

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.016

# 含无功电流注入的光伏低电压穿越策略研究\*

黄显斌<sup>1</sup>, 林 达<sup>1</sup>, 王慧芳<sup>1\*</sup>, 陆 宁<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力公司 检修分公司, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对光伏系统低电压穿越问题,为保证光伏在一定时间内不脱网连续运行且向电网提供无功电流,对光伏并网逆变器控制策略进行了研究。在考虑逆变器电流限制的情况下,提出了一种根据电压跌落情况向电网注入无功电流的低电压穿越策略。该策略在电压跌落不严重情况下,保持光伏有功功率输出不变,尽量提供无功功率;在电压跌落较严重情况下,光伏不输出有功功率,全部输出无功功率。同时在电网不对称故障下,引入了负序控制消除由负序分量引起的有功功率波动,并推导出了最大无功功率设定值计算公式。在PSCAD仿真环境下,验证了控制策略的合理性和有效性。研究表明,该控制策略能根据电压跌落情况充分利用光伏对有功功率和无功功率的控制能力,在一定情况下保证有功功率输出又能最大限度地提供无功功率,有助于并网点电压的恢复。

**关键词:**低电压穿越;光伏;无功电流;不对称故障

**中图分类号:**TM615+.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2016)04-0458-06

## Low voltage ride through strategy with reactive current injection for grid connected photovoltaic system

HUANG Xian-bin<sup>1</sup>, LIN Da<sup>1</sup>, WANG Hui-fang<sup>1</sup>, LU Ning<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Electric Power Corporation Maintenance Branch, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;)

**Abstract:** Aiming at solving voltage ride through problem of photovoltaic system, ensuring grid-connected operation within a certain time as well as providing reactive current, the control strategy of the inverter for Grid Connected Photovoltaic System was studied. Considering the limitation for electric current of inverter, a low voltage ride-through strategy injected with reactive current in accordance with voltage dropping condition was put forward. On condition of slight voltage sag, this strategy maintains the output of photovoltaic active power to supply reactive power as much as possible. On condition of severe voltage sag, the output was completely reactive power instead of active power. If the power grid was in asymmetrical faults, negative sequence control was adopted to eliminate the fluctuation of active power so as to deduce the setting value of maximum reactive power. It was verified that the controlling strategy was rational and effective by PSACD. The results indicate that this controlling strategy can fully utilize photovoltaic inverter to ensure the output of active power and to provide reactive power support in certain cases, which can help the restoration of voltage in power network.

**Key words:** low voltage ride through; photovoltaic; reactive current; asymmetric fault

收稿日期:2015-12-28

基金项目:国家电网公司科技资助项目(GY71-14-075)

作者简介:黄显斌(1990-),男,四川成都人,主要从事电力系统继电保护与控制方面的研究. E-mail: xianbinhuang@foxmail.com

通信联系人:王慧芳,女,副教授,硕士生导师. E-mail: huifangwang@zju.edu.cn

## 0 引言

当光伏渗透率较高的电网发生事故或扰动时,会引起光伏电站并网点电压跌落。此时,在一定的电压跌落范围和时间间隔内,光伏电站需具有不脱网连续运行的低电压穿越能力(low voltage ride through, LVRT)。否则,该电站脱网可能引发相邻的电站跳闸,进一步导致电网震荡甚至崩溃等重大事故<sup>[1-2]</sup>。因此,随着光伏在电网中装机容量的不断增加,对光伏低电压穿越策略的研究越来越迫切<sup>[3]</sup>。

为实现光伏低电压穿越,已有大量学者提出各种策略。文献[4]在并网逆变器交流侧添加动态电阻,在电网故障时限制光伏输出电流。文献[5]考虑逆变器的容量限制,通过优先提供无功电流,限制有功电流来实现低电压穿越。上述文献都只考虑电网对称故障,并没有考虑不对称故障情况。据统计,电网电压跌落故障中95%为不对称故障<sup>[6]</sup>,因此光伏低电压穿越应考虑不对称故障情况。文献[7]基于比例谐振控制方法在电网故障时向电网注入无功功率,虽然该策略适用于不对称故障,但理想的比例谐振器较难实现。有学者提出使用正负序控制<sup>[8-9]</sup>对并网逆变器进行控制。文献[10]根据电网阻抗动态输出正序和负序电流,能有效的提高逆变器低电压穿越能力,但该策略只对低电压等级电网有较明显作用。文献[11]在保证有功电流恒定的情形下,根据并网点电压跌落情况线性输出无功电流。上述正负序控制策略都未考虑不对称故障下的有功功率波动,该波动会对系统有功平衡造成冲击,进而影响系统的频率质量<sup>[12]</sup>。

