

不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略

杨超颖¹, 王金浩¹, 杨赞磊¹, 杜慧杰¹, 徐永海², 曹炜²

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001;
2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 不对称故障在电网实际运行过程中时有发生, 其导致的输出电流峰值较大的问题严重影响了光伏发电系统的可靠运行。首先对不对称故障条件下并网光伏逆变器输出电流峰值过大的机理进行了分析, 进而提出了一种考虑输出电流峰值的参考电流算法, 在已有参考电流算法中加入多个调节参数, 能够对输出电流峰值和功率波动进行调节。在所提出改进参考电流算法基础上, 提出了一种有功无功协调控制策略, 有效解决了不对称故障条件下并网光伏逆变器的过流问题, 拓展了光伏系统的有功输出能力。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; 峰值电流; 功率波动

Control strategy to suppress peak current for grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced voltage sags

YANG Chaoying¹, WANG Jinhao¹, YANG Yunlei¹, DU Huijie¹, XU Yonghai², CAO Wei²

(1. State Grid Electric Power Research Institute of Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China;
2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: Unbalanced voltage sags often occur during actual power grid operations, causing problem of excessing output peak current, which significantly affects the reliable operation of power grid. This paper first analyzes the mechanism of excessing peak current of grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced voltage sags, then a reference current algorithm which takes output peak current into consideration is proposed, adding several adjusting parameters based on the existing reference current algorithm. The reference current algorithm can adjust peak current and power fluctuations. Based on the improved reference current algorithm, an active and reactive coordinate control strategy is proposed, the control strategy effectively solves the overcurrent problem under unbalanced voltage conditions, and expands the output active power of PV system. The simulation models in PSCAD/EMTDC are established to validate the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277069).

Key words: photovoltaic inverter, unbalanced fault; peak current; power fluctuation

0 引言

近年来, 随着污染问题的加剧, 风能、太阳能等清洁能源发展迅速, 在电网中占有比例越来越大, 光伏发电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^[1-2]。国家电网公司在《光伏电站接入电网技术规定》中要求光伏电站应避免在电网电

压异常时脱离, 引起电网电源的损失^[3], 即低电压穿越。在电网运行过程中, 不对称故障比对称故障更为频繁, 不对称故障中电压负序分量将导致光伏逆变器输出功率出现波动, 输出电流存在畸变, 电压幅值的降低也使得光伏逆变器输出电流峰值急剧增大, 故障过程中峰值电流可能达到电网电压对称时的数倍, 可能导致开关器件由于电流过大而出现故障甚至烧毁, 逆变器过流保护动作等事故发生, 导致光伏发电系统故障穿越失败, 严重影响光伏发

电系统的稳定性和可靠性。因此,需采取有效措施对不对称故障情况下光伏逆变器输出电流峰值进行控制。

目前对不对称故障条件下光伏逆变器的峰值电流的研究也逐渐深入^[4-20]。文献[4-8]主要对逆变器的功率控制进行研究。文献[9-10]提出了一种考虑输出电流峰值、功率波动以及谐波畸变率的协调控制策略,但是在减小输出电流峰值的同时并网电流波形出现了畸变;文献[11]基于灵活正负序控制(Flexible Positive and Negative Sequence Control, FPNSC),通过对输出电流向量图的分析来估计电流峰值,但并没有提出峰值电流的控制策略,同时FPNSC控制策略计算较为复杂。文献[12]提出了基于 dq 坐标系的输出峰值电流控制策略,但该控制策略结构较为复杂,不能够实现有功无功的灵活调节;文献[13-15]提出了抑制峰值电流的控制策略,但是故障情况下输出有功和无功功率减小;文献[16-17]提出了加入一个调节参数的控制策略,其限流策略能够保证输出电流峰值减小,但只能进行单个参数线性调节,调节范围有限,同时功率波动增大,文献[16]能够输出的有功功率减小。文献[18]所提出的参考电流算法能够连续调节输出功率波动和输出电流峰值,但其输出功率波动较大,控制复杂度较高。文献[19]提出了一种不对称故障条件下永磁直驱风机峰值电流抑制策略,该控制策略能够在电网发生不对称故障时将输出电流峰值抑制在允许范围内,但输出有功功率减小。文献[20]提出了一种消除有功振荡的改进低电压穿越方法,该方法能够保证故障条件下输出有功不出现振荡,提升并网正序电压,降低负序电压,但峰值电流变大,同时无功功率波动变大。

本文提出了一种不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略,有效减小了故障情况下逆变器输出峰值电流,拓展了故障时有功的输出能力,实现了有功和无功功率的灵活控制,避免了不对称故障条件下并网逆变器的过流问题。同时在PSCAD/EMTDC中建立仿真模型,验证了所提出控制策略的正确性和有效性。

