

# 一种具有电压支撑功能的改进无功注入策略\*

杨秋霞, 王 虎, 李 坤  
(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 电压跌落是输配电系统面临的最严重的问题之一。随着分布式光伏电源在电力系统中的渗透率越来越高, 国内外最新标准要求光伏逆变器必须具备低电压穿越能力。为了消除有功功率振荡, 在传统的正/负序控制基础上提出了一种改进的有功/无功注入策略; 针对现有电压支撑方法缺乏电压抬升范围控制, 将三相电压幅值作为控制目标, 详细推导了适用于不同电压跌落情况下的数学模型, 得出为保证各相电压均保持在安全运行范围之内所需注入无功功率参考值。仿真结果验证了所提策略的正确性和有效性。

**关键词:** 电压跌落; 电压支撑; 功率振荡; 无功功率控制; 低电压穿越

中图分类号: TM 615 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)05-0063-07

## An Improved Reactive Power Injection Strategy with Voltage Limits\*

YANG Qiuxia, WANG Hu, LI Kun  
(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Voltage drop was one of the most serious problems for the operation of the transmission and distribution networks. With the growing penetration level of distributed photovoltaic power sources, the latest domestic and international standards require that the PV inverter must have low voltage ride through capability. In order to eliminate the active power oscillations, an improved active/reactive current injection strategy was proposed on the basis of the conventional positive/negative sequence control. As the current voltage support schemes fail to limit voltage lifting range, a complete control scheme intended to regard three phase voltage amplitudes as the control target to regulate the maximum and minimum phase voltages at the point of common coupling within the limits established in grid codes for continuous operation. A mathematical model adapted to different types of voltage dips was derived in detail and reactive power reference was also calculated after that. Finally, the results of simulation confirmed the correctness and effectiveness of the proposed strategy.

**Key words:** voltage drop; voltage support; power oscillations; reactive power control; low voltage ride through (LVRT)

## 0 引 言

随着光伏发电在电网中的渗透率越来越高, 其对输配电系统的影响也越来越大。当电网电压跌落时, 如光伏发电系统大面积脱网, 会对电网的有功平衡造成冲击, 严重时甚至可能会造成电网崩溃<sup>[1]</sup>。国内外最新标准<sup>[2]</sup>要求光伏并网逆变器必须具备低电压穿越 (Low Voltage Ride

Through, LVRT) 能力, 即电网发生故障时, 逆变器通过合理的策略向电网注入无功功率, 抬升并网电压, 减少电压跌落给电网带来的恶劣影响。

电压跌落会给电网带来一系列负面影响, 例如: 不平衡负序分量导致光伏逆变器输出功率波动, 电流波形畸变<sup>[3]</sup>; 并网电流过大, 危及逆变器安全<sup>[4]</sup>; 直流侧电压波动<sup>[5]</sup>等。文献[6-8]提出了一种灵活的电压支撑控制策略, 分析了

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61573303); 河北省自然科学基金资助项目(E2016203092)

作者简介: 杨秋霞(1972—), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为光伏发电及并网控制, 电力系统保护与控制。

王 虎(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网发电与电能质量的统一控制。

不同的电压跌落类型,并通过调节控制参数  $k$  实现了电压抬升与均衡的双重效果。但是,该控制方法中由于缺少电压控制,控制参数  $k$  需不断调试后才能获得较好的效果,实用性较差。针对上述不足,文献[9-10]在考虑电压控制的前提下通过详细的数学分析,得到了需要注入的无功功率  $Q$  和控制参数  $k$  的参考值。但是,该控制方法需要测量电网阻抗值,并且只适用于几种典型的电压跌落情况(单相跌落、两相对称跌落、三相对称跌落)。文献[11]提出一种针对静止无功补偿器的电压支撑策略,该方法无需测量电网阻抗。文献[12-13]对电网电压不平衡下的功率流进行分析,并在此基础上推导出恒定有功功率对应的并网电流参考值,同时满足了并网有功功率恒定且并网电流正弦的要求。文献[14-15]提出了基于电压定向矢量控制的穿越策略,但电流参考值计算复杂,多次运用坐标变换,可能引起相位滞后。