本研究在上述研究的基础上,提出一种低电压穿越策略。该策略根据并网点电压跌落情况输出不同的有功功率和无功功率;电网不对称故障时引入负序控制抑制光伏输出的有功二倍频波动,保证系统输出有功功率稳定;同时提出滞环控制环节消除可能存在的光伏并网点电压跳变问题。

## 1 满足光伏 LVRT 要求的新策略

光伏发电站低电压穿越要求如图1所示。

根据2013年实施的国家标准—光伏电站接入电力系统技术规定<sup>[13]</sup>,光伏电站并网点电压跌落到图1中折线以下时,光伏电站可以被切除退出运行,否则保持并网运行。

由图1知,该规程要求在故障发生后0~2s需要

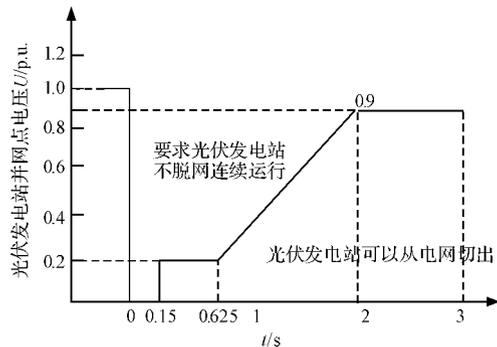


图1 光伏发电站低电压穿越要求

光伏电站具有低压穿越能力,即使光伏并网点电压跌落到0,光伏电站也能不脱网运行0.15s。此外,该规程还要求光伏电站应充分利用并网逆变器的无功容量及其调节能力,发挥其动态无功支持能力。

在满足上述要求和考虑电网有功功率平衡的情况下,提出了如下控制策略:光伏并网点电压跌落后还高于阈值时优先保证光伏有功功率输出不变,利用光伏并网逆变器过流能力提供最大无功功率输出;当并网点电压跌落后低于阈值时,切除光伏并网逆变器有功功率输入,光伏全部提供无功功率输出,以最大限度对并网点电压提供支撑作用。上述策略在光伏低电压穿越时光伏输出的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  按下式设定:

$$P = \begin{cases} P_0; & V_{pcc} > V_{ref} \\ 0; & V_{pcc} < V_{ref} \end{cases} \quad (1)$$

$$Q = Q_{max}$$

式中: $V_{pcc}$ —光伏并网点电压的正序电压标么值; $V_{ref}$ —切除光伏并网逆变器有功功率输入的电压阈值; $P_0$ —故障前光伏输出功率; $Q_{max}$ —在不同  $V_{pcc}$  跌落情况下考虑光伏逆变器最大电流限制能提供的最大无功功率,该值需要计算。

具体控制策略流程图如图2所示。

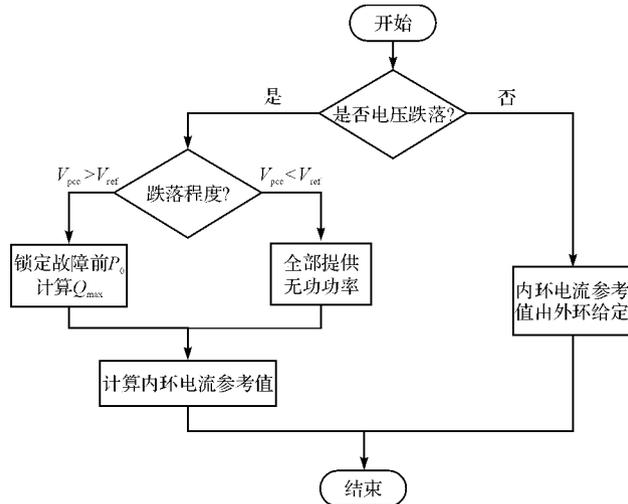


图2 控制策略流程图

图 2 中有如下几个关键步骤:

