

不对称故障条件下并网光伏逆变器功率波动与 电流抑制改进控制策略

曹 炜, 徐永海, 王亚奇

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

An Improved Control Strategy of Power Fluctuation and Current Suppression for Grid-connected Photovoltaic Inverter Under Unbalanced Fault Condition

CAO Wei, XU Yonghai, WANG Yaqi

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘 要: 电网出现不对称故障时三相光伏并网逆变器会产生较大的有功和无功功率波动、谐波电流以及峰值电流, 本文针对不对称故障条件下光伏逆变器的功率控制进行研究, 提出一种能够抑制功率波动、输出电流谐波以及峰值电流的改进控制策略, 在已有参考电流算法基础上加入多个调节参数, 分析了功率波动、输出电流谐波以及峰值电流同参数之间的关系, 提出了调节参数的确定原则及限功率措施, 通过在 PSCAD/EMTDC 中建立仿真模型验证了所提出控制策略的正确性。

关键词: 光伏逆变器; 不对称故障; 谐波电流; 功率波动; 峰值电流

Abstract: Three-phase grid-connected photovoltaic inverter will cause active and reactive power fluctuations, produce apparent harmonic currents, and increase peak current under unbalance voltage faults condition. In this paper, the power control of photovoltaic inverter under unbalanced fault condition is studied, and an advanced control strategy which can restrain the fluctuation of active power, reactive power, output harmonic currents and peak current is proposed. By adding several adjusting parameters based on the existing reference current algorithm, the relationships between harmonic current, power fluctuations, peak current and parameters are analyzed, and the determination principle of adjusting parameters and the power-limited measures are proposed. The simulation models in PSCAD/EMTDC have been built to validate the accuracy of proposed control strategy.

Keywords: photovoltaic inverter; unbalanced fault; harmonic currents; power fluctuation; peak current

基金项目: 国家自然科学基金项目(51277069)

0 引 言

随着经济社会的不断发展, 风能、太阳能等新能源发展迅速, 在电网中占有比例越来越大, 光伏等新能源发电系统对电网安全稳定运行的影响也日益显著^[1]。当电网发生故障时, 若光伏电站大面积脱网, 会对电网供电可靠性造成一定的影响。在电网运行过程中, 不对称故障比对称故障更为频繁, 电网发生不对称故障会导致光伏逆变器产生较大的谐波电流和峰值电流, 输出功率出现波动, 严重影响光伏发电系统的稳定性。

电网发生不对称故障时参考电流算法是功率变换器控制的重要问题之一, 根据故障中参考电流算法的不同, 逆变器整体性能以及与电网间相互作用将有明显变化。文献 [2] 最早提出了正负序双旋转坐标 PI 控制, 实现了正负序电流的控制, 但逆变器容量较高时容易产生直流侧脉动; 文献[3-4]提出了瞬时有功无功控制(instantaneous active-reactive control, IARC)、平均有功无功控制(average active-reactive control, AARC)等 5 种功率控制策略, 但这些控制策略只侧重功率波动或者输出电流谐波畸变其中一点; 文献 [5] 提出灵活正负序控制, 但参考电流算法复杂, 输出功率波动较大; 文献 [6] 提出变流器有功无功波动灵活调节算法, 该方法没有谐波问题, 但是却增大了无功波动; 文献 [7] 在 IARC 算法基础上, 提出了在参考电流中加入一个可变调节参数的控制策略, 可以对输出电流谐波畸变和有功无功功率波动平滑调

节，但其调节范围有限，只能进行线性调节，同时有功功率波动量较大。文献 [8] 提出了一种平滑调节输出电流谐波畸变和有功无功功率波动的控制策略，同时考虑了各次谐波的畸变，但并没有考虑峰值电流问题。文献 [9] 提出一种灵活调节的参考电流算法，并提出了峰值电流最小情况下的参数确定方法，但该方法波形畸变严重。文献 [10] 在文献 [9] 基础上改进了参考电流算法及参数确定方法，文献 [11] 提出了一种恒定有功的控制策略，文献 [12] 提出一种应用于不平衡电网电压条件下的比例积分-降阶谐振调节器，文献 [13] 综合 IARC 及 AARC 提出一种协调控制策略，对功率波动及谐波进行调节。

本文提出一种综合考虑功率波动、输出电流谐波和峰值电流的改进控制方法，提出了参考电流算法中控制参数的确定原则，在 PSCAD/EMTDC 中建立模型，采用比例谐振 (proportional - resonant, PR) 控制器实现正负序同时控制，具有较好的控制性能，仿真结果验证了所提出控制策略的有效性。