1 光伏逆变器拓扑和数学模型

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。

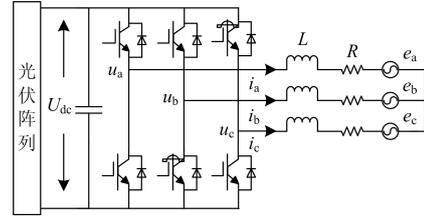


图1 光伏逆变器拓扑

Fig. 1 Topology of photovoltaic inverter

光伏逆变器数学模型可以表示为

$$u_i = Ri_i + L \frac{di_i}{dt} + e_i \quad (1)$$

式中: R 和 L 为光伏逆变器的电阻和电抗; e_i 为网侧电压; u_i 为逆变器侧电压;下标 i 代表 abc 三相。

经过Clarke变换后能够得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_\alpha = Ri_\alpha + L \frac{di_\alpha}{dt} + e_\alpha \\ u_\beta = Ri_\beta + L \frac{di_\beta}{dt} + e_\beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_α 、 u_β 分别为光伏逆变器输出电压在 $\alpha\beta$ 轴上的分量; i_α 、 i_β 分别为输出电流在 $\alpha\beta$ 轴上的分量; e_α 、 e_β 分别为电网电压在 $\alpha\beta$ 轴上的分量。

2 不对称故障条件下并网光伏逆变器控制策略

在对并网光伏逆变器拓扑结构以及数学模型进行分析的基础上,本节首先对不对称故障条件下逆变器峰值电流过大的机理进行分析,进而提出一种考虑输出电流峰值的光伏逆变器控制策略。

2.1 光伏逆变器峰值电流过大原理分析

由瞬时功率理论,光伏逆变器稳态时输出的有功功率和无功功率可以表示为

$$\begin{cases} p = 1.5(u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) \\ q = 1.5(u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta) \end{cases} \quad (3)$$

其中,不对称条件下 u_α 及 u_β 可以表示为

$$\begin{cases} u_\alpha = u_\alpha^+ + u_\alpha^- = U^+ \cos(\omega t + \delta^+) + U^- \cos(\omega t + \delta^-) \\ u_\beta = u_\beta^+ + u_\beta^- = U^+ \sin(\omega t + \delta^+) - U^- \sin(\omega t + \delta^-) \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_α^+ 和 u_β^+ 为 α 和 β 轴上正序电压分量; u_α^- 和 u_β^- 为 α 和 β 轴上负序电压分量; δ^+ 和 δ^- 分别为电压正负序分量的角度; U^+ 和 U^- 分别为正负序电压幅值。

$$\begin{cases} U^+ = \sqrt{(u_\alpha^+)^2 + (u_\beta^+)^2} \\ U^- = \sqrt{(u_\alpha^-)^2 + (u_\beta^-)^2} \end{cases} \quad (5)$$

对于逆变器输出电流,可以用有功电流和无功

电流的形式来表示。

$$\begin{cases} i_{\alpha_ref} = i_{\alpha_ref}(p) + i_{\alpha_ref}(q) \\ i_{\beta_ref} = i_{\beta_ref}(p) + i_{\beta_ref}(q) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i_{\alpha_ref}(p)$ 、 $i_{\beta_ref}(p)$ 为 α 和 β 轴上的有功电流;
 $i_{\alpha_ref}(q)$ 、 $i_{\beta_ref}(q)$ 为 α 和 β 轴上的无功电流。

《光伏电站接入电网技术规定》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)^[3], 因此一般光伏逆变器在稳态运行过程中都运行在单位功率因数下, 将无功功率 Q 设为 0, 由式(3)一式(6)可以得到

$$\begin{cases} i_{\alpha_ref} = i_{\alpha_ref}(p) = \frac{2}{3} \frac{u_{\alpha}^+}{(U^+)^2} P_{ref} \\ i_{\beta_ref} = i_{\beta_ref}(p) = \frac{2}{3} \frac{u_{\beta}^+}{(U^+)^2} P_{ref} \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_{ref} 为有功功率参考值。

由式(7)可以看出, 光伏发电系统在稳态运行过程中, 参考电流与正序电压有关。但当不对称故障发生时, 电网中存在负序分量, 同时正序电压下降, 而参考功率 P_{ref} 保持不变, 从而导致参考电流 i_{α_ref} 升高, 甚至可能出现远大于电网平衡时参考电流的现象, 导致逆变器由于电流过大而出现故障甚至烧毁, 逆变器过流保护动作等事故发生, 造成光伏发电系统的低电压穿越失败。

同时, 不对称故障情况下由于负序分量的存在, 导致逆变器输出有功和无功功率出现二倍频波动^[9-10], 同样也会影响直流电容电压的稳定性, 忽略逆变器以及 LCL 滤波器上的损耗, 直流电容平衡方程可以表示为

$$CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{pv} - P_{out} \quad (8)$$

式中: C 和 U_{dc} 为直流侧电容及电容电压; P_{pv} 为光伏阵列输出功率; P_{out} 为逆变器输出功率。在发生不对称故障时, P_{out} 中的二倍频波动将导致直流电压同样出现周期性波动, 影响逆变器控制的可靠性以及电容器的寿命。

