

考虑电压故障类型的光伏逆变器低电压穿越控制策略

欧阳森, 马文杰

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:在传统光伏逆变器低电压穿越(LVRT)控制技术的基础上,提出一种根据电压故障类型进行无功功率输出的可实现柔性电压支撑的 LVRT 控制策略。基于瞬时功率理论,对 $\alpha\beta$ 坐标系下的功率、电流关系进行了分析;基于上述理论分析,提出一种基于电压正、负序分量加权分配的无功补偿策略,该策略根据不同的电压故障类型,通过调整分配因子生成相应的无功电流参考指令来实现提升三相电压有效值、降低公共点电压三相不平衡度等目标的电压支撑功能;在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上进行了三相对称故障、单相短路接地故障和两相短路接地故障的仿真实验,仿真结果验证了所提策略的正确性。

关键词:光伏;低电压穿越;逆变器;无功支撑;故障类型;控制策略

中图分类号:TM 615;TM 464

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.004

0 引言

为应对能源危机问题,各种可再生能源在电力系统中所占的比例越来越大^[1-2]。其中,光伏并网发电技术一直为关注的焦点。随着分布式光伏发电单元数量的增多,为保证电力系统的电能质量和供电可靠性,相关标准均要求光伏逆变器具备一定的低电压穿越(LVRT)能力。因此,进行光伏逆变器的 LVRT 控制策略研究具有重要的实际意义^[3]。

文献[4]针对大功率单级式光伏逆变器,提出了基于正、负序双同步坐标系的以抑制网侧负序电流为控制目标的 LVRT 控制策略。该策略能在保证故障期间并网电流波形品质的前提下,实现有功、无功电流的独立控制,为系统提供电压支撑。但是,该策略中需要 4 个电流 PI 控制器,整定控制参数较为困难。根据逆变器的详细数学模型,推导全电压前馈补偿项,文献[5]提出一种基于全电压前馈的 LVRT 控制策略,可有效应对 LVRT 期间的过电流和谐波问题。为加快故障期间光伏逆变器输出电流响应的速度,文献[6]在传统 LVRT 控制策略的基础上,将基于模型电流预测控制的方法运用到单级式光伏逆变器的 LVRT 控制中,可实现有功、无功功率的快速控制。针对两级式光伏逆变器 LVRT 问题,文献[7-8]分别提出基于超级电容和直流侧卸荷电路的 LVRT 控制策略。通过增加额外的硬件设备来实现 LVRT 期间交、直流侧有功功率的平衡,达到稳定直流母线电压和防止逆变器过电流的目的。但是,硬件电路的引入会增加系统体积,导致安装不方便、成本上升等问题。为此,文献[9]从软件层面提出变功率跟踪轨迹的光伏逆变器 LVRT 控制策略。

该策略通过对功率跟踪轨迹进行调节,实时改变光伏电池端电压,进而快速有效地控制光伏电池的输出功率,实现交、直流侧的有功平衡。在保证发生故障时光伏逆变器不脱网运行的前提条件下,为提升 LVRT 期间光伏逆变器的并网电能质量,文献[10]针对有功功率提出一种基于快速电流控制器和可重构参考电流选择器的灵活有功控制策略。类似地,文献[11]针对无功功率的控制也做出了相应的研究。更进一步地,为灵活调整故障期间并网有功、无功功率中正、负序分量的占比,文献[12]提出一种基于功率加权分配的 LVRT 控制策略。文献[13]提出一种基于正、负序电压加权分配的无功控制策略,可提升光伏逆变器应对不同类型电压故障的能力,但文献[13]并未对策略中有功、无功功率指令的计算方法进行讨论。文献[14]借鉴文献[13]提出的电流指令计算方法,提出一种以有功功率输出最大化为目标且兼顾有功功率波动抑制功能的故障穿越控制策略。