1 光伏逆变器结构及参考电流算法

图 1 所示的是光伏逆变器的拓扑结构，这种拓扑是目前光伏发电系统中使用最为广泛的拓扑，采用三相三线制，不存在零序电流，其输出功率可双向流动，直流电压可控。图中 U_{dc} 为逆变器直流侧电压， R 、 L 为输出电阻及电感，光伏阵列通过逆变器与交流理想电源连接，输出电流接近正弦。

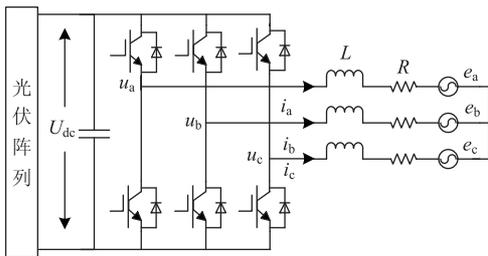


图 1 光伏逆变器拓扑

以 a 相为例，光伏逆变器数学模型可以表示为

$$u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

式中： R 和 L 为逆变器电阻和电抗； e_a 为网侧电压； u_a 为逆变器侧电压。

由此可以得到经过变换后在 dq 旋转坐标系下光伏逆变器的数学模型：

$$\begin{cases} u_d^+ = (R + sL)i_d^+ + e_d^+ - \omega Li_q^+ \\ u_q^+ = (R + sL)i_q^+ + e_q^+ + \omega Li_d^+ \\ u_d^- = (R + sL)i_d^- + e_d^- + \omega Li_q^- \\ u_q^- = (R + sL)i_q^- + e_q^- - \omega Li_d^- \end{cases} \quad (2)$$

式中： u_d^+ 、 u_q^+ 、 u_d^- 、 u_q^- 分别为逆变器输出电压的 dq 轴正负序分量； i_d^+ 、 i_q^+ 、 i_d^- 、 i_q^- 为输出电流 dq 轴正负序分量； e_d^+ 、 e_q^+ 、 e_d^- 、 e_q^- 为电网电压 dq 轴正负序分量。

由瞬时功率理论，光伏逆变器的瞬时有功和无功功率可以表示为

$$\begin{cases} p = \mathbf{u}^T \mathbf{i} \\ q = \mathbf{u}_\perp^T \mathbf{i} \end{cases} \quad (3)$$

式中：

$$\mathbf{u} = [u_a, u_b, u_c]^T =$$

$$\begin{bmatrix} U^+ \cos(\omega t + \varphi^+) + U^- \cos(\omega t + \varphi^-) \\ U^+ \cos(\omega t + \varphi^+ - \frac{2}{3}\pi) + U^- \cos(\omega t + \varphi^- + \frac{2}{3}\pi) \\ U^+ \cos(\omega t + \varphi^+ + \frac{2}{3}\pi) + U^- \cos(\omega t + \varphi^- - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}$$

为逆变器输出电压，而 $\mathbf{i} = [i_a, i_b, i_c]$ 为输出电

流， $\mathbf{u}_\perp = \frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{u} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ，超前电压 \mathbf{u} 相量

90° ， U^+ 、 φ^+ 和 U^- 、 φ^- 分别为正负序电压的幅值和相位， $\omega = 2\pi f$ 为角频率且 $f = 50\text{Hz}$ 。

在稳态情况下光伏逆变器一般运行在最大功率跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 状态，而在故障发生光伏逆变器一般不采用 MPPT 算法，采用暂态时故障穿越控制策略^[14]。本文在稳态过程中采用扰动观察法进行 MPPT 控制。

当电网发生不对称故障时，电压和电流的反向交叉将使得光伏逆变器输出有功和无功功率出现倍频波动^[10,15]，由瞬时功率理论可以得到参考电流算法为

$$\mathbf{i} = \frac{P}{|\mathbf{u}|^2} \mathbf{u} + \frac{Q}{|\mathbf{u}|^2} \mathbf{u}_\perp = \frac{P\mathbf{u} + Q\mathbf{u}_\perp}{|\mathbf{u}^+|^2 + 2\mathbf{u}^+ \mathbf{u}^- + |\mathbf{u}^-|^2} \quad (4)$$

式中： P 和 Q 分别为逆变器输出有功和无功功率； \mathbf{u}^+ 和 \mathbf{u}^- 分别为逆变器正负序电压； $|\mathbf{u}^+|^2$ 和 $|\mathbf{u}^-|^2$ 分别为正负序分量模值。

