - V_g^+}{X_g^2 + R_g^2} R_g \\ I_{q,ref}^+ = \frac{V_{ref}^+ - V_g^+}{X_g^2 + R_g^2} \omega L_g \\ I_{d,ref}^- = \frac{V_g^- - V_{ref}^-}{X_g^2 + R_g^2} R_g \\ I_{q,ref}^- = -\frac{V_g^- - V_{ref}^-}{X_g^2 + R_g^2} \omega L_g \end{cases} \quad (15)$$

由上式同样可以得到上文分析中的结论,即在 $X_g \gg R_g$ 时,有功电流分量几乎不起电压支撑作用,电压支撑完全由无功电流分量实现。但当线路电阻不能被忽略时,有功电流分量也将起到电压支撑作用,电压支撑控制框图如图 3 所示。

在感性网络条件下,为实现有功输出振荡抑制控制和最大有功功率输出和电流限幅控制,需要对负序无功电流分量和正序有功电流分量进行额外

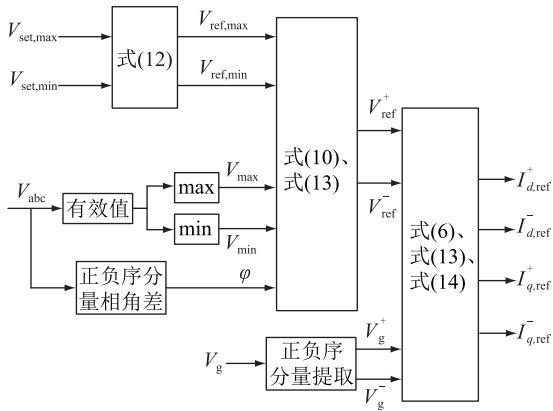


图3 电压支撑控制框图

Fig.3 The block diagram of voltage support control 的控制。

3 有功输出振荡抑制控制

在电网发生不对称故障期间, IIDG 将向电网注入负序电流。这将导致 IIDG 的瞬时有功功率输出出现二倍频波动, 同时有功输出中的倍频分量将使得 IIDG 直流侧母线电压出现波动, 影响系统运行安全。直流母线电压振荡峰值和有功输出振荡峰值之间的关系如下^[19]:

$$\tilde{V}_{dc, peak} = \frac{\tilde{P}_{peak}}{\omega C_{dc} V_{dc}} \quad (16)$$

式中: $\tilde{V}_{dc, peak}$ 为直流母线电压振荡峰值; \tilde{P}_{peak} 为有功输出振荡峰值; C_{dc} 为直流侧电容值。由上式可知通过对有功输出振荡进行抑制, 便可同时实现对直流侧母线电压波动的控制。

不对称故障时, IIDG 的瞬时有功功率为:

$$p = P + \tilde{p} = (\mathbf{v}^+ + \mathbf{v}^-) \cdot (\mathbf{i}^+ + \mathbf{i}^-) \quad (17)$$

其中:

$$\begin{cases} P = \mathbf{v}^+ \cdot \mathbf{i}^+ + \mathbf{v}^- \cdot \mathbf{i}^- \\ \tilde{p} = \mathbf{v}^+ \cdot \mathbf{i}^- + \mathbf{v}^- \cdot \mathbf{i}^+ \end{cases} \quad (18)$$

式中: P 为平均功率; \tilde{p} 为有功振荡项。将式(1)、式(2)代入式(18)可得到有功振荡幅值为:

$$\tilde{P} = \sqrt{(V^+ I_d^- + V^- I_d^+)^2 + (V^- I_q^- - V^+ I_q^+)^2} \quad (19)$$

目前在 IIDG 的并网运行规程中并未对有功输出振荡抑制给出具体要求, 但对于直流母线电压振荡, 要求直流母线电压振荡幅值 $\tilde{V}_{dc, max}$ 应控制在 0.2 倍 V_{dc} 以内^[6], 在得到直流母线电压限值后, 由式(16)即可求出有功振荡限值 \tilde{P}_{lim} , 将 \tilde{P}_{lim} 代入式(19)中替换 \tilde{P} , 即可求出满足有功振荡抑制要求的

负序无功参考电流, 其计算如下:

$$I_{q, sup}^- = \frac{\sqrt{\tilde{P}_{lim}^2 - (V^+ I_d^- + V^- I_d^+)^2} - V^- I_q^+}{V^+} \quad (20)$$