值得注意的是,大部分现有的电压支撑策略都是根据电压跌落深度注入无功电流以抬升并网点电压,忽略了电压控制及抬升范围<sup>[16-18]</sup>。本文在此基础上,进一步将三相电压幅值作为控制目标,保证各相电压均保持在并网准则要求的范围之内;同时针对电压跌落下功率振荡的问题,研究了一种消除有功振荡的无功功率注入策略。

### 1 电压跌落检测和正负序分离

三相光伏并网逆变器示意图如图1所示。其中,  $U_{dc}$  为直流侧电压;  $U_g$  为电网电压;  $L_g$  为线路电抗; LC 滤波器用于消除逆变器输出的高频谐波。

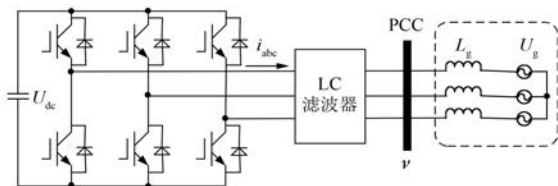


图1 光伏并网逆变器

在三相三线制系统中,PCC处的瞬时电压经过 Clark 变换后,在两相静止坐标系(SRF)下的表达式如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

电网电压跌落时,PCC处电压由正序分量和负序分量组成。为了确定PCC处电压跌落类型,本文采用双二阶广义积分器锁相环(DSOGI-PLL)<sup>[19]</sup>对PCC处电压进行正负序分离和锁相。

分离后,SRF下的电压表达式如式(2)、式(3)所示。

$$U_\alpha = U_\alpha^+ + U_\alpha^- = U^+ \cos(\omega t + \varphi^+) + U^- \cos(\omega t + \varphi^-) \quad (2)$$

$$U_\beta = U_\beta^+ + U_\beta^- = U^+ \cos(\omega t + \varphi^+) - U^- \sin(\omega t + \varphi^-) \quad (3)$$

式中:  $U_\alpha^+$ 、 $U_\beta^+$ 、 $U_\alpha^-$ 、 $U_\beta^-$ ——PCC电压的正序分量和负序分量;

$U^+$ 、 $U^-$ ——正序分量和负序分量幅值;

$\omega$ ——电网角频率;

$\varphi^+$ 、 $\varphi^-$ ——正、负序电压分量的初始相角。

PCC电压正负序分量幅值的计算表达式如式(4)、式(5)所示。

$$U^+ = \sqrt{(U_\alpha^+)^2 + (U_\beta^+)^2} \quad (4)$$

$$U^- = \sqrt{(U_\alpha^-)^2 + (U_\beta^-)^2} \quad (5)$$

定义电压不平衡度为

$$n = \frac{U^-}{U^+} \quad (6)$$

为了简化分析,设  $\varphi = \varphi^+ - \varphi^-$ , 其表达式如式(7)所示。

$$\varphi = \cos^{-1} \left( \frac{U_\alpha^+ U_\alpha^- - U_\beta^+ U_\beta^-}{U^+ U^-} \right) \quad (7)$$

### 2 消除有功振荡的电流注入策略

根据瞬时功率理论可知,电网中有功功率和无功功率表达式为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \\ U_\beta & -U_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(2)、式(3)代入式(8),可得有功和无功并网电流参考表达式如下:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha(p) \\ i_\beta(p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_\alpha(q) \\ i_\beta(q) \end{bmatrix} =$$

$$\frac{2}{3} \frac{P^*}{(U_\alpha^+ + U_\alpha^-)^2 + (U_\beta^+ + U_\beta^-)^2} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}$$

$$\frac{2}{3} \frac{Q^*}{(U_\alpha^+ + U_\alpha^-)^2 + (U_\beta^+ + U_\beta^-)^2} \begin{bmatrix} U_\beta \\ -U_\alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $i_\alpha(p)$ 、 $i_\beta(p)$ ——参考电流有功分量;  
 $i_\alpha(q)$ 、 $i_\beta(q)$ ——参考电流无功分量。