采用式(4)作为电流参考值进行控制时，逆变器输出功率能够完全跟踪功率指令，不会出现波动，但是由于电压模值 $|\mathbf{u}|^2$ 存在二倍频振荡分

量, 这样就会导致输出电流中含有较多的谐波。

为此 AARC 控制策略被提出, AARC 控制策略的参考电流算法为

$$i = \frac{Pu + Qu_{\perp}}{|u^+|^2 + |u^-|^2} \quad (5)$$

采用 AARC 控制策略时, 虽然输出电流不含有谐波分量, 但是其有功和无功均有较大波动。

2 不对称条件下光伏逆变器功率波动、电流抑制特性分析

2.1 功率波动、峰值电流与谐波抑制控制策略

考虑有功无功功率波动、输出电流畸变以及峰值电流的抑制, 同时考虑到输出电流畸变和功率波动等因素的自由调节, 本文提出了在参考电流算法中加入多个调节参数的改进方法。在式(4)中加入 m^+ 、 m^- 、 k 共 3 个调节系数, 对 m^+ 、 m^- 、 k 这 3 个系数的调节能够对输出电流谐波畸变、电流峰值以及有功和无功功率波动进行调节:

$$i = \frac{P(m^+ u^+ + m^- u^-) + Qu_{\perp}}{m^+ |u^+|^2 + k u^+ u^- + m^- |u^-|^2} \quad (6)$$

式中: m^+ 、 m^- 的调节范围为 $[0, 1]$, k 的调节范围为 $[0, 2]$, 能够平滑调节输出电流畸变、电流峰值以及有功无功功率波动。

2.2 谐波电流分析计算

《光伏电站接入电网技术规定》^[16] 中要求光伏电站接入系统运行时功率因数应不小于 0.98(超前或者滞后), 一般国内外光伏发电系统都运行在单位功率因数下, 将无功功率 Q 设为 0。若设负序电压和正序电压的比值 $U^-/U^+ = \epsilon$, 由式(3)、(6)可以得到三相输出电流计算公式:

$$\begin{cases} i_a = \frac{2P}{3U^+} \times \frac{(m^+ + m^- \epsilon) \cos(\omega t)}{m^+ + m^- \epsilon^2 + k \epsilon \cos(2\omega t)} \\ i_b = \frac{2P}{3U^+} \times \frac{m^+ \cos(\omega t - 120^\circ) + m^- \epsilon \cos(\omega t + 120^\circ)}{m^+ + m^- \epsilon^2 + k \epsilon \cos(2\omega t)} \\ i_c = \frac{2P}{3U^+} \times \frac{m^+ \cos(\omega t + 120^\circ) + m^- \epsilon \cos(\omega t - 120^\circ)}{m^+ + m^- \epsilon^2 + k \epsilon \cos(2\omega t)} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可以推出在不对称故障情况下三相输出电流的基波有效值 I_1 以及全波电流有效值 I , 能够得到输出电流总谐波畸变率公式为

$$THD = \sqrt{\frac{I^2}{I_1^2} - 1} = \sqrt{\frac{(\sqrt{A} + \sqrt{B})^2}{4\sqrt{AB}} - 1} \quad (8)$$

$$\text{式中: } I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_a^2 dt},$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{T} \sqrt{\left[\int_0^T i_a \cos(\omega t) dt \right]^2 + \left[\int_0^T i_a \sin(\omega t) dt \right]^2},$$

$A = m^+ + m^- \epsilon^2 + k \epsilon$, $B = m^+ + m^- \epsilon^2 - k \epsilon$ 并满足 $B \geq 0$ 。输出电流总谐波畸变率主要与 3 个参数以及电压不平衡度 ϵ 有关。

图 2 显示了参考电流谐波畸变率同参数 k 以及电压不平衡度 ϵ 的变化情况。此时 m^+ 、 m^- 均设为 1, 由图可以看出, 随着 ϵ 的增大, 总谐波畸变率将逐渐增大, 从 k 轴来看, k 越大总谐波畸变率越大, 当 $k=2$ 时, 总谐波畸变率达到最大值, 当 $k=0$ 时, 这时候由于电压模值 $|u|^2$ 中不存在二倍频振荡分量, 因此其谐波为 0。

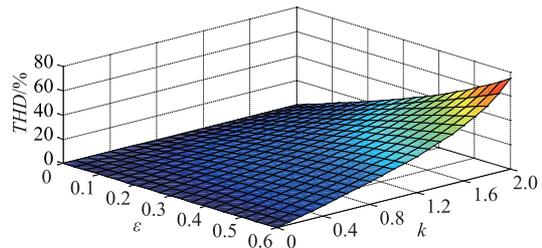


图 2 电流总谐波畸变率

在光伏并网标准中, 不仅对总谐波畸变率有要求, 同时对各次谐波含有率也有要求。若光伏并网电流某次谐波含有率超限, 仍然会不满足光伏发电的并网要求。光伏发电偶次谐波非常小, 可以忽略不计, 并网电流中主要是奇次谐波, 其中 3 次谐波较高^[8], 要对 3 次谐波进行分析。