分析上式可知, 若在上文电压支撑中计算得出的负序无功电流 $I_{q, ref}^-$ 大于 $I_{q, sup}^-$, 同时考虑以有功输出振荡抑制控制为第一控制目标, 那么有功输出振荡抑制控制将会对电压支撑产生负面影响, 因此对于电压支撑和有功输出振荡抑制 2 个控制目标应根据实际运行情况进行考虑。

4 最大有功功率输出和电流限幅控制

为实现对 IIDG 容量的充分利用, IIDG 完成电压支撑后自身剩余容量应以有功功率形式注入电网。因此所提最大有功功率输出和电流限幅控制须确保实现以下 2 点: (1) IIDG 的最大有功功率输出; (2) 确保 IIDG 输出电流不超过限值 $I_{set, max}$, 通常 $I_{set, max}$ 为 1~2 倍额定电流。同时设定负序有功电流 $I_{p, ref}^-$ 为 0, 有功功率输出皆通过正序有功电流输出注入电网。IIDG 输出三相电流幅值由式(2)经由反 Clark 变换可写为:

$$\begin{bmatrix} I_a^2 \\ I_b^2 \\ I_c^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ac}^2 + I_{as}^2 \\ \left(-\frac{1}{2}I_{ac} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{bc}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}I_{as} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{bs}\right)^2 \\ \left(-\frac{1}{2}I_{ac} - \frac{\sqrt{3}}{2}I_{bc}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}I_{as} - \frac{\sqrt{3}}{2}I_{bs}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中:

$$\begin{cases} I_{ac} = I_p^+ + I_q^- \sin \varphi \\ I_{as} = I_p^+ - I_q^- \cos \varphi \\ I_{bc} = -I_p^+ - I_q^- \cos \varphi \\ I_{bs} = I_p^+ - I_q^- \sin \varphi \end{cases} \quad (22)$$

将 $I_{set, max}$ 代入式(21)替代 I_a, I_b, I_c , 可分别求出 abc 三相对应的正序有功电流参考幅值 $I_{p, aref}^+$, $I_{p, bref}^+$, $I_{p, cref}^+$, 那么可定义正序无功参考电流为:

$$I_{d, ref}^+ = \min\{I_{p, aref}^+, I_{p, bref}^+, I_{p, cref}^+\} \quad (23)$$

由此即获得了实现最大有功功率输出的正序有功电流参考值, 同时可将 IIDG 输出的三相电流幅值控制在 $I_{set, max}$ 内。感性网络条件下的多目标低压穿越控制框图如图 4 所示。

5 仿真算例验证

为了验证上文所述控制策略的可行性, 同时对比传统低压穿越控制, 根据图 1 所示 IIDG 并网结构

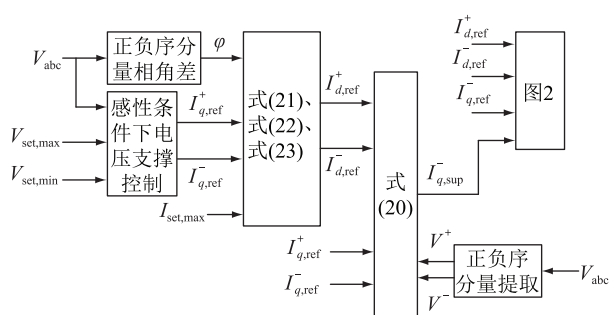


图4 感性条件下多目标低压穿越控制框图

Fig.4 The block diagram of multi-target low voltage ride-through control under perceptual conditions

图,搭建仿真测试平台。为了还原不对称故障时IIDG所采用不同控制策略对直流母线电压的影响,IIDG发电单元采用光伏发电模型^[25]。考虑到不对称故障持续时间较短,故设定为恒定光照和温度条件,而最大功率点追踪控制(maximum power point tracker,MPPT)采用恒定电压观察法来实现。仿真测试一共设置3个测试案例,主要为验证以下3点:(1)文中控制方法与传统正序无功电流注入控制方法在感性网络条件下的电压支撑控制效果对比;(2)在感性网络下,电压支撑控制和有功输出振荡抑制控制之间的关系;(3)文中所提低压穿越控制在阻感性网络条件下的电压支撑效果。系统参数和测试参数如表1所示。