(1) 若未监测到并网点电压跌落,则光伏逆变器以功率因数 1 并网运行;若检测到并网点电压跌落,则判断电压跌落程度。

(2) 若电压跌落程度较小(测量到的光伏并网点的正序电压标幺值大于阈值  $V_{ref}$ ),则设定输出有功功率  $P$  为  $P_0$ ,并根据有功功率  $P_0$  及光伏逆变器电流约束条件计算出能输出的最大无功功率  $Q_{max}$ ,并设为  $Q$ ;否则光伏并网逆变器全部输出无功,不输出有功功率,即  $P = 0, Q = Q_{max}$ 。

(3) 根据  $P, Q$  设定值计算内环参考电流。

## 2 不同类型故障下的控制策略分析

### 2.1 对称故障

光伏并网逆变器电压电流在旋转  $dq$  坐标系下满足公式:

$$\begin{aligned} L \frac{dI_d}{dt} &= u_d - V_d - RI_d + \omega LI_q \\ L \frac{dI_q}{dt} &= u_q - V_q - RI_q - \omega LI_d \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $V_d, V_q$ —并网点电压经过  $dq$  变换后的  $dq$  轴电压;  $u_d, u_q$ —光伏逆变器交流侧  $dq$  轴电压;  $I_d, I_q$ —电网电流经过  $dq$  变换后的  $dq$  轴电流;  $L$ —交流侧滤波电感;  $R$ —滤波电感及逆变器的等效电阻。

根据式(2),内环电流控制可以采取前馈补偿和 PI 调节的控制方式,控制框图如图 3 所示。

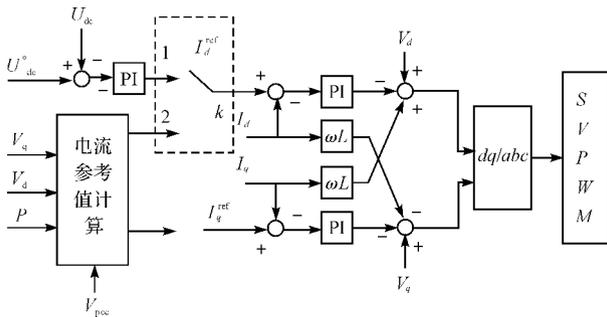


图 3 对称故障时低电压穿越控制框图

$I_d^{ref}, I_q^{ref}$ —内环电流参考值

光伏逆变器输出功率<sup>[14]</sup>可以表示为:

$$\begin{aligned} P &= V_d I_d + V_q I_q \\ Q &= V_q I_d - V_d I_q \end{aligned} \quad (3)$$

一般情况下光伏并网逆变器允许流过最大电流  $I_{max}$  为额定电流  $I_N$  的 1.5 倍,所以  $I_d$  和  $I_q$  应满足:

$$I_d^2 + I_q^2 \leq I_{max}^2 = 2.25 I_N^2 \quad (4)$$

采用电网电压定向矢量控制,光伏并网点电压在同

步旋转  $dq$  坐标系下满足  $V_d = E, V_q = 0$ ,其中  $E$  表示并网点线电压。把式(3)和式(4)代入式(1),可以得到在对称故障下光伏输出的无功功率最大值  $Q_{max}$  满足:

$$P = \begin{cases} P_0; & V_{pcc} > V_{ref} \\ 0; & V_{pcc} < V_{ref} \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_{max} = -E \sqrt{I_{max}^2 - \left(\frac{P}{E}\right)^2}$$

式中:  $V_{ref}$  应满足:

$$I_{max}^2 - \left(\frac{P_0}{V_{ref}}\right)^2 \geq 0 \quad (6)$$

因此对称情况下控制可以如图 3 所示,当检测到并网点电压跌落,开关  $K$  从选择 1 改变为选择 2。本研究通过公式(5)先比较  $V_{pcc}$  和  $V_{ref}$  得到输出的有功功率设定值  $P$ ,然后计算无功功率设定值  $Q$ ,再根据式(3)计算电流内环参考值  $I_d^{ref}$  和  $I_q^{ref}$ ,然后该值与电网的  $I_d$  和  $I_q$  电流相减,得到的偏差经过 PI 调节器以后再加上前馈电流解耦项,其输出量在过坐标变换后经 SVPWM 调制对并网逆变器进行控制,从而实现光伏对称故障下的低电压穿越控制。