上述大部分文献所提策略均能实现发生低压故障时光伏逆变器的不脱网运行,且考虑了对系统的无功支撑。但是所提的无功补偿策略并没有针对具体的电压故障类型进行设计。因此,本文在文献[13-15]的研究基础上,提出一种基于电压正、负序分量加权分配的无功支撑策略,并以优先输出无功功率为原则设计了相应的功率指令计算方法,可提升光伏逆变器应对不同类型电压故障的 LVRT 能力,通过仿真验证本文所设计策略的有效性。

1 光伏逆变器的 LVRT 要求

根据 NB/T 32004—2013《光伏发电并网逆变器技术规范》要求,当电网电压跌落至图 1 中的曲线 1 以下时,光伏逆变器可以从电网切除,图中光伏并网点(PCC)电压为标幺值。在 LVRT 期间,光伏逆变器的并网运行需要满足:在电压跌落瞬间,光伏逆变

收稿日期:2018-02-12;修回日期:2018-07-23

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2016A030313476)
Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2016A030313476)

器在保证自身安全的前提下应能不间断并网运行；在 LVRT 期间，光伏逆变器应能对电网提供一定的无功支撑。

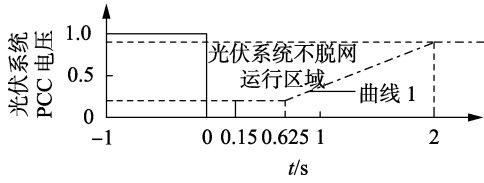


图 1 光伏电站的 LVRT 能力要求

Fig.1 LVRT capacity requirement of photovoltaic power station

2 具备柔性电压支撑能力的 LVRT 控制策略

2.1 电流指令计算方法

根据瞬时无功功率理论，为实现光伏逆变器的并网功率控制，在不平衡电网下的电流指令为^[16]：

$$\begin{cases} i_{\alpha}^* = \frac{2}{3} \frac{P^*(v_{\alpha}^+ + v_{\alpha}^-) + Q^*(v_{\beta}^+ + v_{\beta}^-)}{(v_{\alpha}^+ + v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^+ + v_{\beta}^-)^2} \\ i_{\beta}^* = \frac{2}{3} \frac{P^*(v_{\beta}^+ + v_{\beta}^-) - Q^*(v_{\alpha}^+ + v_{\alpha}^-)}{(v_{\alpha}^+ + v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^+ + v_{\beta}^-)^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中， P^* 、 Q^* 为给定的功率指令； i_{α}^* 、 i_{β}^* 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流指令； v_{α} 、 v_{β} 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的逆变器并网电压分量；上标“+”、“-”分别表示相应物理量的正序和负序分量。

根据对称分量法，式(1)中的分母部分为：

$$(v_{\alpha}^+ + v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^+ + v_{\beta}^-)^2 = (V^+)^2 + (V^-)^2 - 2V^+V^-\cos(2\omega t + \varphi^+ - \varphi^-) \quad (2)$$

其中， V 为 PCC 电压幅值； ω 为电压基频； φ 为电压相位。

由于式(2)中存在 2 倍频分量，为实现并网恒功率控制而按照式(1)进行电流指令计算，则会导致并网电流中含较多的谐波分量。根据文献[17]，由于光伏发电系统中不存在机械旋转部分，因此由电网负序电压所引起的直流母线电压波动并不会影响系统的正常运行。从而，以保证电流波形质量为目标，而不抑制并网功率波动，产生另一种电流指令计算方法如下：

$$\begin{cases} i_{\alpha}^* = \frac{2}{3} \frac{P^*(v_{\alpha}^+ + v_{\alpha}^-) + Q^*(v_{\beta}^+ + v_{\beta}^-)}{(V^+)^2 + (V^-)^2} \\ i_{\beta}^* = \frac{2}{3} \frac{P^*(v_{\beta}^+ + v_{\beta}^-) - Q^*(v_{\alpha}^+ + v_{\alpha}^-)}{(V^+)^2 + (V^-)^2} \end{cases} \quad (3)$$