在发生不对称故障情况下光伏并网电流中第 h 次谐波有效值为

$$\begin{aligned} I_h &= \frac{\sqrt{2}}{T} \sqrt{\left[\int_0^T i_a \sin(h\omega t) dt \right]^2 + \left[\int_0^T i_a \cos(h\omega t) dt \right]^2} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{T} \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \end{aligned} \quad (9)$$

对于奇次谐波电流, 对正弦函数与电流乘积的积分项 a_h^2 为奇函数, 其结果为 0。因此主要对余弦函数与电流乘积的积分项 b_h^2 进行计算。光伏并网电流中 3 次谐波为

$$\begin{aligned} I_3 &= \frac{\sqrt{2}}{T} \sqrt{b_3^2} = \frac{\sqrt{2}}{T} b_3 = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T i_a \cos(3\omega t) dt \approx \\ &= \frac{\sqrt{2}P(m^+ + m^- \epsilon)}{3k\epsilon U^+} \left[\Delta D \frac{2m^+ + k\epsilon + 2m^- \epsilon^2}{\sqrt{C(m^+ + m^- \epsilon^2 + k\epsilon)}} - 2 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

式中： $C = [(m^+ + m^- \epsilon^2)^2 - k^2 \epsilon^2]^{1/2}$ ， ΔD 为误差系数。

采用数值方法^[8]能够将 $2\cos^2(\omega t) / [m^+ + m^- \epsilon^2 + k\epsilon \cos(2\omega t)]$ 在周期 T 内的积分近似约等于 $T / [C(m^+ + k\epsilon + m^- \epsilon^2)]^{1/2}$ ，由于数值方法会产生一定误差，因此加入误差系数 ΔD 保证结果更为精确。

由此可以得到 3 次谐波含有率为

$$HRI_3 = \frac{I_3}{I_1} \times 100\% = \frac{1}{\sqrt{2k\epsilon}} [\Delta D(2m^+ + k\epsilon + 2m^- \epsilon^2) - 2\sqrt{C(m^+ + k\epsilon + m^- \epsilon^2)}] \times 100\% \quad (11)$$

由式(11)可以看出，3 次谐波含有率同样和 3 个参数以及电压不平衡度 ϵ 有关。

2.3 峰值电流分析

在不对称故障发生时，由于正序电压的跌落，导致三相电流会明显增大，由式(7)三相输出电流表达式可以得到不对称故障情况下光伏逆变器输出电流峰值同故障前正常电流值的比值 $R_{I_{max}}$ 与 3 个参数之间的关系，图 3 给出了电压不平衡度 ϵ 为 0.3 时比值 $R_{I_{max}}$ 与参数 k 、 m^- 之间的关系，此时 $m^+ = 1$ 。可以看出参数 k 、 m^- 的变化会导致输出电流峰值出现较大变化。当 $k=2$ ， $m^- = 1$ 时的输出电流峰值较大，但此时有功和无功功率波动最小； $k=0$ ， $m^- = 0$ 时输出电流峰值和额定电流相接近， $k=2$ ， $m^- = 0$ 时输出电流峰值约为逆变器正常运行时的 2.5 倍，在实际运行中其电流峰值可能更大，可能会导致开关器件损坏。因此需要对参数进行合理选择，保证峰值电流在允许最大电流范围内。

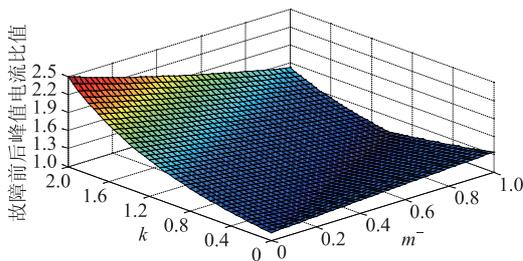


图 3 电压不平衡度 ϵ 为 0.3 时输出电流峰值比值

2.4 功率波动分析

由式(5)可以得到光伏逆变器的瞬时功率值：

$$p = \mathbf{u}^T \mathbf{i} = P + P \frac{(m^+ + m^- - k)u^+ u^-}{m^+ |u^+|^2 + k u^+ u^- + m^- |u^-|^2} \quad (12)$$