### 2.2 不对称故障

光伏多采用三相无中线接入电网,因此电网发生不对称故障时,可以不考虑零序分量,但电网会产生负序分量。负序分量在电网中会产生有功功率二倍频波动,为消除其有功波动影响,本研究采用正负序分离控制。在此基础上,考虑光伏逆变器电流限制,推导出最大无功功率  $Q_{max}$  计算公式。

本研究采用  $T/4$  延时法<sup>[15]</sup>将并网点电压和电流坐标变换到静止  $\alpha\beta$  坐标系下的正、负序电压  $V_{\alpha\beta}^p, V_{\alpha\beta}^n$  和正、负序电流  $I_{\alpha\beta}^p, I_{\alpha\beta}^n$ ,再变换到同步旋转  $dq$  坐标下,最后得到正、负序电压  $V_{dq}^p, V_{dq}^n$  和正、负序电流  $I_{dq}^p, I_{dq}^n$ 。

那么光伏逆变器输出的瞬时功率可以表示为:

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \\ Q(t) &= Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\omega$ —电网角频率;  $P_{c2}, P_{s2}, Q_{c2}, Q_{s2}$ —由系统电压不平衡引起的有功和无功二倍频波动。

为消除有功功率的二倍频波动,即令  $P_{c2} = 0, P_{s2} = 0$ ,可以得到不对称故障下内环电流参考值满足下式:

$$\begin{bmatrix} I_{d,ref}^p \\ I_{q,ref}^p \\ I_{d,ref}^n \\ I_{q,ref}^n \end{bmatrix} = \frac{P}{D_1} \begin{bmatrix} V_d^p \\ V_q^p \\ -V_d^p \\ -V_q^p \end{bmatrix} + \frac{Q}{D_2} \begin{bmatrix} V_q^p \\ -V_d^p \\ V_q^p \\ -V_d^p \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:

$$D_1 = [(V_d^p)^2 + (V_q^p)^2] - [(V_d^n)^2 + (V_q^n)^2]$$

$$D_2 = [(V_d^p)^2 + (V_q^p)^2] + [(V_d^n)^2 + (V_q^n)^2]$$

将式(8)进行反 Park 变换,可以得 abc 坐标系下的正序电流  $I_{abc}^p$  和负序电流  $I_{abc}^n$  以 A 相电流为例,如下式:

$$I_a^p(t) = \left( \frac{QV_d^p}{D_2} + \frac{PV_d^p}{D_1} \right) \cos(\omega t + \varphi) + \left( \frac{QV_d^p}{D_2} - \frac{PV_d^p}{D_1} \right) \sin(\omega t + \varphi)$$

$$I_a^n(t) = \left( \frac{PV_d^n}{D_2} - \frac{QV_d^n}{D_1} \right) \cos(-\omega t + \varphi) + \left( \frac{PV_d^n}{D_2} + \frac{QV_d^n}{D_1} \right) \sin(-\omega t + \varphi)$$

式中: $\varphi$ —功率因素角。

考虑到光伏并网逆变器能流过的最大电流限制,可以得到:

$$|I_a^p|^2 + |I_a^n|^2 \leq I_{\max}^2 \quad (10)$$

当式(10)取等号时,光伏发出最大无功功率,结合式(1,8,9,10)可以得到不对称故障下光伏输出的无功功率最大值  $Q_{\max}$  如下式:

$$P = \begin{cases} P_0; & V_{\text{pcc}} > V_{\text{ref}} \\ 0; & V_{\text{pcc}} < V_{\text{ref}} \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_{\max} = \frac{(H - 2PV_d^n V_q^n)}{D_1}$$