由式(2)、式(3)可知,式(9)的分母项可表示为

$$(U_\alpha^+ + U_\alpha^-)^2 + (U_\beta^+ + U_\beta^-)^2 = (U_\alpha^+)^2 + (U_\alpha^-)^2 + 2U_\alpha^+ U_\alpha^- + (U_\beta^+)^2 + (U_\beta^-)^2 + 2U_\beta^+ U_\beta^- = (U^+)^2 + (U^-)^2 + 2U^+ U^- \cos(2\omega t + \varphi^+ + \varphi^-) \quad (10)$$

式(10)中,在 2 倍电网频率处存在振荡分量。该振荡分量会使并网电流参考值中存在谐波,电流波形发生畸变。但是,如果除去参考电流表达式分母中的振荡分量,会导致实际并网有功功率和无功率出现波动<sup>[3]</sup>。

根据瞬时功率理论可知,电网电压不平衡情况下,有功无功瞬时功率表达式为

$$p = \underbrace{U^+ i_p^+ + U^- i_p^-}_{p_0} + \underbrace{U^+ i_q^+ + U^- i_q^-}_0 + \underbrace{U^+ i_p^- + U^- i_p^+}_p + \underbrace{U^+ i_q^- + U^- i_q^+}_q \quad (11)$$

$$q = \underbrace{U_\perp^+ i_p^+ + U_\perp^- i_p^-}_0 + \underbrace{U_\perp^+ i_q^+ + U_\perp^- i_q^-}_{q_0} + \underbrace{U_\perp^+ i_p^- + U_\perp^- i_p^+}_p + \underbrace{U_\perp^+ i_q^- + U_\perp^- i_q^+}_q \quad (12)$$

式中:  $U^+$ 、 $U^-$ ——电压的正负序分量;  
 $U_\perp^+$ 、 $U_\perp^-$ ——与  $U^+$ 、 $U^-$  正交的分量;  
 $i_p^+$ 、 $i_p^-$ 、 $i_q^+$ 、 $i_q^-$ ——并网有功/无功电流的正负序分量。

由式(11)可知有功振荡包括有功电流振荡和无功电流振荡。

为了使得并网电流正弦和有功功率恒定,本文采用消除有功电流振荡项的对称正/负序控制策略注入有功电流<sup>[17]</sup>:

$$i_\alpha^*(p) = \frac{2}{3} \frac{U_\alpha^+ - U_\alpha^-}{(U^+)^2 - (U^-)^2} P^* \quad (13)$$

$$i_\beta^*(p) = \frac{2}{3} \frac{U_\beta^+ - U_\beta^-}{(U^+)^2 - (U^-)^2} P^* \quad (14)$$

通过改进 PNSC 策略,得到消除无功电流振荡项的约束条件为

$$\begin{cases} U_\perp^+ i_q^+ + U_\perp^- i_q^- = Q \\ U^+ i_q^- + U^- i_q^+ = 0 \end{cases} \quad (15)$$

计算式(15)中的两个方程得

$$\begin{cases} i_q^+ = \frac{U_\perp^+}{(U^+)^2 + (U^-)^2} Q \\ i_q^- = \frac{U_\perp^-}{(U^+)^2 + (U^-)^2} Q \end{cases} \quad (16)$$