表1 系统参数和测试参数

Table 1 The system parameters and test parameters

参数	数值	参数	数值
IIDG 额定功率/(kV·A)	150	系统频率 f_n /Hz	50
直流母线电压/kV	1	开关频率 f_s /Hz	5 000
额定线电压/V	400	$I_{set,max}$ /p.u.	1.1
滤波电容/ μ F	10	$V_{set,max}$ /p.u.	1.1
滤波电感/mH	4.1	$V_{set,min}$ /p.u.	0.9

5.1 算例1:电压支撑控制对比传统正序无功电流注入控制

本算例目的是对比文中控制方法与传统正序无功电流注入法面对不对称故障时的电压支撑效果,线路阻抗设置为 $Z_g = j0.3 \Omega$ 。设置在仿真0.5 s时电网发生不对称故障,故障共持续1 s,在1.5 s时切除故障,故障期间共发生5种不同情况的电压跌落,网侧电压跌落情形如图5所示。

仿真结果如图6—图10所示,其中0.5~1.0 s为电压支撑控制结合有功功率振荡抑制控制作用结果,在1.0 s投入最大有功功率输出和电流限幅控制。

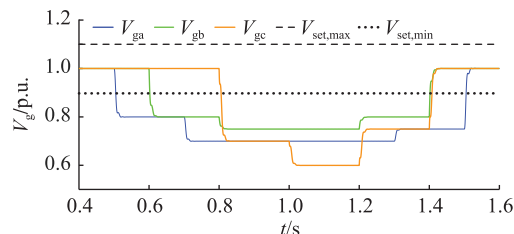
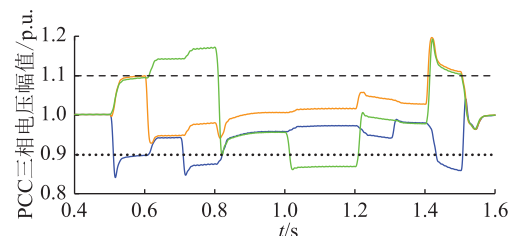
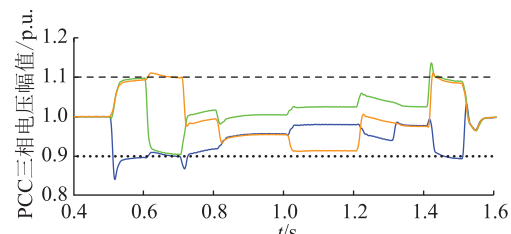


图5 网侧三相电压幅值

Fig.5 Grid-side three-phase voltage amplitude



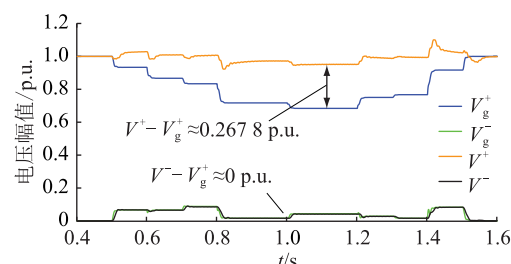
(a) 正序无功电流注入控制



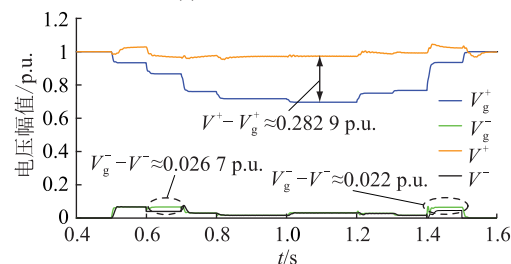
(b) 多目标低压穿越控制

图6 PCC三相电压幅值(算例1)

Fig.6 Three-phase voltage amplitude of PCC (example 1)



(a) 正序无功电流注入控制

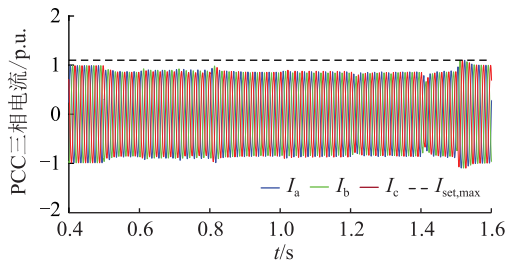


(b) 多目标低压穿越控制

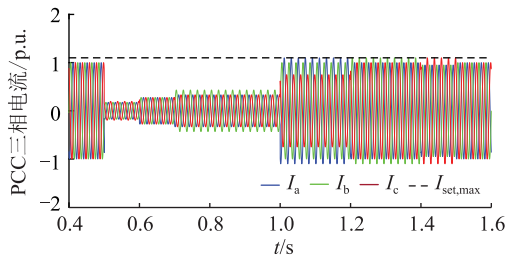
图7 PCC与 V_g 正负序电压幅值(算例1)