式中: $H = \sqrt{I_{\max}^2 D_1^2 D_2 - P^2 (D_2^2 - 4(V_d^n V_q^n)^2)}$ 。为计算  $V_{\text{ref}}$  应满足的条件,定义不对称度  $n$  如下:

$$n = \sqrt{\frac{(V_d^n)^2 + (V_q^n)^2}{(V_d^p)^2 + (V_q^p)^2}} \quad (12)$$

所以,  $V_{\text{ref}}$  应满足:

$$I_{\max}^2 V_{\text{ref}}^6 (n^2 - 1)^2 (n^2 + 1) + 4(P_0 V_d^n V_q^n)^2 - P_0 V_{\text{ref}}^4 (n^2 - 1)^2 \geq 0 \quad (13)$$

$V_{\text{ref}}$  应同时考虑公式(6)和公式(13),即应满足下式:

$$V_{\text{ref}} \geq (V_{\text{ref1}}, V_{\text{ref2}})_{\max} \quad (14)$$

式中: $V_{\text{ref1}}$ —式(6)取等号时的解,  $V_{\text{ref2}}$ —式(13)取等号时的解。

不对称故障控制框图较对称故障控制框图增加了负序控制,其控制框图如图4所示。

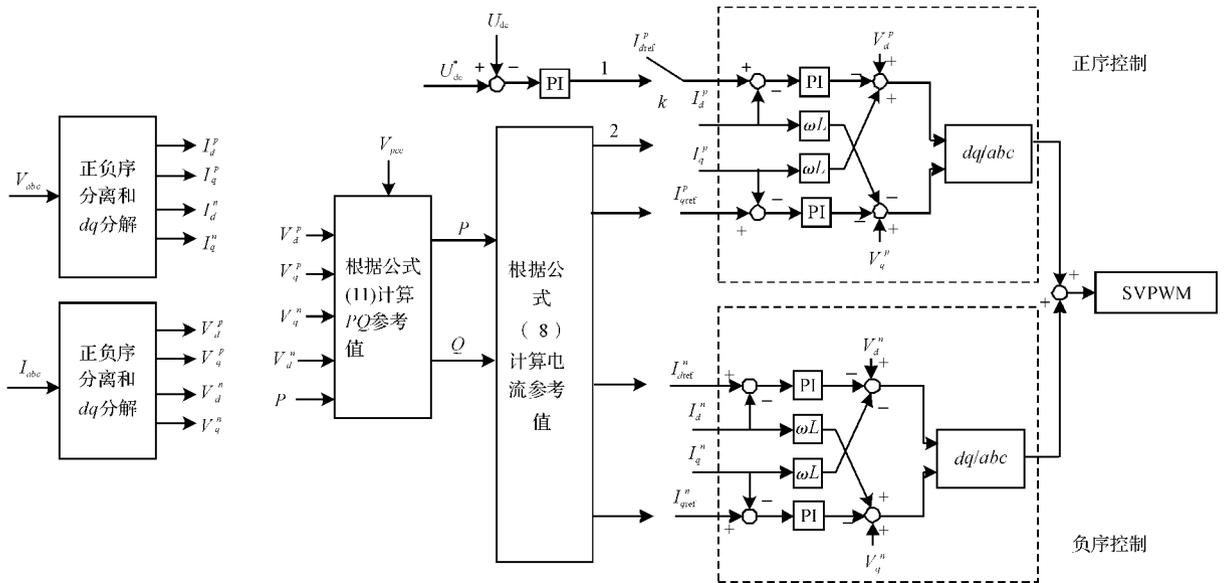


图4 不对称故障时低电压穿越控制框图

$I_{dref}^p, I_{qref}^p$ —正序内环 dq 电流参考值;  $I_{dref}^n, I_{qref}^n$ —负序内环 dq 电流参考值。

当电网正常运行时,开关  $k$  选择1,  $I_{dref}^p$  取自外环参考值,  $I_{qref}^p, I_{dref}^n$  和  $I_{qref}^n$  都设置为0;当电网发生不对称故障时,开关  $k$  切换到2,根据并网点电压跌落情况通过式(11)计算光伏输出的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  设定值,然后根据式(8)计算  $I_{dref}^p, I_{qref}^p, I_{dref}^n$  和  $I_{qref}^n$ ,再与并网点电流  $I_d^p, I_q^p, I_d^n$  和  $I_q^n$  相减,其偏差通过正负序内环PI控制器后生成 SVPWM 调制信号控制光伏并网逆变器,从而实现光伏在不对称故障下的低电压穿越。