为控制光伏逆变器实现不同类型电压故障下的柔性电压支撑，本文提出一种基于正、负序电压分量加权分配的无功电流指令计算方法如下：

$$\begin{cases} i_{\alpha(q)}^* = \frac{2}{3} Q^* \frac{k^+ v_{\beta}^+ + k^- v_{\beta}^-}{k^+ (V^+)^2 + k^- (V^-)^2} \\ i_{\beta(q)}^* = \frac{2}{3} Q^* \frac{-k^+ v_{\alpha}^+ - k^- v_{\alpha}^-}{k^+ (V^+)^2 + k^- (V^-)^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中， k^+ 、 k^- 为加权分配因子。两者关系如下：

$$k^+ + k^- = 1 \quad k^+ \in (0, 1) \quad (5)$$

在 LVRT 期间，有功电流需根据电压跌落深度来设定，在跌落深度较深时可设置为 0^[9]。且由于线路电阻一般较小，其对电网电压的支撑作用并不明显，故本文在计算有功电流指令时只考虑电网电压正序分量，具体计算公式如下：

$$\begin{cases} i_{\alpha(p)}^* = \frac{2}{3} P^* \frac{v_{\alpha}^+}{(V^+)^2} \\ i_{\beta(p)}^* = \frac{2}{3} P^* \frac{v_{\beta}^+}{(V^+)^2} \end{cases} \quad (6)$$

综上，总电流指令为：

$$\begin{cases} i_{\alpha}^* = i_{\alpha(p)}^* + i_{\alpha(q)}^* \\ i_{\beta}^* = i_{\beta(p)}^* + i_{\beta(q)}^* \end{cases} \quad (7)$$

对比式(7)与式(1)、(3)可知，在各种类型的电压故障情况下，传统 LVRT 控制策略中的无功电流指令计算方式都是固定不变的，而本文策略中可通过调整分配因子大小来改变无功电流中所含正、负序分量的比重。

2.2 电压无功支撑原理分析

光伏逆变器的并网系统示意图如图 2 所示。图中， i 为逆变器并网电流瞬时值； v 为 PCC 电压瞬时值； v_{dc} 为直流母线电压。为分析光伏逆变器的无功输出电流对 PCC 电压的支撑作用，可将 PCC 电压表示如下：

$$\begin{cases} v_{\alpha} = v_{g\alpha} + L_g \frac{di_{\alpha}}{dt} \\ v_{\beta} = v_{g\beta} + L_g \frac{di_{\beta}}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

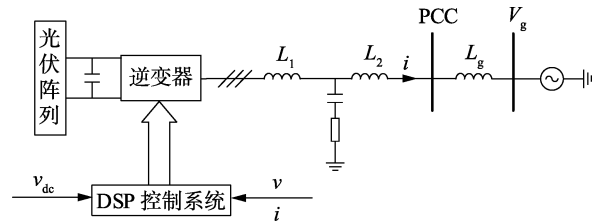


图 2 光伏并网系统

Fig.2 Photovoltaic grid-connected system

当忽略线路电阻时，若按照式(4)计算无功电流指令，可得电压相量图如图 3 所示。根据图 3 可得 PCC 电压正、负序分量的计算公式如下：

$$\begin{cases} V^+ = V_g^+ + \frac{2}{3} Q^* \frac{\omega L_g k^+ V^+}{k^+ (V^+)^2 + k^- (V^-)^2} \\ V^- = V_g^- - \frac{2}{3} Q^* \frac{\omega L_g k^- V^-}{k^+ (V^+)^2 + k^- (V^-)^2} \end{cases} \quad (9)$$