改进后的无功电流参考值的表达式为

$$i_\alpha^*(q) = \frac{2}{3} \frac{U_\beta}{(U^+)^2 + (U^-)^2} Q^* \quad (17)$$

$$i_\beta^*(q) = \frac{2}{3} \frac{U_\alpha}{(U^+)^2 + (U^-)^2} Q^* \quad (18)$$

### 3 电压支撑控制策略

电压跌落时,逆变器在向电网输出有功功率的同时,需要向电网注入无功功率抬升并网点电压至正常运行范围,直到电网恢复正常。

我国 2012 年出版的《光伏电站接入电力系统技术规定》<sup>[2]</sup>规定光伏电站正常运行时,PCC 电压范围为

$$0.9 \text{ p.u.} \leq U \leq 1.1 \text{ p.u.} \quad (19)$$

式中:  $U$ ——PCC 电压标么值。

假设电网阻抗为纯电抗,并且设电抗值为  $L_g$ 。从系统的结构框图可得电网电压  $U_g$  和 PCC 电压  $U$  的关系为

$$U_\alpha = U_{g\alpha} + L_g \frac{di_\alpha}{dt} \quad (20)$$

$$U_\beta = U_{g\beta} + L_g \frac{di_\beta}{dt} \quad (21)$$

将式(2)、式(3)、式(17)、式(18)代入式(20)和式(21)得到跌落后的电网电压的幅值

$$U_g^+ = U^+ - \omega L_g I^+ \quad (22)$$

$$U_g^- = U^- + \omega L_g I^- \quad (23)$$

其中:

$$I^+ = \frac{2}{3} \frac{U^+}{(U^+)^2 + (U^-)^2} Q^* \quad (24)$$

$$I^- = \frac{2}{3} \frac{U^-}{(U^+)^2 + (U^-)^2} Q^* \quad (25)$$

根据式(22)~式(25)可以看出,电网电压跌落越深,需要注入越多的无功功率来抬升并网点电压。对式(1)、式(2)进行反 Clark 变换,可以得到 PCC 处三相电压幅值的表达式

$$U_a = \sqrt{(U^+)^2 + (U^-)^2 + 2U^+ U^- \cos(\varphi)} \quad (26)$$

$$U_b = \sqrt{(U^+)^2 + (U^-)^2 + 2U^+ U^- \cos(\varphi - 2\pi/3)} \quad (27)$$

$$U_c = \sqrt{(U^+)^2 + (U^-)^2 + 2U^+ U^- \cos(\varphi + 2\pi/3)} \quad (28)$$

由式(26)~式(28)可以看出,电压跌落类型确定后,电压相角一定,三相电压幅值与正、负序电压分量幅值有关。令

$$x = \max\{\cos(\varphi), \cos(\varphi - 2\pi/3), \cos(\varphi + 2\pi/3)\} \quad (29)$$

$$y = \min\{\cos(\varphi), \cos(\varphi - 2\pi/3), \cos(\varphi + 2\pi/3)\} \quad (30)$$

则

$$\max\{U_a, U_b, U_c\} = \sqrt{(U^+)^2 + (U^-)^2 + 2U^+ U^- x} \quad (31)$$

$$\min\{U_a, U_b, U_c\} = \sqrt{(U^+)^2 + (U^-)^2 + 2U^+ U^- y} \quad (32)$$

联系式(22)~式(25)和式(31)~式(32)可以看出,注入无功功率可以调节正、负序电压分量的测量值 $U^+$ 、 $U^-$ 达到期望值 $(U^+)^*$ 、 $(U^-)^*$ ,从而得到PCC处三相电压幅值的期望值 $U_a^*, U_b^*, U_c^*$ ;并且 $\min\{U_a^*, U_b^*, U_c^*\}$ 与 $\max\{U_a^*, U_b^*, U_c^*\}$ 都满足PCC点电压正常运行要求。

$$\max\{U_a^*, U_b^*, U_c^*\} = \sqrt{[(U^+)^*]^2 + [(U^-)^*]^2 + 2(U^+)^*(U^-)^* x} \quad (33)$$

$$\min\{U_a^*, U_b^*, U_c^*\} = \sqrt{[(U^+)^*]^2 + [(U^-)^*]^2 + 2(U^+)^*(U^-)^* y} \quad (34)$$