2.2 消除有功波动的光伏逆变器输出电流参考值算法

在不对称电网电压条件下, 通过对网侧正、负序电流的控制可以实现不同的控制目标。常用的控制目标^[6,14,21]有: 1) 输出对称的三相电流(目标I), 即输出电流不含负序分量, 此时光伏逆变器可以输出三相对称电流, 但输出有功、无功含有很大的波动; 2) 输出恒定的无功功率(目标II), 消除输出无功功率的二倍频脉动, 此时光伏逆变器输出无功功率无波动, 但输出有功功率含有很大的波动, 输出电流含有负序分量; 3) 输出恒定的有功功率(目标III), 消除

输出有功功率的二倍频脉动, 此时光伏逆变器输出有功功率无波动, 但输出无功功率含有很大的波动, 输出电流含有负序分量。

考虑到有功功率波动对光伏系统的直流侧电压、最大功率点跟踪(Maximum Power Point tracking, MPPT)和系统的转换效率及整个系统的稳定性的影响, 输出功率的二倍频波动应该加以消除, 采用输出恒定的有功功率的策略(目标III), 此时可以得到 $\alpha\beta$ 坐标系下参考电流方程为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^+ \\ i_{\beta}^+ \\ i_{\alpha}^- \\ i_{\beta}^- \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ & u_{\beta}^+ & u_{\alpha}^- & u_{\beta}^- \\ u_{\beta}^+ & -u_{\alpha}^+ & u_{\beta}^- & -u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- & -u_{\alpha}^- & -u_{\beta}^+ & u_{\alpha}^+ \\ u_{\alpha}^- & u_{\beta}^- & u_{\alpha}^+ & u_{\beta}^+ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ 0 \\ 0 \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (9)$$

《光伏电站接入电网技术规定》中要求光伏电站接入电网故障期间应保持一定时间不脱网, 并为电网的稳定性提供支撑。考虑到发生不对称故障时光伏发电系统不仅需要进行有功功率的输出, 也需要提供一定的无功支撑, 同时考虑到输出电流峰值的大小, 在参考电流表达式中考虑无功功率的注入, 本文在目标III消除有功功率波动参考电流表达式^[22]中加入多个调节参数, 以抑制输出电流峰值, 拓展输出有功功率, 新的参考电流表达式为

$$\begin{cases} i_{\alpha}^*(p) = \frac{2}{3} m \frac{u_{\alpha}^+ - k_1 u_{\alpha}^-}{(U^+)^2 - k_1 (U^-)^2} P_{ref} \\ i_{\beta}^*(p) = \frac{2}{3} m \frac{u_{\beta}^+ - k_1 u_{\beta}^-}{(U^+)^2 - k_1 (U^-)^2} P_{ref} \\ i_{\alpha}^*(q) = \frac{2}{3} n \frac{u_{\beta}^+ + k_2 u_{\beta}^-}{(U^+)^2 + k_2 (U^-)^2} Q_{ref} \\ i_{\beta}^*(q) = -\frac{2}{3} n \frac{u_{\alpha}^+ + k_2 u_{\alpha}^-}{(U^+)^2 + k_2 (U^-)^2} Q_{ref} \end{cases} \quad (10)$$

式中, m 、 n 、 k_1 和 k_2 为调节参数, 其变化范围均为 $[0,1]$ 。对调节参数的调节能够调节输出电流峰值, 输出功率波动以及输出功率参考值。

经过反克拉克变换, 由式(10)可以得到此时三相电流幅值为

$$\begin{cases} i_a = \frac{2}{3} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos(\delta - \theta_1 - \theta_2)} \\ i_b = \frac{2}{3} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos(\delta - \theta_1 - \theta_2 - \frac{2}{3}\pi)} \\ i_c = \frac{2}{3} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos(\delta - \theta_1 - \theta_2 + \frac{2}{3}\pi)} \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{U^+} \sqrt{\left[\frac{mP_{\text{ref}}}{1-k_1\varepsilon^2}\right]^2 + \left[\frac{nQ_{\text{ref}}}{1+k_2\varepsilon^2}\right]^2} \\ A_2 = \frac{1}{U^+} \sqrt{\left[\frac{mk_1\varepsilon P_{\text{ref}}}{1-k_1\varepsilon^2}\right]^2 + \left[\frac{nk_2\varepsilon Q_{\text{ref}}}{1+k_2\varepsilon^2}\right]^2} \\ \theta_1 = a \tan \frac{nQ_{\text{ref}}[1-k_1\varepsilon^2]}{mP_{\text{ref}}[1+k_2\varepsilon^2]} \\ \theta_2 = a \tan \frac{nk_2Q_{\text{ref}}[1-k_1\varepsilon^2]}{mk_1P_{\text{ref}}[1+k_2\varepsilon^2]} \\ \delta = \delta^+ - \delta^- \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)可以得到此时并网电流最大值为

$$i_{\text{max}} = \frac{2}{3}(A_1 + A_2) = \frac{2}{3U^+} \left(\sqrt{\left(\frac{mP_{\text{ref}}}{1-k_1\varepsilon^2}\right)^2 + \left(\frac{nQ_{\text{ref}}}{1+k_2\varepsilon^2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{m\varepsilon k_1 P_{\text{ref}}}{1-k_1\varepsilon^2}\right)^2 + \left(\frac{n\varepsilon k_2 Q_{\text{ref}}}{1+k_2\varepsilon^2}\right)^2} \right) \quad (13)$$