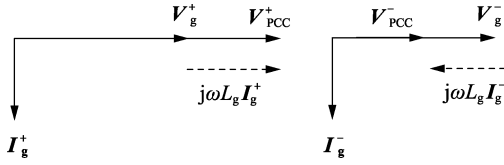


图 3 正、负序电压相量图

Fig.3 Phasor graph of positive- and negative-sequence voltage

分析式(9)可知,当设定因子 $k^+ \rightarrow 1$ 时,可提升 PCC 电压正序分量幅值,而电压负序分量幅值基本保持不变;当设定 $k^+ \rightarrow 0$ 时,可减小 PCC 电压负序分量幅值,而电压正序分量幅值基本保持不变。

2.3 功率指令计算方法

为保证光伏逆变器的正常运行,其输出电流应小于其最大允许值。设逆变器的实际输出电流可基本跟随指令,根据本文策略中电流计算公式(式(7)),可得到 LVRT 期间光伏逆变器的三相输出电流如下:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(4)、(6)代入式(10),可得各相电流峰值为:

$$\begin{cases} i_{amax} = \sqrt{(xP^*)^2 + (yQ^*)^2} \\ i_{bmax} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sqrt{3}zQ^* - xP^*)^2 + (\sqrt{3}xP^* - yQ^*)^2} \\ i_{cmax} = \frac{1}{2} \sqrt{(xP^* + \sqrt{3}zQ^*)^2 + (yQ^* + \sqrt{3}xP^*)^2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} x = \frac{2}{3} \frac{1}{V^+} \\ y = \frac{2}{3} \frac{k^+ V^+ - k^- V^-}{k^+ (V^+)^2 + k^- (V^-)^2} \\ z = \frac{2}{3} \frac{-k^+ V^+ - k^- V^-}{k^+ (V^+)^2 + k^- (V^-)^2} \end{cases} \quad (12)$$

根据文献[18],本文定义电压跌落深度 D 如下:

$$D = 1 - V_{\min} / V_N \quad (13)$$

$$V_{\min} = \min(V_a, V_b, V_c)$$

其中, V_a, V_b, V_c 为电网三相电压有效值; V_N 为 PCC 电压额定值。当 $D < 0.1$ 时,光伏逆变器正常运行;一旦检测到 $D > 0.1$,光伏逆变器即进入故障穿越模式。

根据式(11)可知,故障情况下因逆变器电流容量受限,功率指令 P^* 和 Q^* 不能过大。本文策略中对 P^* 和 Q^* 的分配关系如下:

$$\begin{cases} Q^* = DS \\ P^* = S - Q^* = (1-D)S \end{cases} \quad (14)$$

为保证逆变器不过流,则应有 $i_{mmax} \leq 1.1 \times \sqrt{2} I_N$ ($m \in \{a, b, c\}$)。因此,可将式(14)代入式(11)中计算得到 S 的 3 个极限值,选择三者中的最小值作为 S 的最终取值。

2.4 LVRT 控制综合策略

当电网侧发生故障时,在 LVRT 期间,控制光伏逆变器向电网注入无功功率可达到提升 PCC 电压的效果。根据 2.2 节分析可知,当设定因子 $k^+ \rightarrow 1$ 时,可提升三相电压有效值,若发生单相接地短路等不对称故障,采取此方法将导致各相电压有效值之间的差异增大,有可能导致未发生故障的一相或两相的电压越限,因此,宜在发生三相对称故障时设定 $k^+ = 1$ 。当设定因子 $k^+ \rightarrow 0$ 时,逆变器的并网无功电流主要为负序分量,可减小 PCC 电压的负序分量幅值。因此,当发生不对称故障时,设定因子 $k^+ = 0.1$ 可取得较大程度的三相电压不平衡补偿效果。因此,通过调整分配因子 k^+ 的值即可取得不同的电压支撑效果。

综上,采用本文所设计的基于正、负序电压分量加权分配可实现柔性电压支撑的 LVRT 控制策略的光伏并网控制系统示意图如图 4 所示。需要指出的是,本文所提 LVRT 控制策略在强电网和弱电网中均能在故障期间为系统提供电压支撑。但是,本文策略在强电网环境下所能取得的电压支撑效果较弱,在弱电网环境下更具实际意义,且策略效果还与光伏逆变器的容量相关。