Fig.7 Positive and negative sequence voltage amplitude of PCC and V_g (example 1)

由图6(a)可以看到,正序无功电流注入控制在0.5~1.5 s故障期间,出现多处电压越出限值范围的



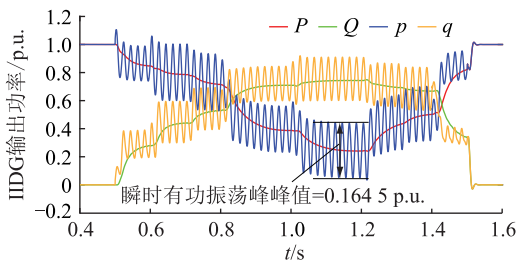
(a) 正序无功电流注入控制



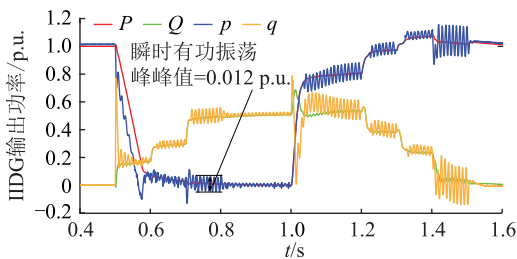
(b) 多目标低压穿越控制

图8 PCC 三相电流(算例 1)

Fig.8 Three-phase current of PCC (example 1)



(a) 正序无功电流注入控制



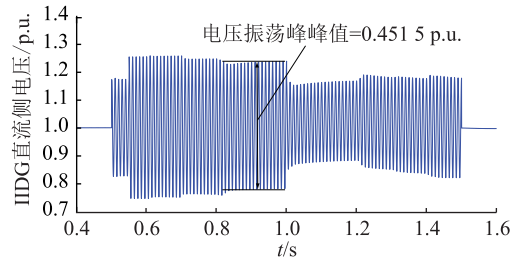
(b) 多目标低压穿越控制

图9 IIDG 输出功率(算例 1)

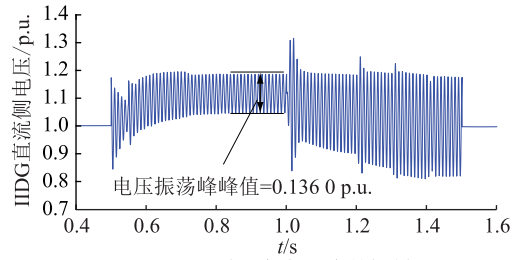
Fig.9 Output power of IIDG (example 1)

情况;对比图 6(b)可知,在多目标低压穿越控制策略的控制下,PCC 三相电压幅值较为准确地被控制在限值范围内。忽略暂态过程,主要对比稳态控制效果,可以看出,文中所提多目标低压穿越控制较传统正序无功电流注入控制有更好的电压支撑效果。

根据图 7 对比 2 个控制的正序电压幅值提升程度和负序电压幅值降低程度。由图 7(a)可以看到,正序无功电流注入控制将 PCC 正序电压幅值较网侧正序电压幅值提升了 0.267 8 p.u.,但 PCC 负序电压幅值与网侧负序电压幅值差值近似为 0;而由图 7(b)可以看到,文中所提控制将 PCC 正序电压幅值



(a) 正序无功电流注入控制



(b) 多目标低压穿越控制

图10 IIDG 直流母线电压(算例 1)

Fig.10 DC bus voltage of IIDG (example 1)

较网侧正序电压幅值提升了 0.282 9 p.u.,同时负序电压幅值在 2 个取样点分别减少了 0.026 7 p.u.和 0.022 p.u.。由此可以看到文中所提控制可有效提升 PCC 正序电压,同时减小三相电压不平衡度。