能够推出此时有功功率的倍频波动分量为

$$\Delta p = \frac{p - P}{P} = \frac{(m^+ + m^- - k)\epsilon \cos(2\omega t)}{m^+ + k\epsilon \cos(2\omega t) + m^- \epsilon^2} \quad (13)$$

对于无功功率，将无功功率 Q 设为 0，可以得到无功功率的倍频波动分量为

$$\Delta q = \frac{q}{P} = \frac{(m^+ - m^-)\epsilon \cos(2\omega t)}{m^+ + m^- \epsilon^2} \quad (14)$$

图 4 给出了电压不平衡度 $\epsilon = 0.3$ 时最大输出有功功率波动 ΔP_{max} 同参数 k 、 m^- 的变化情况，此时 $m^+ = 1$ 。由图可以看出， $m^- = 1$ 时最大有功功率波动随着 k 的值变大而呈变小的趋势，而当 $m^- = 1$ 、 $k=2$ 时，此时的功率波动值能够达到最小为 0。由图 2 和图 3 可以看出，最大输出功率波动的变化情况和输出电流谐波的变化在较大范围内二者变化趋势是相反的。由公式(13)、(14)可以看出输出有功功率波动由参数 m^+ 、 m^- 、 k 共同决定，而输出无功功率波动只由参数 m^+ 、 m^- 决定。

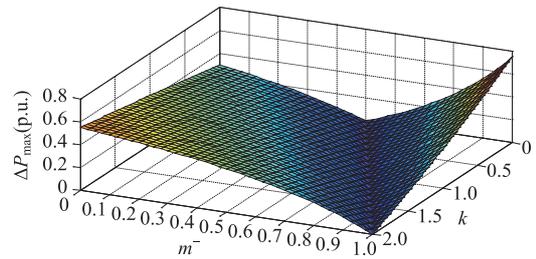


图 4 输出最大有功功率波动($\epsilon = 0.3$)

2.5 参数 m^+ 、 m^- 、 k 的确定及限功率策略

由前面几节可知，参数 m^+ 、 m^- 、 k 的变化能够导致输出电流畸变、电流峰值以及有功无功功率波动出现变化。对于 3 个参数可以有多种确定方法，文献 [9] 提出考虑三相峰值电流最小的参数确定方法，但此时输出电流畸变率较高。目前国内外的并网准则主要是对谐波等指标作了要求，如《光伏电站接入电网技术规定》以及国外 IEEE 1547 等^[11,15] 准则中均明确规定了谐波电流畸变限值，同时还对各次谐波的畸变进行了限制。如 IEEE 1547 规定总谐波畸变率应小于 5%，IEEE std. 929-2000 规定 3~9 次奇波的谐波含有率应低于 4% 等。另外，国内外各种并网准则中还对输出电流峰值进行了规定，如《光伏电站接入电网技术规定》^[16] 要求光伏电站具备一定的过电流能力，设定光伏逆变器所允许的最大电流峰值 I_{max} 为 1.5 倍额定电流。由于本文的研究对象为接入配电网的分布式光伏发电系统，考虑到国标对分布式光伏发电

在电压跌落时的无功支撑能力没有要求,因此在故障时期仍然在单位功率因数运行。

考虑到并网的各项要求,选取合适的 m^+ 、 m^- 、 k 的值能够有效调节输出电流以及功率波动,保证并网的电能质量。本文采用多目标优化中的序列二次规划算法(sequential quadratic programming, SQP),这种方法能将带有等式和不等式约束的非线性规划问题转化为二次规划问题进行求解。以输出有功、无功功率波动以及输出电流峰值为目标函数,以电流畸变率限值为约束,对调节参数进行优化选取。

采用 SQP 算法的目标函数为

$$\min F = f(\Delta P_{\max}, \Delta Q_{\max}, R_{I_{\max}}) \quad (15)$$

式中: $R_{I_{\max}}$ 为故障情况下光伏逆变器输出电流峰值同故障前正常电流值的比值。 ΔP_{\max} 和 ΔQ_{\max} 分别为输出有功和无功功率波动最大值。

对于输出电流畸变的约束条件可以表示为

$$\begin{cases} THD \leq THD_{\max} \\ HRI_3 \leq HRI_{3_max} \\ i_{\max} \leq I_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: THD_{\max} 和 HRI_{3_max} 分别为所允许的输出电流总谐波畸变率和 3 次谐波含有率最大值, THD_{\max} 和 HRI_{3_max} 依据并网准则可以分别取 5% 和 4% 进行分析。