令

$$\Delta U = \max\{U_a, U_b, U_c\} - \min\{U_a, U_b, U_c\} \quad (35)$$

图2显示了电压跌落时的两种典型情况。

电压支撑策略的主要目标是注入尽可能少的无功功率将跌落电压抬升到并网准则要求的正常运行范围之内。

令 $U_H = 1.1 \text{ p.u.}, U_L = 0.9 \text{ p.u.}$

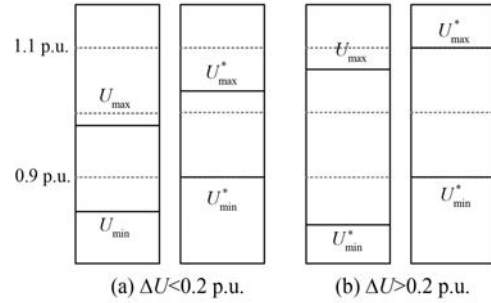


图2 电压抬升示意图

当 $\Delta U > 0.2 \text{ p.u.}$ 时:

$$\max\{U_a^*, U_b^*, U_c^*\} = U_H \quad (36)$$

$$\min\{U_a^*, U_b^*, U_c^*\} = U_L \quad (37)$$

联立式(33)、式(34)、式(36)、式(37),可得正、负序电压分量期望的幅值表达式为

$$(U^+)^* = \sqrt{\frac{xU_L^2 - yU_H^2 + \sqrt{(yU_H^2 - xU_L^2)^2 - (U_H^2 - U_L^2)^2}}{2(x - y)}} \quad (38)$$

$$(U^-)^* = \sqrt{\frac{xU_L^2 - yU_H^2 + \sqrt{(yU_H^2 - xU_L^2)^2 - (U_H^2 - U_L^2)^2}}{2(x - y)}} \quad (39)$$

同上,当 $\Delta U < 0.2 \text{ p.u.}$ 时,只需令

$$\max\{U_a^*, U_b^*, U_c^*\} = U_L + \Delta U \quad (40)$$

$$\min\{U_a^*, U_b^*, U_c^*\} = U_L \quad (41)$$

式(38)、式(39)是电压支撑策略的核心公式,不管电网电压是对称跌落还是不对称跌落,均可使PCC处瞬时相电压达到期望值大小,满足分布式光伏电源并网运行的要求。

一旦得到正、负序电压分量幅值的期望值后,根据式(22)~式(25)可得到无功功率的参考值

$$Q^* = \frac{3}{2} \frac{(U^+)[(U^+)^* - U_g^+] + (U^-)[U_g^- - (U^-)^*]}{\omega L_g} \quad (42)$$

电压支撑策略的控制框图如图3所示。控制框图的输入为有功功率参考值 $P^*$ 和PCC电压瞬时值 $U_{abc}$ 。 $U_{abc}$ 经过跌落检测和正负序分离模块,得到两相静止坐标系下电压的正负序分量幅值



图3 电压支撑策略的控制框图

$U^+$ 、 $U^-$ 和相角  $\varphi$ ，通过式(22)~式(25)计算出电网电压正负序分量幅值  $U_g^+$ 、 $U_g^-$ 。同时，根据式(26)~式(28)计算出 PCC 三相电压幅值，并根据  $\Delta U$  确定  $U_H$ 、 $U_L$ ，然后由式(38)~式(39)得到 PCC 电压正负序分量幅值的参考值  $(U^+)^*$ 、 $(U^-)^*$ ，最终根据式(42)计算出抬升电压所需无功功率参考值  $Q^*$ ，得到电流参考值。