由图 8(a)、(b)可知,2 种控制方法均能有效地将 IIDG 输出的三相电流控制在限值范围内,且由图 8(b)可以看到,在 1.0 s 时投入最大有功功率输出和电流限幅控制后,IIDG 输出的三相电流立即抬升至 1.1 p.u.,仿真结果与理论分析一致。

由图 9(a)可以看到在正序无功电流注入控制的作用下,IIDG 的瞬时有功功率 p 和无功功率 q 输出出现了较大程度的波动,其中取样点处瞬时有功功率振荡峰峰值为 0.164 5 p.u.。与图 9(b)对比可以看到,在有功输出振荡抑制控制的作用下,IIDG 的瞬时有功和无功功率输出波动程度明显较小,在取样点处瞬时有功振荡峰峰值仅为 0.012 p.u.。同时也可以看到在 1.0 s 最大有功功率输出和电流限幅控制投入后,瞬时有功功率输出从 0 p.u.抬升至 0.8 p.u.附近,与理论分析一致。

同理分析图 10,由图 10(a)可以看到,在正序无功电流注入控制的作用下 IIDG 直流侧母线电压出现了较大的波动,在取样点处的电压振荡峰峰值为 0.451 5 p.u.,而由图 10(b)可知,在文中所提控制方法作用下,取样点处的电压振荡峰峰值仅为 0.136 0 p.u.,IIDG 直流母线电压振荡程度较小。

综合上述分析可知,对比传统正序无功电流注入,文中所提多目标低压穿越控制方法在电压支撑控制、有功输出振荡抑制控制和最大有功功率输出控制方面具有更好的控制效果。

5.2 算例 2: 电压支撑控制结合有功输出振荡抑制控制

前文对电压支撑控制和有功输出振荡抑制控制之间的关系进行了理论分析,本算例对此进行验证,此时线路阻抗设置为 $Z_g = j0.3 \Omega$ 。设置 ab 两相电压跌落故障,故障设置在 0.4 s 发生,故障持续时间 0.4 s,前 0.2 s 控制为电压支撑控制加最大有功功率输出控制,0.6 s 时投入有功输出振荡抑制控制,且控制考虑以有功输出振荡抑制为第一控制目标,设定有功振荡峰峰值的限值为 0.15 p.u.,仿真结果如图 11—图 14 所示。

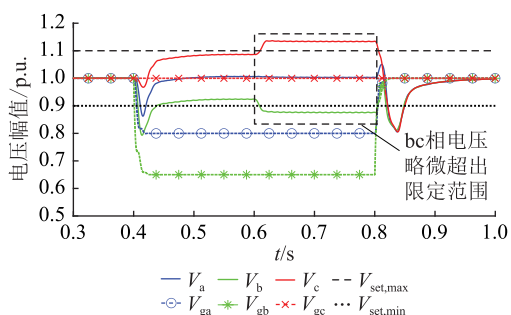


图 11 PCC 与 V_g 三相电压幅值(算例 2)

Fig.11 Three-phase voltage amplitude of PCC and V_g (example 2)

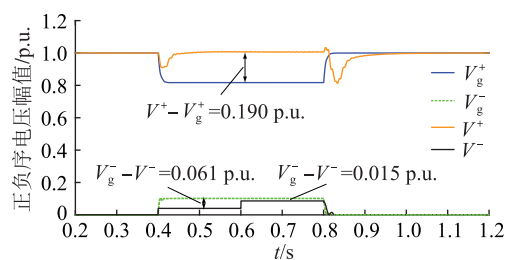


图 12 PCC 与 V_g 正负序电压幅值(算例 2)

Fig.12 Positive and negative sequence voltage amplitude of PCC and V_g (example 2)

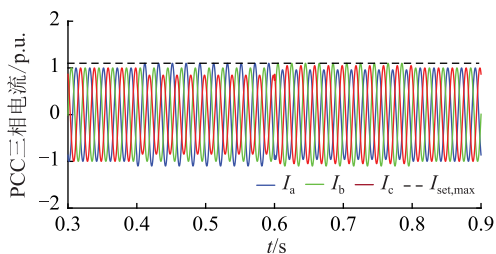


图 13 PCC 三相电流(算例 2)

Fig.13 Three-phase current of PCC (example 2)

由图 11 可知,在 0.4~0.6 s, PCC 三相电压幅值在故障稳态被较好地控制在限值范围内,在 0.6 s,有功输出振荡抑制控制投入后, PCC 处 c 相和 b 相电压幅值略微超出限值,仿真结果符合理论分析。