式中, ε 为负序电压和正序电压的比值, $\varepsilon=U^-/U^+$ 。

由式(13)可以看出, 并网峰值电流和 m 、 n 、 k_1 、 k_2 四个调节参数以及输出有功功率 P 、无功功率 Q 、电压不平衡度 ε 有关。对调节参数 m 、 n 、 k_1 和 k_2 以及功率参考值的有效选取, 能够有效降低逆变器输出电流峰值。

2.3 考虑电流峰值和输出功率波动的光伏逆变器有功无功协调控制策略

对于不对称条件下采用式(10)得到的参考电流, 逆变器输出瞬时有功和无功功率同时可以表示为

$$\begin{cases} p = P^+ + P^- + \tilde{P} \\ q = Q^+ + Q^- + \tilde{Q} \end{cases} \quad (14)$$

式中: P^+ 和 Q^+ 分别为正序分量所产生有功和无功功率; P^- 和 Q^- 分别为负序分量所产生有功和无功功率, \tilde{P} 和 \tilde{Q} 分别为二倍频波动分量。

将式(3)一式(5)及式(10)代入(14), 可以将瞬时有功功率进行分解得到:

$$\begin{cases} P^+ = m \frac{(U^+)^2}{(U^+)^2 - k_1(U^-)^2} P_{\text{ref}} \\ P^- = m \frac{-k_1(U^-)^2}{(U^+)^2 - k_1(U^-)^2} P_{\text{ref}} \\ \tilde{P} = m \frac{(1-k_1)(U^+U^-) \cos(2\omega t)}{(U^+)^2 - k_1(U^-)^2} P_{\text{ref}} + \\ n \frac{(1-k_2)(U^+U^-) \sin(2\omega t)}{(U^+)^2 + k_2(U^-)^2} Q_{\text{ref}} \end{cases} \quad (15)$$

同样地, 可以将瞬时无功功率分解为

$$\begin{cases} Q^+ = n \frac{(U^+)^2}{(U^+)^2 + k_2(U^-)^2} Q_{\text{ref}} \\ Q^- = n \frac{k_2(U^-)^2}{(U^+)^2 + k_2(U^-)^2} Q_{\text{ref}} \\ \tilde{Q} = n \frac{(1+k_2)(U^+U^-) \cos(2\omega t)}{(U^+)^2 + k_2(U^-)^2} Q_{\text{ref}} - \\ m \frac{(1+k_1)(U^+U^-) \sin(2\omega t)}{(U^+)^2 - k_1(U^-)^2} P_{\text{ref}} \end{cases} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可以看出, 有功功率和无功功率均含有波动分量, 若令 $m=1$ 、 $n=1$, 此时 $P^+ + P^- = P_{\text{ref}}$, $Q^+ + Q^- = Q_{\text{ref}}$, 因此输出有功功率和无功功率能够准确跟随功率指令。当 $k_1=1$ 、 $k_2=1$ 时, 此时为消除有功功率波动的控制策略(目标 III), 调节 k_1 、 k_2 两个调节参数不会改变关系式 $P^+ + P^- = P_{\text{ref}}$, 同样也不会改变 $Q^+ + Q^- = Q_{\text{ref}}$, 但是会改变输出电流峰值, 也会改变有功和无功功率波动。

当对 m 和 n 进行调节时, 不考虑功率波动, 此时的输出功率指令将变为

$$\begin{cases} p = mP_{\text{ref}} \\ q = nQ_{\text{ref}} \end{cases} \quad (17)$$

可以看出调节 m 和 n 参数能够对功率指令进行调节, 降低输出有功功率和无功功率。此时根据式(13)可以看出, 由于调节 m 和 n 参数降低了输出功率, 因此峰值电流同样也会降低。

目前《光伏电站接入电网技术规定》中虽然要求光伏电站在电网故障时保持一定时间不脱网, 同时能够向电网提供一定的无功支撑, 但是并没有对中压及分布式光伏发电系统的无功能力进行明确的要求。目前国外只有德国对接入电网的中压等光伏系统的无功支撑能力提出了明确的要求^[23]: 当故障发生时, 若正序电压低于 0.9 p.u., 正序电压每跌落 1%, 需要提供 2% 的无功电流; 若正序电压跌落在 0.9~1 p.u. 之间, 则不需要提供无功。在光伏电站的不脱网运行过程中, 首先需要按照并网准则要求发出相应的无功, 在保证无功功率输出的基础上, 在逆变器允许范围内发出最大有功电流^[24]。

基于前面所提出的参考电流算法以及对并网准则等的分析, 本文提出如下的不对称故障时考虑并网峰值电流和输出功率波动的光伏逆变器有功无功协调控制策略:

(1) 不对称故障发生时, 若不对称故障程度较轻, 正序电压跌落至 0.9~1 p.u. 之间, 此时逆变器继续保持单位功率因数运行。若此时输出电流超过设

定的最大电流 I_{\max} , 则对两个调节参数 k_1 、 k_2 进行调节, 保证输出电流在允许最大电流范围内。

(2) 若正序电压跌落至 0.9 p.u. 以下, 此时光伏电站按照上述对接入电网的光伏电站的无功支撑能力的要求确定无功功率, 同时按照额定容量运行。此时继续调节 k_1 、 k_2 两个参数, 以保证输出电流峰值在允许范围内。对 k_1 、 k_2 两个参数的调节能够保证较高的有功功率输出。

(3) 不对称故障较严重导致电压跌落较深, 若此时对 k_1 、 k_2 两个参数的调节已经不能保证输出电流峰值小于设定最大电流 I_{\max} 的条件, 由于电压跌落较深情况下不平衡度较高, 此时对 k_1 、 k_2 的调节将会导致输出功率出现较大波动, 对直流电压稳定性有较大影响^[10,22], 因此设定 $k_1=1$, $k_2=1$, 即仍然保证消除有功功率波动(目标 III), 同时调节 m 和 n 参数减小输出功率, 调节原则为首先保证无功功率输出, 若此时峰值电流未达到设定最大电流, 还有容量进行有功功率输出时, 则以最大峰值电流为设定条件, 即按照式(13)计算得出能够输出的有功功率。此时可以得到逆变器输出有功功率为

$$P_{\text{ref}} = \frac{1-\varepsilon^2}{m} \sqrt{\left(\frac{3U^+ I_{\max}}{2(1+\varepsilon)}\right)^2 - \left(\frac{nQ_{\text{ref}}}{1+\varepsilon^2}\right)^2} \quad (18)$$

调节 k_1 、 k_2 两个参数虽然能够降低输出电流峰值, 但是此时将会增大有功功率波动, 同时也会改变无功功率波动。考虑到参数的有效选取以保证有功功率波动最小, 同时还考虑到实际电网中对实时性的要求, 因此在 k_1 、 k_2 两个参数的调节过程中可以采用基于查表法建立调节参数表的方式, 在不同电压不平衡度等条件限制下经过计算得到调节参数, 在实际故障条件下能够迅速获得参数数值, 以保证实时性的要求。

根据并网准则, 可以得出逆变器所需要输出的无功功率对应的无功电流为

$$i_{q_ref} = \begin{cases} 0 & U^+ > 0.9 \text{ p.u.} \\ 2(1-U^+) & U^+ < 0.9 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (19)$$

同时由于 $P_{\text{ref}} = \sqrt{S^2 - Q_{\text{ref}}^2}$, 逆变器所能够输出的有功功率同样可以确定, 因此在逆变器容量及逆变器允许最大电流确定的条件下, 逆变器输出无功和有功均和电网正负序电压有关, 因此采用查表法只需要建立 k_1 、 k_2 两个参数与正负序电压的关系表即可。

光伏逆变器输出有功功率波动可以表示为

$$\tilde{P} = \sqrt{\left[\frac{(1-k_1)(U^+U^-)}{(U^+)^2 - k_1(U^-)^2} P_{\text{ref}}\right]^2 + \left[\frac{(1-k_2)(U^+U^-)}{(U^+)^2 + k_2(U^-)^2} Q_{\text{ref}}\right]^2} \quad (20)$$

在建立关系表的过程中, 可以采用改进粒子群算法(Improved Particle Swarm Optimization, IPSO), 在保证输出电流在允许最大电流范围内的约束条件下, 其有功功率波动保持最小。即 IPSO 算法目标为 $f(\tilde{P})_{\min}$ 最小。改进粒子群算法具有较快的收敛速度和较高的精度, 能够以较快的速度搜索得到目标。