### 4 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 仿真平台对提出的控制策略进行验证。光伏并网逆变器的参数如下：电网电压为 380 V/50 Hz，直流侧电压为 800 V，逆变器额定功率为 20 kW，滤波电感  $L$  为 7 mH，滤波电容为 11  $\mu$ F，线路阻抗  $L_g$  为 3 mH，开关频率为 20 kHz。本文所选电压基准值为相电压幅值 311 V。

情景 1: 两相不对称跌落。0.1 s 前电网正常运行，逆变器向电网输送有功功率，0.1 s 时，b 相电压跌落 20%，c 相电压跌落 30%，0.2 s 时电压恢复正常。图 4 为传统 PNSC 策略与改进策略的功率波形图。

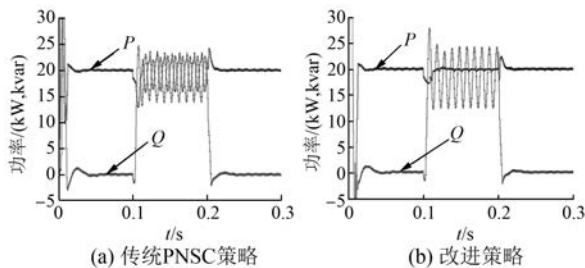


图4 传统 PNSC 策略与改进策略的功率波形图

图 4(a) 为采用传统的 PNSC 策略注入功率时的波形图，电网正常运行时，逆变器向电网注入恒定的有功功率，注入无功功率为零；当电压跌落时，由于需要注入无功功率支撑并网点电压，此时

有功功率发生振荡。图 4(b) 为采用改进策略注入功率时的波形图，从图中可以看出，当在 0.1~0.2 s 期间注入无功功率抬升电压时，消除了有功功率波动。

图 5 和图 6 分别为注入无功功率和注入无功功率时的电压正负序分量幅值、PCC 三相电压幅值等的仿真波形图。

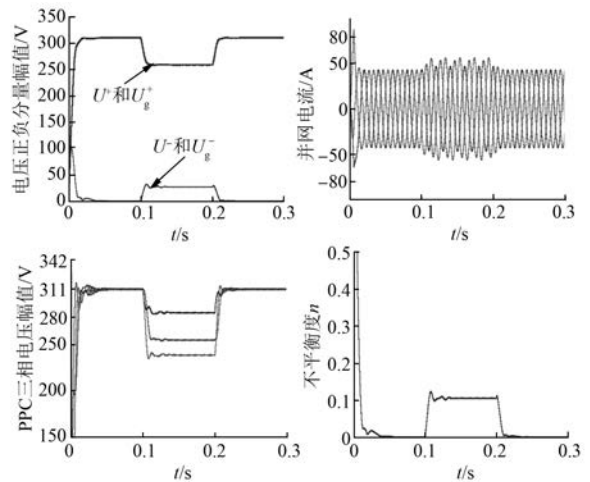


图5 未注入无功功率时的仿真波形图

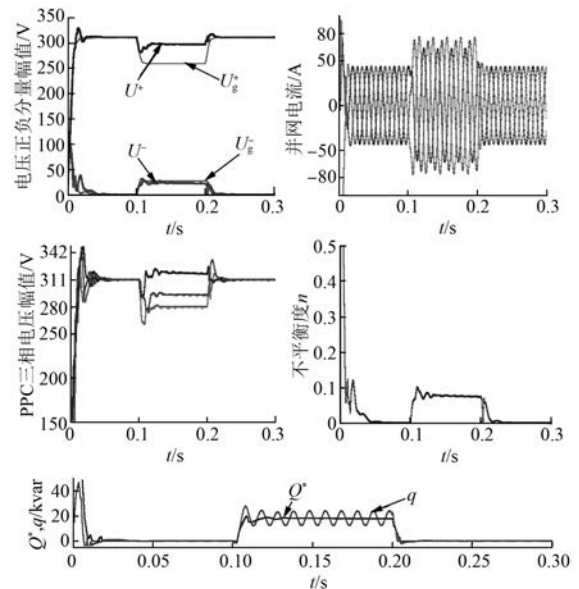


图6 注入无功功率时的仿真波形图

由图 5 的仿真结果可知：电网电压跌落时，如果无功功率未注入电网，PCC 处电压和电网电压相等，其中最小值为 239 V(0.77 p.u.)，小于 0.9 p.u.，不满足并网要求，正序分量幅值为 259 V