分析图 12 可知,在电压支撑控制的作用下 PCC

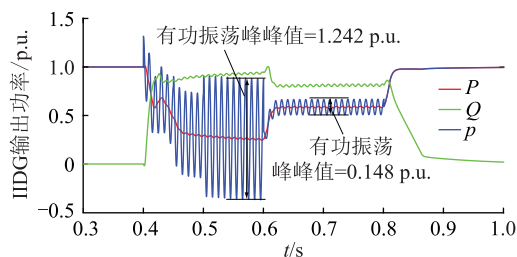


图 14 IIDG 输出功率(算例 2)

Fig.14 Output power of IIDG (example 2)

正序电压幅值较网侧电压幅值提升了 0.190 p.u.。同时可以看到,在 0.4~0.6 s, PCC 处和网侧负序电压差值为 0.061 p.u., 0.6 s 有功振荡抑制控制投入后,负序电压差值减小为 0.015 p.u.,这是由于有功输出振荡抑制控制的投入减小了 IIDG 输出的负序无功电流,使得 PCC 负序电压幅值上升。仿真结果符合理论分析。

由图 13 可知, IIDG 输出的三相电流均被控制在限值范围内。进一步分析图 14 可知, 0.4~0.6 s 期间, IIDG 瞬时有功功率输出出现了较大振荡,其中取样点处的有功振荡峰峰值为 1.242 p.u.,在有功输出振荡抑制控制投入后,瞬时有功功率振荡程度明显减小,其中取样点处的有功振荡峰峰值仅为 0.148 p.u.,小于设定的有功振荡峰峰值限值。此外还可以看到,在 0.6 s 时有功输出振荡抑制控制投入后, IIDG 无功功率输出略微减小,而有功功率输出略微上升,这是因为 IIDG 注入的负序无功电流减小,导致总的无功输出减小,同时多出的容量则转换为有功功率注入电网。综上所述,仿真结果符合理论分析结果,验证了电压支撑控制和有功输出振荡抑制控制之间的关系。

5.3 算例 3: 阻感性网络条件下电压支撑控制

本算例目的为验证电压支撑控制在阻感性网络条件下 ($R/X=1$) 电压支撑的效果,此时线路阻抗设置为 $Z_g = 0.21+j0.21 \Omega$ 。设置仿真 0.4 s 时发生故障,共持续 0.7 s,在 1.1 s 时切除故障,期间设置发生 6 种不同的电压跌落情形。仿真结果如图 15—图 18 所示。由图 15 可见, PCC 三相电压幅值被较好地控制在限值范围内。由图 16 可见, PCC 处正序电压幅值较网侧正序电压幅值在取样点处提升了 0.137 p.u.,同时 PCC 处负序电压幅值较网侧负序电压幅值在取样点处减小了 0.03 p.u.。

由图 17 可知, IIDG 输出的三相电流均被控制在限值范围内。在之前的测试中,电网被设定为感性网络,电压支撑控制只通过注入无功电流实现电压支撑目标,在算例 3 中,根据式(15)分析可知,在

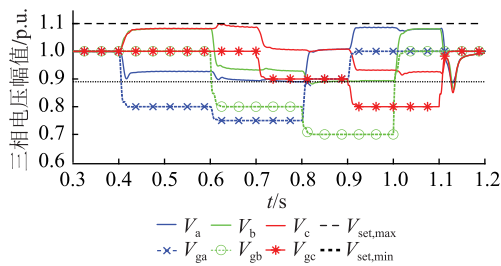
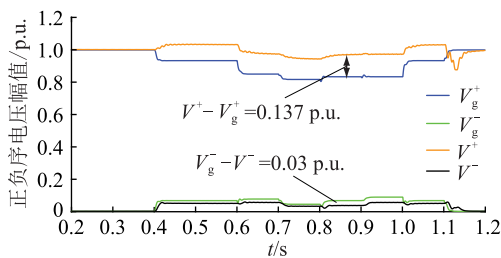
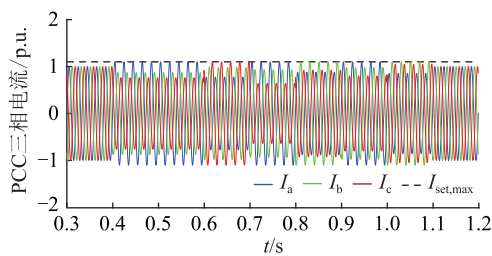
图 15 PCC 与 V_g 三相电压幅值(算例 3)Fig.15 Three-phase voltage amplitude of PCC and V_g (example 3)图 16 PCC 与 V_g 正负序电压幅值(算例 3)Fig.16 Positive and negative sequence voltage amplitude of PCC and V_g (example 3)