IPSO 算法的约束条件为

$$I_{\text{pv}} \leq I_{\max} \quad (21)$$

式中: I_{pv} 为逆变器输出电流; I_{\max} 为逆变器允许输出的最大电流。

本文所提出的考虑峰值电流和功率波动的有功无功协调控制策略流程图如图 2 所示。

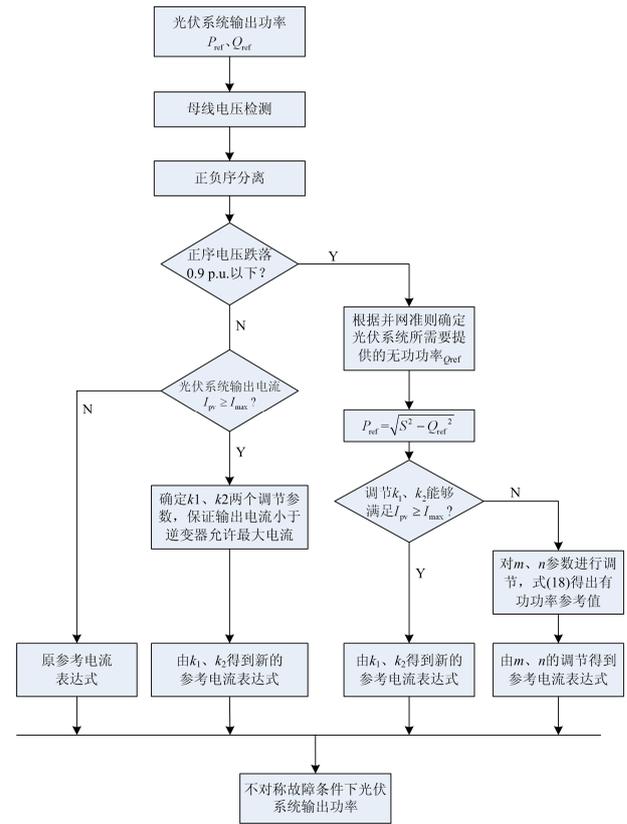


图 2 控制策略流程图

Fig. 2 Flow diagram of proposed control strategy

3 光伏发电系统模型建立

光伏逆变器采用三相三桥臂结构, 从网侧提取出正负序电压分量, 在经过计算后得出 k_1 、 k_2 、 m 及 n 的参数整定值, 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 $\pm\omega_0$ 上的信号具有无限增益, 能够实现正增量无静差控制^[25-29], 因此本文在 $\alpha\beta$ 坐标系下采用 PR 控制器控制注入电流, 经过调制后得出三相参考电流, 谐振

频率 ω_0 为 314, 光伏发电系统控制框图如图 3 所示。

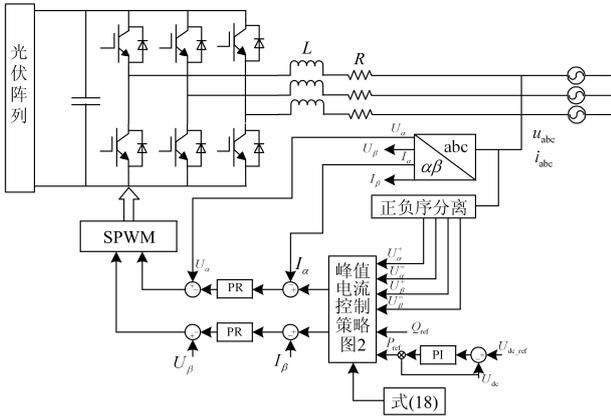


图 3 光伏系统控制框图

Fig. 3 Control diagram of PV system

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 $\alpha\beta$ 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_{ref} 和 Q_{ref} 为逆变器有功和无功功率参考值, 经过参考电流计算后得到 $\alpha\beta$ 坐标系下参考电流, 再经过 PR 控制器以及调制后得出开关信号。

4 仿真分析

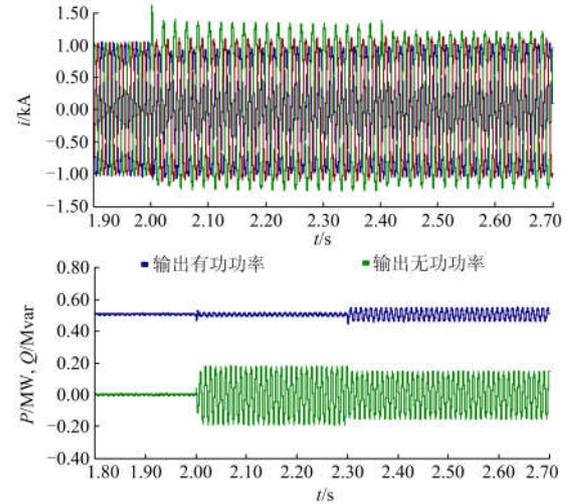
在 PSCAD/EMTDC 中建立图 1 所示的光伏发电系统仿真模型, 其控制策略如图 2 所示, 表 1 所示的是光伏发电系统仿真参数。

表 1 光伏逆变器仿真系统参数

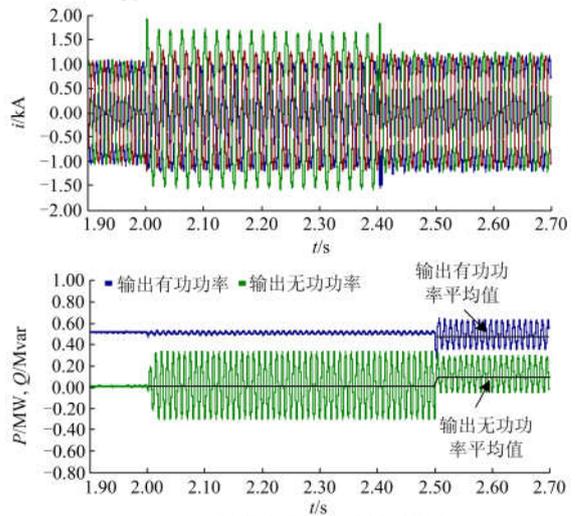
Table 1 Simulation parameters of photovoltaic inverter system

参数及单位	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
网侧滤波电感 L/mH	1
开关频率 f/kHz	6