3 仿真实验

本文基于 PSCAD 仿真平台对额定容量为 100 kW 的单级式光伏逆变器进行了当电网侧(图 4 中 V_g 位置)发生三相对称故障、单相短路接地故障和两相短路接地故障的仿真研究,以验证本文所设计策略的有效性,在各个仿真研究中均采用电压前馈来抑制故障瞬间的电流冲击。具体仿真参数如下: PCC 电压频率为 50 Hz,额定有效值为 220 V;光伏逆变器的额定输出电流有效值为 155.6 A;滤波器桥臂侧电感 $L_1 = 0.17$ mH,滤波电容 $C = 200$ μ F,网侧电感 $L_2 = 0.05$ mH;直流侧母线电容为 6 000 μ F;开关频率为 5 kHz;电网线路电阻为 0.001 Ω ,电感为 0.5 mH。

3.1 对称故障下的仿真分析

电网侧在 0.3 s 时发生三相对称故障,在 0.3 ~ 0.4 s 内光伏逆变器只输出有功功率,在 0.4 s 后设定 $k^+ = 1$,输出无功功率,仿真结果如图 5 所示。

分析图 5 可知,故障发生后 PCC 电压有效值跌落至 66 V 左右,光伏逆变器的输出电流有所增大,

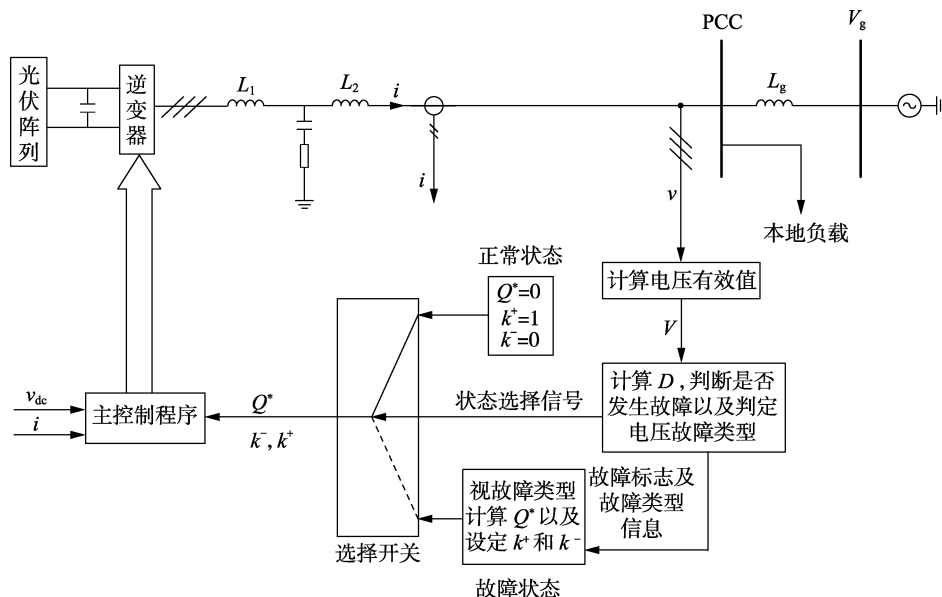


图 4 光伏并网控制系统

Fig.4 Photovoltaic grid-connected control system

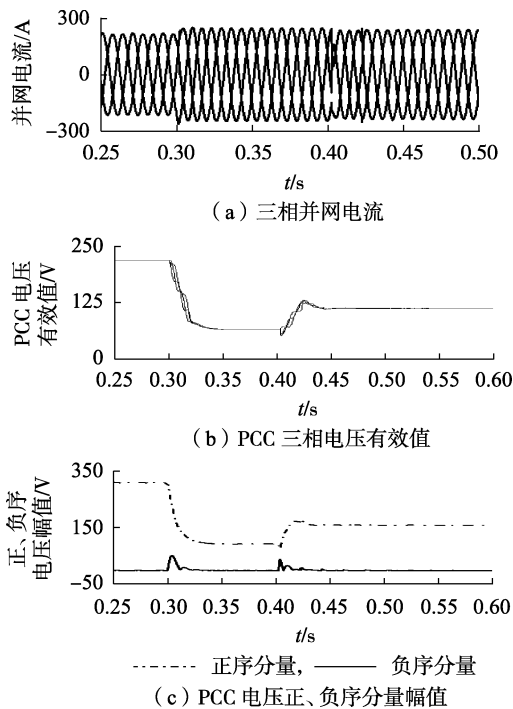


图 5 对称故障下的仿真结果

Fig.5 Simulative results under symmetrical fault

最大值约为 235 A, 小于最大允许电流 240 A。在控制光伏逆变器进行无功输出后, PCC 电压有效值抬升至 113 V 左右。

3.2 不对称故障下的仿真分析