SQP 算法是目前公认求解非线性约束优化问题较好的算法之一,其收敛性好,运算速度快。采用该方法时,首先对目标函数设定一定的初值范围,初值范围可以根据实际情况进行设定。在 MATLAB 中可以利用 fgoalattain 函数实现 SQP 算法,其主要步骤如下:

- ① 根据并网准则或实际要求设定约束条件;
- ② 设定目标解的初值及 ΔP_{\max} , ΔQ_{\max} , $R_{I_{\max}}$ 的初值;
- ③ 进行迭代优化求解得出最优解。

由图 3、图 4 可以看出,功率波动和峰值电流变化的趋势并不是一致的,因此若不对称跌落较深或根据实际情况设定的式(15)中 3 个目标项可能并不能全部得到满足,如对参数的调节有可能不能够满足峰值电流 i_{\max} 小于允许最大电流 I_{\max} 的条件等,可以采用限功率运行的办法改变输出有功功率指令,此时可以满足约束条件,功率波动和峰值电流均会减小,根据式(6)可以算出此时能够输出的有功功率。

3 光伏发电系统模型建立

光伏逆变器一般采用三相三桥臂结构,从网侧提取出正负序电压分量,利用谐波畸变率、三相输出电流和功率波动表达式能够得出 m^+ 、 m^- 、 k 参数整定值,从而得出 $\alpha\beta$ 坐标系下参考电流。

由于比例谐振控制器能够对谐振频率为 $\pm\omega_0$ 的信号具有无限增益,能够实现正弦量无静差控制^[12-13,17],因此本文采用 PR 控制器控制注入电流,光伏发电系统控制框图如图 5 所示。

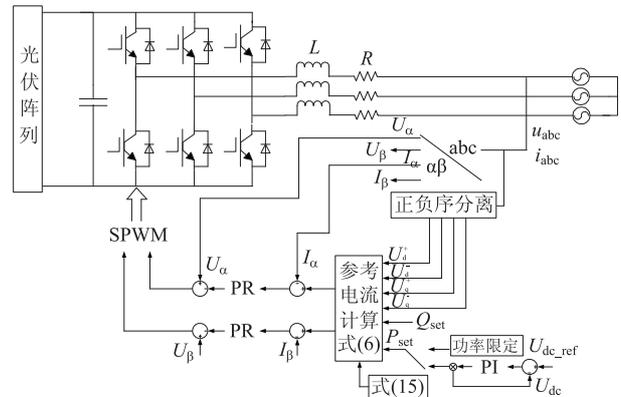


图 5 光伏发电系统控制框图

图中 u_{abc} 和 i_{abc} 分别为网侧三相电压和电流,经过正负序分离后得到 dq 轴正负序分量, U_{dc} 和 U_{dc_ref} 分别为光伏逆变器直流侧电容电压实际值和参考值, P_{set} 和 Q_{set} 为逆变器有功和无功功率参考值,经过参考电流计算得到 $\alpha\beta$ 坐标系下参考电流,经过 PR 控制器以及调制后得出参考电流。

4 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 中建立图 1 所示的光伏发电系统仿真模型,其控制策略如图 5 所示,表 1 所示的是光伏发电系统参数。

表 1 光伏发电系统仿真参数

参数	参数值
额定功率 P_{rated} /MW	0.5
直流侧电压 U_{dc} /V	800
直流侧电容 $C/\mu F$	5 700
滤波电感 L/mH	1
开关频率 f/kHz	6