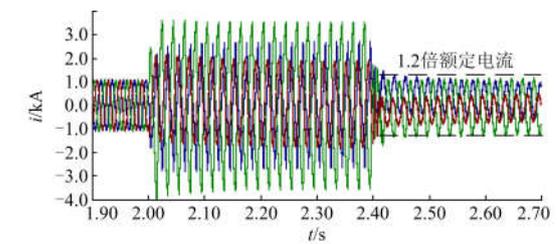
稳态情况下光伏发电系统按照单位功率因数运行, 光伏系统 MPPT 控制采用扰动观察法。在 $t=2s$ 时发生不对称故障, 此时有功功率设为额定功率 0.5 MW, 无功功率设为 0, 光伏发电系统输出三相对称电流。不对称故障发生时, 光伏系统停止采用 MPPT 控制, 采用故障时有功无功协调控制策略。《光伏电站接入电网技术规定》中要求光伏电站具备一定的过电流能力, 设定光伏逆变器所允许的最大电流峰值 I_{max} 为 1.2 倍额定电流。图 4 显示的是电压跌落程度不同情况下逆变器并网电流及输出有功、无功功率波形图。



(a) 电压跌落较浅, 不平衡度 ϵ 为 0.18 时仿真波形



(b) 不平衡度 ϵ 为 0.3 时仿真波形



(c) 电压跌落较深, 不平衡度 ϵ 为 0.6 时仿真波形

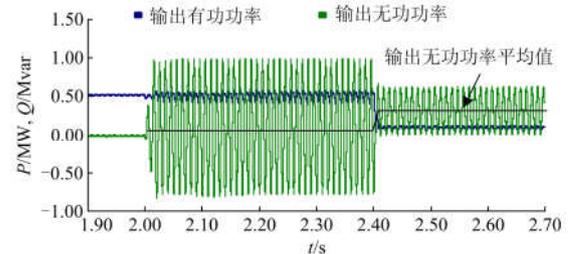


图 4 电压跌落程度不同条件下光伏发电系统输出波形
Fig. 4 Output waveforms of PV system under different voltage sags

图4中光伏逆变器2s前一直运行在单位功率因数状态,2s时发生不对称故障,2.4s时采用峰值电流控制策略。图4(a)中电压不平衡度 $\varepsilon=0.18$,此时正序电压为0.95 p.u.,因此逆变器不需要提供无功功率,仍然为单位功率因数运行。但此时输出峰值电流约为原来的1.3倍,采用式(13)算出峰值电流理论值为原来的1.28倍,二者基本一致。由于峰值电流超出允许最大电流,因此需要对 k_1 、 k_2 两个参数进行调节。在有功功率波动最小情况下 $k_1=0.645$, $k_2=0$,此时能够保证峰值电流在允许最大电流范围内,同时保证输出有功功率波动最小。可以看出此时峰值电流约为额定电流的1.2倍,理论计算值为1.19倍额定电流。由功率输出波形图可以看出,2~2.4s时输出有功功率无波动,无功功率波动较大,2.4s后有功功率波动增加,无功功率波动较原来减小。

图4(b)中电压不平衡度 $\varepsilon=0.3$,此时正序电压为0.887 p.u.,根据并网准则逆变器需要提供0.226 p.u.的无功,即有功功率为0.487 MW,无功功率为0.113 Mvar,保证额定容量输出。由图4(b)可以看出,此时输出峰值电流约为额定电流的1.6倍,采用式(13)算出峰值电流为原来的1.61倍,有功功率波动最小情况下参数数值为 $k_1=0.163$, $k_2=0.264$,2.4s后可以看出此时峰值电流约为额定电流的1.2倍,理论计算值为1.19倍额定电流。由输出功率波形同样可以看出有功功率波动2.4s后增加,而无功功率波动2.4s后减小。

图4(c)中电压不平衡度 $\varepsilon=0.6$,此时电压跌落程度较深,输出峰值电流约为3.6倍额定电流,采用式(13)算出峰值电流为原来的3.6倍,远远超出所允许的最大电流。采用调节 k_1 、 k_2 两个参数的方法已经不能保证输出峰值电流在 I_{\max} 之内。此时正序电压为0.688 p.u.,输出0.624 p.u.的无功,经过计算后得到此时保证输出电流在 I_{\max} 之内条件下能够输出有功功率为0.15 p.u.,即输出无功 $Q=0.312$ Mvar,输出有功 $P=0.0725$ MW,采用峰值电流控制策略后可以看出输出电流峰值约为1.2倍额定电流,满足并网要求。从输出功率波形来看,若不采用本文所提出的有功无功协调控制策略,输出电流峰值很大,输出无功功率波动较大,而采用有功无功协调控制策略情况下有功功率基本无波动,输出无功功率波动减小,输出电流峰值能够保证在允许最大峰值电流内。仿真结果和理论计算结果一致。

以电压不平衡度 $\varepsilon=0.3$ 为例,文献[14]中输出有功功率为0.41 MW,限制峰值电流为1.5倍额定电流;本文提出的峰值电流控制策略输出有功功率为

0.487 MW,限制峰值电流为1.2倍额定电流,在拓展了功率输出能力的同时能够严格按照并网要求进行输出。

5 结论

针对光伏发电系统在不对称故障条件下出现的峰值电流过大的问题,本文提出一种综合考虑功率输出、有功波动以及输出峰值电流的改进控制策略,通过引入多个调节参数以及有功和无功功率的合理调节来实现对输出峰值电流的控制,拓展了功率输出的能力,同时提出了调节参数的确定原则。仿真结果和理论计算结果一致,所提出的控制策略能够保证光伏发电系统的并网要求。