### 3 滞环控制环节

由于电网故障位置和类型不同,光伏接入点电压  $V_{\text{pcc}}$  有可能恰好跌落到  $V_{\text{ref}}$  附近。这种情况下,当  $V_{\text{pcc}}$  降低到小于  $V_{\text{ref}}$  时,根据上述控制策略光伏会全部提供无功功率,由于无功功率突然增加,从而使  $V_{\text{pcc}}$  升高,根据电网结构不同  $V_{\text{pcc}}$  可能升高至大于  $V_{\text{ref}}$ ,这会导致光伏改为优先提供有功,进而导致无功功率输出减少,  $V_{\text{pcc}}$  因

此降低,以至于低于  $V_{ref}$ ,因此  $V_{pcc}$  电压会在  $V_{ref}$  附近跳变,严重影响并网点电压的稳定性,接入点电压跳变如图 5 所示。

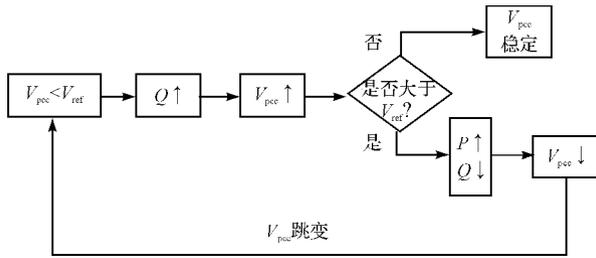


图 5 接入点电压跳变

为解决上述问题,本研究在以上控制基础上加入滞环控制环节,当  $V_{pcc}$  从高降低时,只要低于  $V_{ref}$ ,控制改为全部提供无功方式,但当  $V_{pcc}$  从低升高时,需升高到  $V_{ref} + \Delta V$  以后,控制才改为优先提供有功方式。调节  $\Delta V$  大小可以有效防止电压跳变问题。

实现方式如图 6 所示。

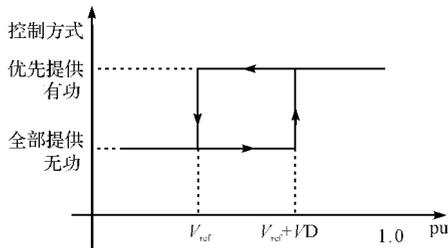


图 6 滞环控制

### 4 算例验证

光伏接入电网接线图如图 7 所示。

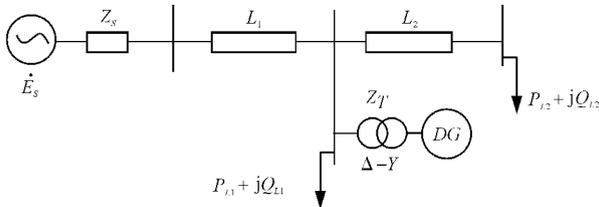
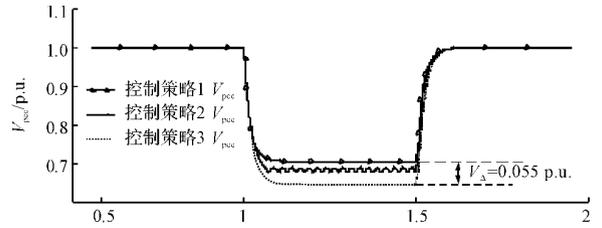