(0.83 p.u.), 负序分量幅值为 27.3 V(0.088 p.u.), 电压不平衡度为 10.54%, 由于注入电网的有功功率不变, 因此并网电流变大。

图 6 表示根据本文提出的策略注入无功功率时的仿真结果, PCC 处电压最小值升高到 280 V (0.9 p.u.), 三相电压幅值均在电网安全运行范围内, 正序分量幅值升高到 297 V(9.5 p.u.), 负序分量降低为 23 V(0.074 p.u.), 电压不平衡度降低到 7.7%, 由于注入了无功功率, 并网电流幅值继续升高。图 6 也给出了根据提出的电压支撑策略计算出的无功功率参考值  $Q^*$  与瞬时无功功率  $q$  的仿真波形图。由于不平衡原因, 瞬时无功功率  $q$  在二倍电网频率处存在振荡。

情景 2: 单相跌落。0.1 s 前电网正常运行, 逆变器向电网输送有功功率, 0.1 s 时, c 相电压跌落 40%, 0.2 s 时电压恢复正常。图 7 为仿真波形图。

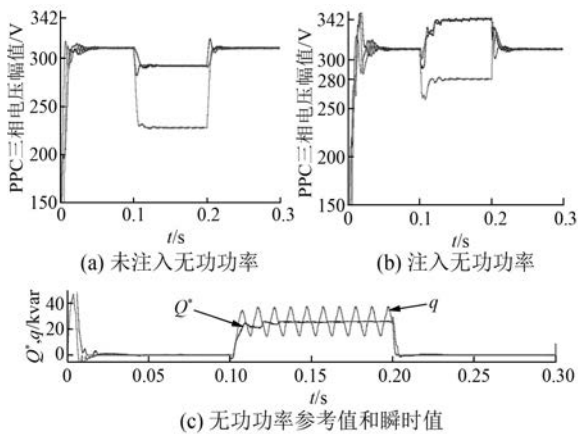


图 7 情景 2 的仿真波形图

由图 7(a) 可知, 未注入无功功率时, 三相电压幅值的最小值为 227.8 V(0.73 p.u.), 最大值为 292.2 V(0.94 p.u.), 此时  $\Delta U > 0.2$  p.u.。注入无功功率后, 图 7(b) 中三相电压最小值被抬升到 280 V(0.9 p.u.), 最大值控制在 342 V(1.1 p.u.), 均在安全运行范围之内, 满足并网要求。图 7(c) 是根据电压跌落深度计算出的无功功率参考值  $Q^*$  与瞬时无功功率  $q$  的仿真波形图。与情景 1 相同, 瞬时无功功率  $q$  在二倍电网频率处存在振荡。

情景 3: 三相对称跌落。0.1 s 前电网正常运行, 逆变器向电网输送有功功率, 0.1 s 时, abc 三相电压跌落 20%, 0.2 s 时电压恢复正常。图 8 为