参考文献

- [1] 戚永志,刘玉田.风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J].电工技术学报,2014,29(8):265-273.
QI Yongzhi, LIU Yutian. Output power rolling optimization and real-time control in wind-photovoltaic-storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 265-273.
- [2] 张顺,葛智平,郭涛,等.大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(1):106-110.
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [3] 光伏电站接入电网技术规定:Q/GDW 617—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [4] 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.
- [5] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V, 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.
- [6] 郭小强,张学,卢志刚,等.不平衡电网电压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.
GUO Xiaoqiang, ZHANG Xue, LU Zhigang, et al. Coordinate control of power and current quality for grid-connected PV inverters under unbalanced grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 346-353.

- [7] WANG F, DUARTE J, HENDRIX M, et al. 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.
- [8] 郭小强, 邬伟扬, 漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(3): 22-28.
GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(3): 22-28.
- [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] 王强钢, 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(增刊 1): 30-37.
WANG Qianggang, ZHOU Niancheng, YAN Wei, et al. Improved power control of photovoltaic generation system under unbalanced grid voltage conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(S1): 30-37.
- [11] REMUS T, MARCO L, PEDRO R. Grid converters for photovoltaic and wind power system[M]. New York: Wiley & Sons Press, 2011: 237-238.
- [12] LEE C, HSU C, CHENG P. 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.
- [13] 刘伟增, 周洪伟, 张磊, 等. 电网不平衡条件下光伏并网控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(4): 647-652.
LIU Weizeng, ZHOU Hongwei, ZHANG Lei, et al. Study on control strategy of grid-connected PV inverter under unbalanced grid conditions[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2013, 34(4): 647-652.
- [14] 谭骞, 徐永海, 黄浩, 等. 不对称电压暂降情况下光伏逆变器输出电流峰值的控制策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(3): 601-608.
TAN Qian, XU Yonghai, HUANG Hao, et al. A control strategy for peak output current of PV inverter under unbalanced voltage sags[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(3): 601-608.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 姜卫东, 王永生, 黄辉, 等. 电网不对称时考虑相电流限制的 PWM 整流器协调控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(22): 6220-6230.
JIANG Weidong, WANG Yongsheng, HUANG Hui, et al. Coordinated instantaneous active power control for PWM rectifier under grid voltage dips considering the limitation of phase current[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(22): 6220-6230.
- [18] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Active and reactive power strategies with peak current limitation for distributed generation inverters during unbalanced grid faults[J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2015, 62(3): 1515-1525.
- [19] NASIRI M, MOHAMMODI R. Peak current limitation for grid side inverter by limited active power in PMSG-based wind turbines during different grid faults[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(1): 3-12.
- [20] 漆汉宏, 王晓娜, 魏艳君. 消除有功振荡的改进低电压穿越方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(1): 416-423.
QI Hanhong, WANG Xiaona, WEI Yanjun. An improved LVRT method for eliminating active oscillation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(1): 416-423.
- [21] CHONG H, LI R, BUMBY J. Unbalanced-grid-fault ride-through control for a wind turbine inverter[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, 44(3): 845-856.
- [22] 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 Industry Electronics*, 2013, 60(4): 1429-1441.
- [23] Bundesverband der Energie -und Wasserwir -tschaft e.V. Generating plants connected to the medium-voltage network (guideline for generating plants' connection to and parallel operation with the medium-voltage network)[R]. Berlin: BDEW, 2007.

- [24] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [25] 于月森, 年长春, 解光庆, 等. 负载不对称三相串联谐振逆变器电流平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 49-53.
YU Yuesen, NIAN Changchun, XIE Guangqing, et al. Current control strategy of three-phase series resonant inverter under unbalanced load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 49-53.
- [26] 张芳, 李静远, 李传栋. 含 VSC-HVDC 交直流混合系统机电暂态仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 17-24.
ZHANG Fang, LI Jingyuan, LI Chuandong. Electromechanical transient simulation of AC-DC hybrid systems containing VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 17-24.
- [27] 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.
HUANG Hao, XU Yonghai, YANG Lin, et al. A control strategy of photovoltaic inverter under unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1277-1282.
- [28] 屈克庆, 李文旗, 赵晋芳, 等. 孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 8-14.
QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinfang, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 8-14.
- [29] 丁凯, 陈章妍, 黄萌, 等. 阻感性负载下单相离网逆变器稳定性分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 80-86.
DING Kai, CHEN Zhangyan, HUANG Meng, et al. Stability analysis and control of single-phase off-grid inverters with inductive loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 80-86.

收稿日期: 2017-08-10; 修回日期: 2017-10-29

作者简介:

杨超颖(1984—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源并网技术, 电能质量; E-mail: ycy629@126.com

曹炜(1992—), 男, 通信作者, 硕士生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。E-mail: caoweicolin@sina.cn

(编辑 葛艳娜)