为对比 k^+ 取不同值时的策略效果, 以 0.1 s 为一个阶段, 分 3 个阶段进行仿真, 具体条件设定如下: 电网侧在 0.3 s 时发生 a 相接地短路故障, 在 0.3~0.4 s 内光伏逆变器只输出有功功率, 0.4 s 后输出无功功率。在 0.4~0.5 s 内设定 $k^+ = 0.9$, 0.5~0.6 s 内设定 $k^+ = 0.1$ 。

为衡量 PCC 电压不平衡程度, 定义变量 n 为:

$$n = V^- / V^+ \quad (15)$$

具体仿真结果如图 6 所示。

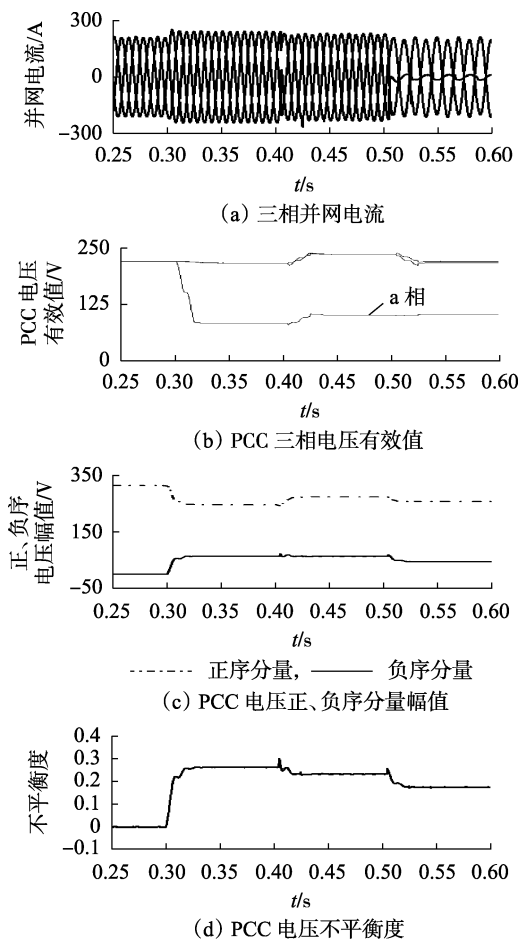


图 6 单相短路故障下的仿真结果

Fig.6 Simulative results under single-phase short circuit fault

根据图6可知,3个阶段中光伏逆变器各相的输出电流均未超过最大允许值,保证了LVRT期间本文所提策略的顺利实现,而且在3个阶段中,输出相电流的最大值基本保持在最大允许值附近,实现了光伏逆变器容量的充分利用,验证了本文2.3节中功率指令最值计算部分理论研究的正确性。故障发生后,PCC处a相电压有效值跌落至84.3 V,b、c两相电压基本不变。第2阶段设定 $k^+=0.9$,此时光伏逆变器三相电流基本对称,无功电流主要为正序分量。PCC电压正序分量幅值有近28 V的提升,负序分量幅值基本保持不变,PCC电压不平衡度有所下降;a相电压有效值上升至103 V,b、c相电压有效值上升至237 V,略高于额定值。第3阶段设定 $k^+=0.1$,此时光伏逆变器三相电流高度不对称。PCC电压正、负序分量幅值比第2阶段小,各相电压有效值的抬升效果减弱,但三相电压不平衡度进一步降低,表明此时光伏逆变器的主要作用为平衡三相电压。