光伏发电系统稳定运行后,在 $t=2s$ 时发生不

对称故障，电压不平衡度 $\epsilon=0.3$ ，此时有功功率设为额定功率 0.5MW，无功功率设为 0，不同参数

m^+ 、 m^- 、 k 得到的输出有功和无功功率以及并网电流波形如图 6 所示。

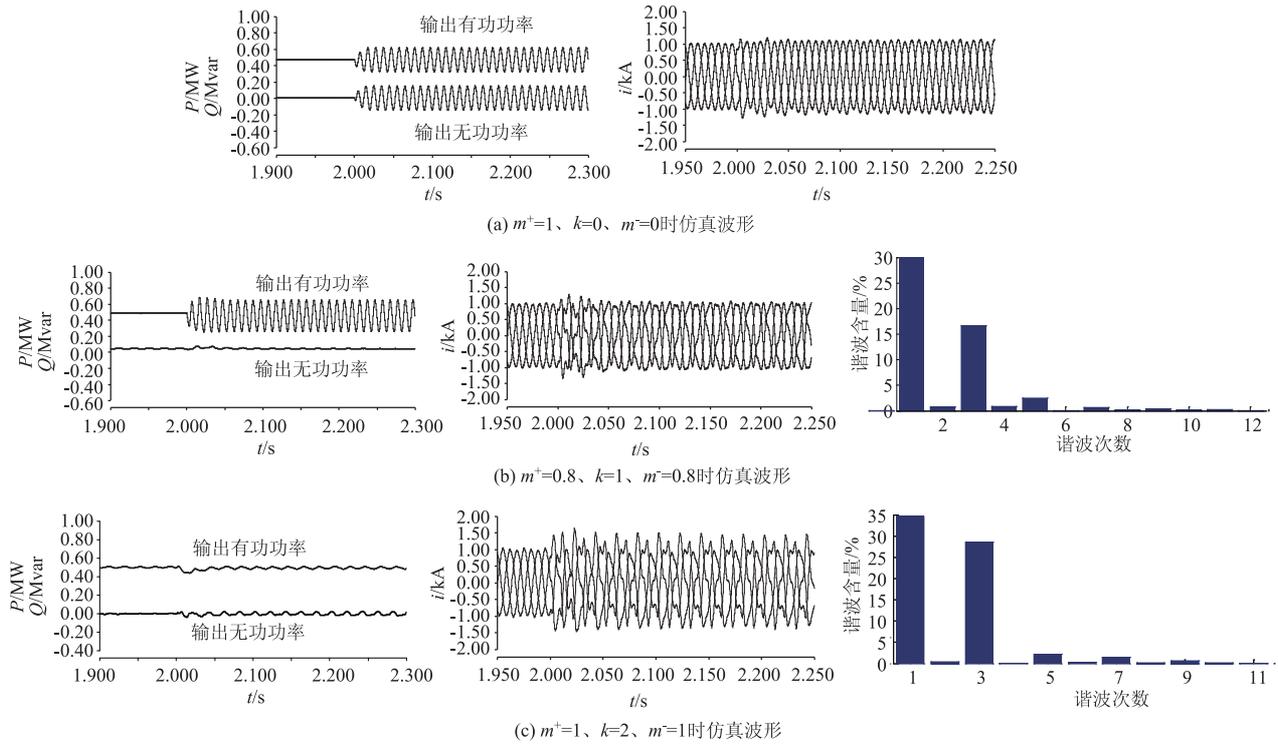


图 6 不同 m^+ 、 m^- 、 k 参数下光伏发电系统输出波形

图 6 示出了不同 m^+ 、 m^- 、 k 参数下光伏发电系统的输出波形，给出了 THD 最小、一般及较大时的输出波形图。当 $m^+=1, k=0, m^-=0$ ， $m^+=0.8, k=1, m^-=0.8$ ， $m^+=1, k=2, m^-=1$ 时仿真得到的电流 THD 分别约为 0.9%、17.4%和 30%，而经过式(7)计算得到的 THD 理论值分别为 0%、18.03%和 34.15%，二者基本一致。图 6(a)输出电流谐波畸变率最小，此时 $m^+=1, k=0, m^-=0$ 有功功率和无功功率均波动约为 30%，其电流峰值约为原来电流峰值的 1.1 倍；图 6(b)有功功率波动约为 35%，无功功率无波动，其中 3 次谐波为 17%，经过式(10)计算得到的 3 次谐波分量约为 17.2%，其电流峰值约为原来电流的 1.12 倍；图 6(c)有功和无功功率波动均为 0，但是输出谐波电流畸变率较大，同时经过分析得到 3 次谐波约为 28%，经过理论分析得到的 3 次谐波分量约为 32%，其电流峰值约为原来电流的 1.45 倍。调节 3 个参数能够影响输出功率波动、输出电流畸变率以及电流峰值，仿真结果和前述理论分析基本一致。

以 2.5 节参数整定方法，能够保证输出电流畸

变满足约束条件的情况下功率波动和电流峰值达到最优。图 7 分别给出 $\epsilon=0.3$ 时， $[\Delta P_{max}, \Delta Q_{max}, R_{Imax}]$ 初值分别为 $[0.3, 0.3, 1.2]$ 和 $[0.5, 0, 1.2]$ 时的输出功率波形，第一种情况主要考虑功率波动和电流峰值综合最优的情况，第二种情况