图 17 PCC 三相电流(算例 3)

Fig.17 Three-phase current of PCC (example 3)

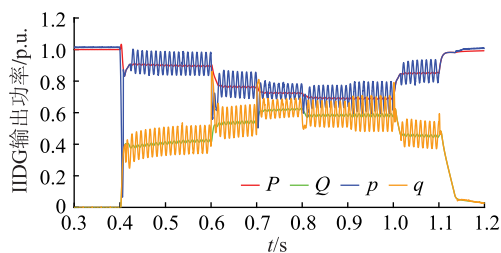


图 18 IIDG 输出功率(算例 3)

Fig.18 Output power of IIDG (example 3)

电网为阻感性时,电压支撑控制通过注入正负序有功和无功电流实现电压支撑,因此由图 18 可知,有功和无功功率被同时输出注入电网。综上分析可知,仿真结果符合理论分析。

6 结语

针对目前 IIDG 低压穿越控制存在的电压支撑效果不理想,控制目标单一等缺陷,提出一种考虑

多控制目标的 IIDG 低压穿越控制,通过控制 IIDG 向电网注入合适比例的正负序有功和无功电流,分别实现以下控制目标:(1) 任意阻感性网络条件下的电压支撑,确保 PCC 三相电压幅值可较好地控制约束在电压范围内;(2) 感性网络条件下有功输出振荡抑制控制,有效抑制有功输出出现的波动,提升系统运行稳定性;(3) 最大有功功率输出和电流限幅控制,充分利用 IIDG 的剩余容量。

本文得到云南省教育厅科学研究基金项目(2021Y654)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 郑晨玲,朱革兰,兰金晨,等. 逆变型分布式电源接入对电压时间型馈线自动化的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(1):112-116.
ZHENG Chenling, ZHU Gelan, LAN Jinchun, et al. Research on the effect of inverter interfaced distributed generation on voltage-time feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 112-116.
- [2] 邓成江,李海锋,曾德辉,等. 含逆变型分布式电源的不平衡配电网短路电流计算方法研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 39-46.
DENG Chengjiang, LI Haifeng, ZENG Dehui, et al. Calculation method of short-circuit current in unbalanced distribution network with inverter-based distributed generation[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 39-46.
- [3] 赵海兵,张昭丞,崔德民,等. 考虑电压暂降影响的逆变型分布式电源优化配置[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 112-118.
ZHAO Haibing, ZHANG Zhaocheng, CUI Demin, et al. Optimal allocation of inverter type DG considering voltage sags[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 112-118.
- [4] 邓景松,王英民,孙迪飞,等. 逆变型分布式电源接入对就地型馈线保护的影响分析[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 115-121.
DENG Jingsong, WANG Yingmin, SUN Difei, et al. Research on the effect of IIDG on local feeder protection[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 115-121.
- [5] LIANG Ji, SHI Jiabin, HONG Qiteng, et al. A multi-objective control strategy for three phase grid-connected inverter during unbalanced voltage sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 30(2): 51-58.
- [6] 光伏电站电力系统接入技术规范: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Technical regulations for power system access of photovoltaic power stations; GB/T 19964-2012[S]. Beijing: China Standard Press, 2012.
- [7] 李辉,付博,杨超,等. 双馈风电机组低电压穿越的无功电流分配及控制策略改进[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 24-31, 22.