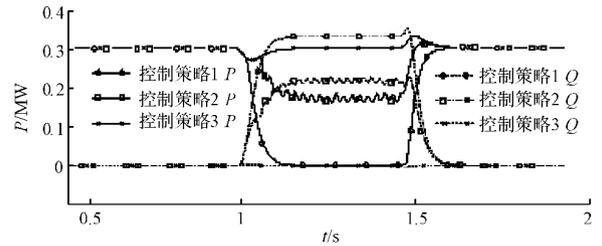
图 7 光伏接入电网接线图

本研究采用图 7 所示系统验证上述 LVRT 策略的有效性合理性。图 7 中,光伏额定容量  $S = 0.3 \text{ MW}$ ,光伏额定电流为  $I_N = 1.3 \text{ kA}$ ,光伏逆变器最大允许电流  $I_{max} = 1.5 I_N = 1.95 \text{ kA}$ ,光伏 DG 输出电压  $0.23 \text{ kV}$ ,滤波电感  $L = 20 \text{ mH}$ ,变压器容量  $1 \text{ MW}$ ,并网点电压  $10.5 \text{ kV}$ ,系统等效阻抗  $Z_s$  为  $j1.3 \Omega$ 。线路 1 和线路 2 长度都为  $10 \text{ km}$ ,线路单位正、负序阻抗为均  $(0.17 + j0.2) \Omega/\text{km}$ 。负荷功率均设置为  $P = 1 \text{ MW}, Q = 0$ 。控制算法中  $V_{ref} = 0.7 \text{ p.u.}$ ,滞环参数  $\Delta V = 0.05 \text{ p.u.}$ 。

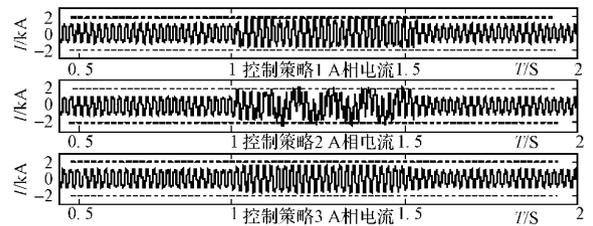
为验证该策略无功电流注入对并网点电压的支撑作用和抑制有功功率波动的能力,笔者另外选择两种控制策略进行对比,控制策略 1 为本研究提出的 LVRT 策略,控制策略 2 为无滞环环节的控制策略,控制策略 3 采用正负序 PI 控制,其中正序控制不提供无功电流,负序控制以负序电流为零为控制目标。在  $1 \text{ s}$  时,线路 L2 的 5/6 处设置三相接地故障,持续时间  $0.5 \text{ s}$ 。仿真结果如图 8 所示。



(a) 光伏接入点电压变化情况



(b) 功率变化情况



(c) A 相电流变化情况

图 8 三相短路故障仿真

本研究提出的控制策略 1 比控制策略 2 多了滞环控制环节,由图 8(a)、8(b)可知,电网三相故障以后光伏并网点电压跌落较多,并网点电压已经跌落到  $V_{ref} = 0.7$  以下,因此控制策略 1 已经完全提供无功功率  $Q = 0.331 \text{ MVAR}$ ,而有功功率  $P = 0 \text{ MW}$ ;由于全部提供无功功率,光伏并网点电压得到提升,但是并未超过  $V_{ref} + \Delta V = 0.75$ ,因此还是保持全部提供无功不提供有功的输出状态;控制策略 2 没有滞环环节,根据图 8(a)中可知,该控制策略下  $V_{pcc}$  会在  $V_{ref} = 0.7 \text{ p.u.}$  附近波动,这是因为控制策略一直在优先提供有功方式和全部提供无功方式之间进行切换,所以即输出有功功率又输出无功功率,造成并网点电压跳变。因为是三相对称故障,只取 A 相电流进行分析。从图 8(c)中可知,控制策略 2 中的 A 相电流有较大的畸变,其电流幅值有时候会超过了两条虚线,即逆变器的最大允许电流  $I_{max} =$

1.95 kA。由此可见滞环控制环节能避免  $V_{\text{pec}}$  在  $V_{\text{ref}}$  附近跳变的问题,同时保证并网逆变器安全运行。

由图 8(a)、8(c)可知,采用控制策略 1 电网因无功功率的注入,  $V_{\text{pec}}$  提升到 0.720 p. u., 而控制策略 3 光伏不提供无功功率,虽然保障了逆变器电流不超限但是其  $V_{\text{pec}}$  跌落到 0.655 p. u., 在此情况下本研究控制策略 1 相比控制策略 3 对  $V_{\text{pec}}$  有 0.055 p. u. 的提升,有助于并网点电压的恢复。