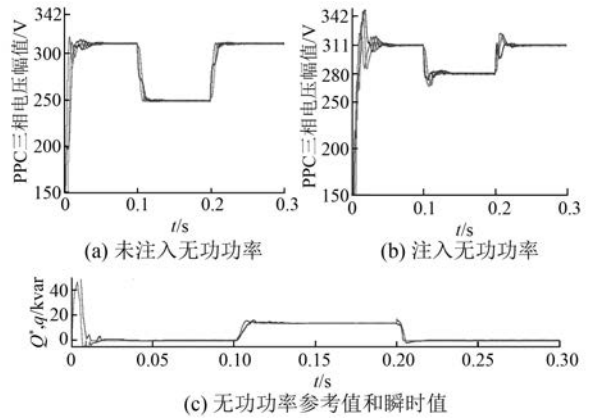


图 8 情景 3 的仿真波形图

该情景下的仿真波形图。

由图 8(a) 可以看出, 三相电压对称跌落 20% 时, 三相电压幅值为 249 V(0.8 p.u.)。图 8(b) 显示, 当注入无功功率支撑电压时, 三相电压幅值被抬升至 280 V(0.9 p.u.), 在安全运行范围之内。图 8(c) 为无功功率参考值  $Q^*$  和瞬时无功功率  $q$  的仿真波形。由于该跌落类型为三相对称跌落, 系统中不存在负序分量, 所以瞬时无功功率为恒定值。

## 5 结 语

本文研究了一种电压跌落时, 能够消除有功功率振荡, 抬升并网点电压的无功功率注入策略。首先根据 PNSC 策略注入有功功率, 并以消除有功振荡为约束条件得出了无功功率注入策略, 实现了并网有功功率恒定。其次, 将 PCC 三相电压幅值限制在并网准则要求的安全运行范围内作为控制目标, 对需要注入的无功功率参考值进行了详细的数学推导, 成功将三相电压抬升至安全范围内, 避免了逆变器脱网。从三种跌落类型的仿真结果可以看出, 该无功注入策略可以适应各种不同的跌落类型, 动态性能较好, 具有一定的工程运用价值。

## 【参考文献】

[1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.  
 [2] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S].

- [ 3 ] 郭小强, 张学, 卢志刚. 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.
- [ 4 ] AZEVEDO M S. Photovoltaic inverters with fault ride-through capability [ C ] // International Symposium on Industrial Electronics, Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea; 2009: 549-553.
- [ 5 ] 郭小强, 李建, 张学, 等. 电网电压畸变不平衡情况下三相 PWM 整流器无锁相环直流母线恒压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2002-2008.
- [ 6 ] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J. Flexible voltage support control for three-phase distributed generation inverters under grid fault [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1429-1441.
- [ 7 ] 李建文, 雷亚雄, 李永刚, 等. 并网逆变器电压支撑的参考电流值[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 276-282.
- [ 8 ] WANG F, JORGE L, MARCEL 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.
- [ 9 ] MIRET J, CAMACHO A, CASTILLA M, et al. Control scheme with voltage support capability for distributed generation inverters under voltage sags [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5252-5262.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] CASTILLA M, MIRET J, CAMACHO A, et al. Voltage support control strategies for static synchronous compensators under unbalanced voltage sags [ J ]. IEEE Trans Ind Electron, 2014, 61(2): 808-820.
- [ 12 ] 郭小强, 邬伟扬, 漆汉红. 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.
- [ 13 ] TEODORESCU R, LISERRE M, RODRIGUEZ P. 光伏与风力发电系统并网变换器[M]. 周克亮, 王政, 徐青山, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [ 14 ] 韦微, 王俊辉, 茹心芹. 基于电网电压前馈补偿的光伏并网逆变器零电压穿越控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 78-84.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 贾利虎, 朱永强, 孙小燕. 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.
- [ 17 ] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V, TEODORESCU R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid fault [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 54(5): 2583-2592.
- [ 18 ] MIRET J, CAMACHO A, CASTILLA M, et al. Reactive current injection protocol for low-power rating distributed generation sources under voltage sags [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 8(6): 879-886.
- [ 19 ] RODRIGUEZ P, TEODORESCU R, CANDELA I. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions [ J ]. Power Electronics Specialists Conference, 2006, 37(6): 1-7.

收稿日期: 2016 -11 -09

中文核心期刊      中国科技核心期刊      中国学术期刊(光盘版)  
 全国优秀科技期刊      华东优秀科技期刊  
 中国科学引文数据库来源期刊      中国学术期刊综合评价数据库来源期刊