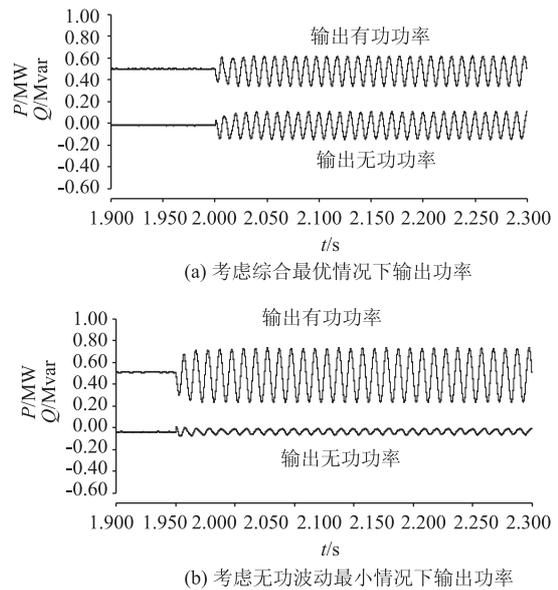


图 7 约束条件下仿真波形

主要考虑无功功率波动最小的情况, 两种情况下的经过优化求解后的参数分别为 $m^+ = 0.967$ 、 $k = 0.32$ 、 $m^- = 0.118$ 和 $m^+ = 0.926$ 、 $k = 0.33$ 、 $m^- = 0.81$ 。考虑综合最优的情况下输出有功功率波动约为 26%, 无功功率波动为 26%, 故障前后电流峰值之比约为 1.16; 考虑无功波动最小时输出有功功率波动约为 47%, 无功功率波动约为 0, 故障时输出电流约为故障前电流的 1.2 倍, 与考虑综合最优的情况进行比较可以看出有功波动增大的情况下能够保证无功波动的降低。此时两种情况下输出电流总谐波畸变和 3 次谐波畸变都满足约束条件要求。针对电网不同的需求可以取不同的初值目标进行优化求解。

5 结束语

本文在不对称故障情况下提出一种针对光伏发电系统综合考虑有功无功功率波动、电流峰值以及输出电流谐波的改进控制策略, 通过引入调节参数 m^+ 、 m^- 、 k 来实现对功率波动和输出电流的平滑灵活控制, 提出了参数 m^+ 、 m^- 、 k 的整定原则。仿真结果和理论计算结果基本一致, 所提出的控制方法能够保证光伏发电系统的并网要求。

参 考 文 献

- [1] 李龙坤, 王敬华, 孙桂花, 等. 用于光储微网储能系统削峰填谷的控制策略 [J]. 现代电力, 2016, 33(2): 27-32.
- [2] SONG H, NAM K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [3] RODRIGUEZ P, TIMBUS A, 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.
- [4] RODRIGUEZ P, TIMBUS A, TEODORESCU R, et al. Reactive power control for improving wind turbine system behavior under grid faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1798-1801.
- [5] RODRIGUEZ P, TIMBUS A, TEODORESCU R, et al. Control of power converters in distributed generation applications under grid fault conditions [C] // Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, A. Z, September 17-22, 2011: 2649-2656.
- [6] WANG Fei, DURATE J L, HENDRIX 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.
- [7] 黄浩, 徐永海, 杨琳, 等. 不对称电压条件下光伏逆变器的控制策略 [J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1277-1282.
- [8] 周念成, 楼晓轩, 王强刚, 等. 电网电压不平衡下三相光伏发电系统的谐波电流抑制 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 246-254.
- [9] MIRET J, CASTILLA M, CAMACHO A, et al. Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4262-4271.
- [10] 王强刚, 周念成, 颜伟, 等. 电网电压不平衡下光伏发电系统的改进功率控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 30-37.
- [11] 郭小强, 邬伟扬, 漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相并网逆变器控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 22-28.
- [12] 赵新, 金新民, 周飞, 等. 基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 84-92.
- [13] 郭小强, 张学, 卢志刚, 等. 不平衡电网电压条件下光伏并网逆变器功率/电流质量协调控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 346-353.
- [14] 韩贤岁, 刘其辉. 对称和不对称故障下的并网光伏逆变器低电压穿越研究 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 113-118.
- [15] 周克亮, 王政, 徐青山. 光伏与风力发电系统并网变换器 [M]. 北京: 机械工业出版社. 2012.
- [16] Q/GDW 617-2011. 光伏电站接入电网技术规定 [S]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- [17] 孙海洋, 孙玉坤, 张亮. 具备无功补偿的 NPC 三电平光伏并网发电系统的准 PR 控制 [J]. 现代电力, 2013, 30(6): 62-66.

收稿日期: 2016-08-22

作者简介:

曹 炜(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用, E-mail: caoweicolin@sina.cn;
徐永海(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制、电力电子在电力系统中的应用、电力系统谐波等, E-mail: yonghaixu@263.net;
王亚奇(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用, E-mail: 1527280093@qq.com.

(责任编辑: 杨秋霞)