设定仿真条件与图6的唯一不同之处是0.3 s时电网侧发生ab两相短路接地故障,仿真结果如图7所示。

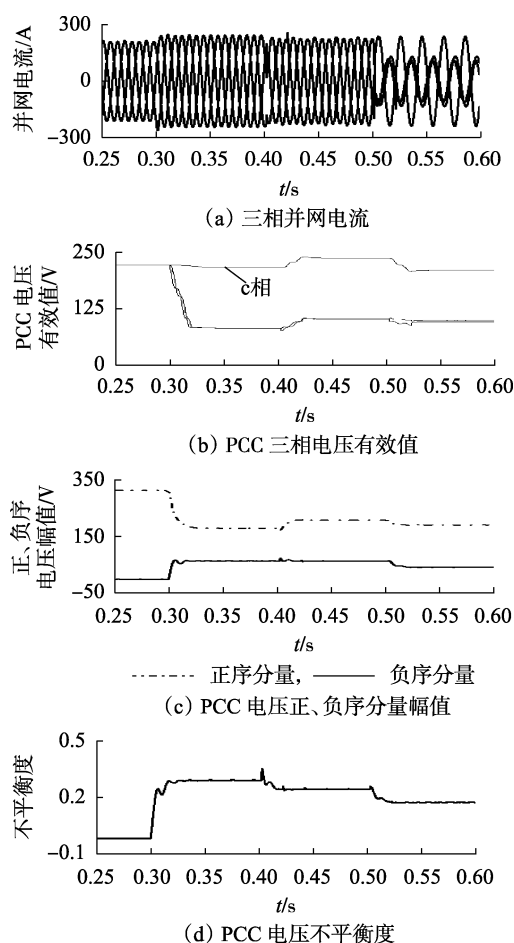


图7 两相接地短路故障下的仿真结果

Fig.7 Simulative results under two-phase grounding short circuit fault

分析图7可得到与图6结果相似的结论,此处

不再赘述。

综上,在本文策略的控制作用下,不仅能使光伏逆变器安全地实现LVRT,而且能根据电网故障类型调整控制参数 k^+ 来输出正序和负序无功电流,给PCC电压提供不同的电压支撑效果。与传统的LVRT控制策略相比,将故障类型考虑在内,可实现更具目的性的电压支撑功能,增强了光伏并网系统适应电网环境变化的灵活性。

4 结论

本文针对光伏逆变器的LVRT问题进行了相应的理论研究,通过仿真验证,得出以下结论:

a. 本文所提策略在安全实现光伏逆变器LVRT的同时,可根据电网故障类型实现对称故障下提升PCC正序电压幅值、不对称故障下降低PCC电压不平衡度等功能,使光伏逆变器在LVRT期间具备柔性电压支撑能力,增强了光伏发电单元的并网友好性;

b. 本文所提策略中的电流跟踪控制是在静止坐标系中实现的,无需进行旋转变换及电流分序控制,简化了系统控制结构。

如2.4节中所述,本文策略效果受电网阻抗影响较大,因此下一步的研究工作是针对在不同的光伏逆变器并网环境下如何保证策略有效性的问题。

参考文献:

- [1] LIU X, XU Z, WONG K P. Recent advancement on technical requirements for grid integration of wind power[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(3): 216-222.
- [2] 杨堤,程浩忠,马紫峰,等. 基于储能技术提高风电机组低电压穿越能力的分析和展望[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 1-10.
- [3] YANG Di, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Analysis and prospect of LVRT improvement based on energy storage technology for wind turbine generator system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 1-10.
- [4] 周稳,毕大强,戴瑜兴,等. 新能源发电低电压穿越的VSG实验平台研制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 107-111.
- [5] ZHOU Wen, BI Daqiang, DAI Yuxing, et al. Design of VSG testbed for LVRT of renewable energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 107-111.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 顾浩瀚,蔡旭,李征. 基于改进型电网电压前馈的光伏电站低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 13-19.
- [9] GU Haohan, CAI Xu, LI Zheng. LVRT control strategy based on improved grid-voltage feed-forward for photovoltaic station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 13-19.
- [10] 贾利虎,朱永强,孙小燕,等. 基于模型电流预测控制的光伏电站低电压穿越控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7):

- 68-74.
JIA Lihu, ZHU Yongqiang, SUN Xiaoyan, et al. Research on low voltage ride through for photovoltaic plant based on model current predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 68-74.
- [7] 刘耀远, 曾成碧, 李庭敏, 等. 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 77-82.
LIU Yaoyuan, ZENG Chengbi, LI Tingmin, et al. Study on low voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 77-82.
- [8] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [9] 颜湘武, 赵佳乐. 变功率跟踪轨迹的光伏并网低电压穿越策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 214-219.
YAN Xiangwu, ZHAO Jiale. LVRT strategy of grid-connected photovoltaic system with variable power point tracking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 214-219.
- [10] 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.
- [11] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V, TEODORESCU R, et al. Independent PQ control for distributed power generation systems under grid faults[C] // IEEE Industrial Electronics Conference (IECON). Paris, France: IEEE, 2007: 5185-5190.
- [12] 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 Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1515-1525.
- [13] 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, 2012, 60(4): 1429-1441.
- [14] SOSA J L, CASTILLA M, MIRET J, et al. Control strategy to maximize the power capability of PV three-phase inverters during voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(4): 3314-3323.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 耿华, 刘淳. 新能源并网发电系统的低电压穿越[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 200-203.
- [18] TAFTI H D, MASWOOD A I, KONSTANTINOU G, et al. Low-voltage ride-through capability of photovoltaic grid-connected neutral-point-clamped inverters with active/reactive power injection[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1182-1190.
- [19] 张文娟, 马浩森, 张国慨, 等. 基于转子串联电阻的双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 28-33.
ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, ZHANG Guokai, et al. Low voltage ride-through of doubly-fed induction generator based on rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 28-33.

作者简介:



欧阳森

欧阳森(1974—),男,广西钦州人,副研究员,博士,主要研究方向为电能质量分析与控制、新能源并网运行及其消纳技术(E-mail: ouyangs@scut.edu.cn);

马文杰(1995—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向为新能源并网运行及其消纳技术(E-mail: 1804614459@qq.com)。

Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter considering voltage fault type

OUYANG Sen, MA Wenjie

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the traditional LVRT (Low Voltage Ride Through) control technology of PV (PhotoVoltaic) inverter, an improved LVRT control strategy with flexible voltage support is proposed, in which the output reactive power is based on the voltage fault types. Firstly, the relationship between the power and current in $\alpha\beta$ coordinate system is analyzed based on the instantaneous power theory. Subsequently, a reactive power compensation strategy based on the positive- and negative-sequence voltage component assignment is proposed, in which the reactive current reference command can be flexibly adjusted by the assignment factor according to the voltage fault. Consequently, voltage support functions of increasing the RMS value of the three-phase voltage and reducing the three-phase voltage imbalance can be achieved. Finally, the simulation experiments of three-phase symmetric fault, single-phase short circuit grounding fault and two-phase short circuit grounding fault are carried out on the PSCAD/EMTDC simulation platform, and the simulative results verify the correctness of the proposed strategy.

Key words: photovoltaic; low voltage ride through; electric inverters; reactive power support; fault types; control strategy