- LI Hui, FU Bo, YANG Chao, et al. Reactive current allocation and control strategies improvement of low voltage ride through for doubly fed induction wind turbine generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 24-31, 22.
- [8] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
- PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [9] 尹项根, 张哲, 肖繁, 等. 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 1-9.
- YIN Xianggen, ZHANG Zhe, XIAO Fan, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.
- [10] 魏传芝, 施啸寒, 张恒旭, 等. 考虑电流指令跟踪能力的 PQ 控制逆变型分布式电源故障模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 59-65, 72.
- WEI Chuanzhi, SHI Xiaohan, ZHANG Hengxu, et al. Fault model of IIDG with PQ control considering tracking capability of current command[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 59-65, 72.
- [11] 施佳斌, 季亮, 常潇, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 9-17.
- SHI Jiabin, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Control strategy for inverter-interfaced distributed generation during unbalanced voltage sag considering scenario classification[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 9-17.
- [12] 陈琪蕾, 范析蓉, 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.
- [13] 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.
- [14] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Flexible voltage support control for three-phase distributed generation inverters under grid fault[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1429-1441.
- [15] 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): 5155-5162.
- 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): 5155-5162.
- [16] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V, TEODORESCU R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2583-2592.
- [17] 常仲学, 杨忠礼, 宋国兵, 等. 正负双序独立控制策略下的逆变型分布式电源不对称故障电流分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 44-51.
- CHANG Zhongxue, YANG Zhongli, SONG Guobing, et al. Analysis on asymmetric fault current characteristics of inverter interfaced distributed generator under positive-sequence and negative-sequence current respective control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 44-51.
- [18] KABIRI R, HOLMES D G, MCGRATH B P. Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1660-1668.
- [19] 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.
- [20] SHABESTARY M M, MORTAZAVIAN S, MOHAMED Y A R I. Asymmetric low-voltage ride-through scheme and dynamic voltage regulation in distributed generation units[C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. San Antonio, TX, USA. IEEE, 2018: 1603-1608.
- [21] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A R 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.
- [22] 涂娟, 汤宁平. 基于改进型 DSOGI-PLL 的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2350-2356.
- TU Juan, TANG Ningping. Synchronizing signal detection for grid voltage based on modified DSOGI-PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2350-2356.
- [23] IKKEN N, BOUKNADEL A, HADDOU A, et al. PLL synchronization method based on second-order generalized integrator for single phase grid connected inverters systems during grid abnormalities[C]//2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS). Fez, Morocco. IEEE, 2019: 1-5.
- [24] 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 Yaai, LIU Jindong, ZHOU Jinghua. Fault ride-through control strategy for solar grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3405-3412.
- [25] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A R 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.

- [26] ASIMINOAEI L, TEODORESCU R, BLAABJERG F, et al. Implementation and test of an online embedded grid impedance estimation technique for PV inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1136-1144.
- [27] 丘冠新, 朱鹏宇, 王灿, 等. 负载不平衡条件下 MMC-STATCOM 补偿策略研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 35-42.
- QIU Guanxin, ZHU Pengyu, WANG Can, et al. The compensation method of MMC-STATCOM under unbalanced load condition[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39

(2): 35-42.

作者简介:



何晋

何晋(1965),男,博士,教授,研究方向为电力系统自动化、电机控制、人工智能在电力系统中的应用(E-mail:hjmwh@sina.com);

李智轩(1998),男,硕士在读,研究方向为逆变型分布式电源控制;

左金花(1996),女,硕士在读,研究方向为逆变型分布式电源控制。

A low voltage ride-through control method of IIDG considering multiple control targets

HE Jin, LI Zhixuan, ZUO Jinhua, LI Weixi, SUN Congyue, LI Guangyao

(School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Kunming 650031, China)

Abstract: There are some disadvantages in existing inverter-interfaced distributed generators (IIDG) low voltage ride-through control methods, such as unsatisfactory voltage support effects, single control objectives, and the risk of over-limiting the output current. In this paper, a low voltage ride-through control considering multiple control objectives is proposed. Firstly, the preset phase voltage is used as the constraint condition, and the voltage support equation is constructed to realize the voltage support control. Secondly, by restricting the magnitude of the negative sequence reactive current injected by the IIDG into the grid, the active output oscillation suppression control is realized. At the same time, to make full use of the remaining capacity of IIDG, the maximum active power output and current-limiting strategy are used to calculate the positive sequence active current reference value of the IIDG to ensure that the maximum active power output control is achieved under the premise that the output current of IIDG does not exceed the limit. The simulation results show that compared with the existing positive-sequence reactive current injection control method, the proposed low-voltage ride-through control method in this paper has a better fault control effect.

Keywords: unbalance fault; inverter-interface distributed generators (IIDG); voltage support; maximum active power output control; active power output oscillation suppression control; current limitation

(编辑 方晶)