除了三相对称故障,在 1 s 时,在线路 L2 中点处设置单相接地故障,持续时间 0.5 s,以验证本研究控制策略对不对称故障控制效果。

仿真结果如图 9 所示。

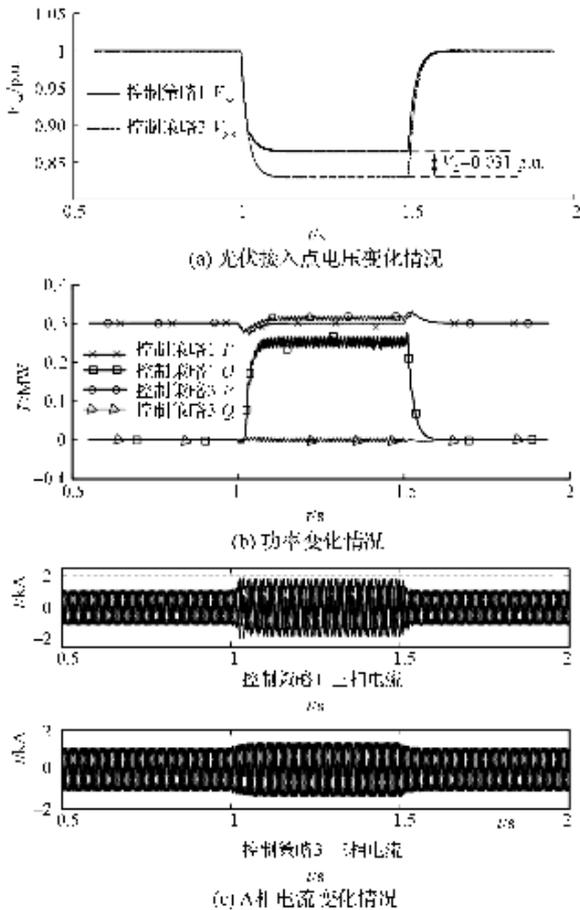


图9 单相短路故障仿真

由图 9(a)可知,在这种情况下,因为是单相故障,所以  $V_{\text{pec}}$  跌落不多,在控制策略 1 下  $V_{\text{pec}}$  跌落到 0.866 p. u., 而控制策略 3 中  $V_{\text{pec}}$  跌落到 0.835 p. u., 控制策略 1 对  $V_{\text{pec}}$  提升了 0.031 p. u.。由图 9(b)可

知,控制策略 1 在故障发生以后,保证了光伏有功功率  $P=0.3 \text{ MW}$  不变,且输出有功功率没有二倍频波动,只有在故障发生和切除的短时间内有一定的波动,同时输出无功功率  $Q=0.25 \text{ MVar}$ 。由于光伏无功功率的输出,让图 9(a)中的  $V_{\text{pec}}$  升高;控制策略 3 的负序控制只抑制负序电流,因此光伏输出的有功功率和无功功率都还存在二倍频波动。由图 9(c)可知,两种控制都满足不超过逆变器最大电流限制条件,但是控制策略 1 充分利用了逆变器无功容量,既保证输出有功功率不变,又提供无功功率,对  $V_{\text{pec}}$  起抬升作用,能更好地实现光伏低电压穿越。

## 5 结束语

本研究在满足光伏低电压穿越要求的前提下,根据并网点电压跌落情况,在接入点电压跌落不严重时优先提供有功,电压跌落严重时全部提供无功支持。电网不对称故障时,消除光伏输出的有功二倍频波动,保证系统有功平衡,进一步,提出了滞环控制环节,消除光伏低电压穿越控制策略可能出现的电压跳变问题。通过仿真验证了提出的控制策略能根据并网点电压跌落情况合理分配光伏输出的有功功率和无功功率,同时与没有无功功率注入的控制策略进行比较,表明本研究控制策略对并网点电压有较明显提升作用。

## 参考文献 (References):

- [1] 杨新华,汪龙伟,吴丽珍,等.可降低母线电压波动的两级式光伏发电系统低电压穿越策略[J].可再生能源,2015,33(6):827-833.
- [2] 周京华,刘劲东,陈亚爱,等.大功率光伏逆变器的低电压穿越控制[J].电网技术,2013,37(7):1799-1807.
- [3] 甄晓亚,尹忠东,王云飞,等.太阳能发电低电压穿越技术综述[J].电网与清洁能源,2011,29(8):65-68.
- [4] ARYA J, SAINI L M. Single Stage Single Phase Solar Inverter with Improved Fault Ride Through Capability [C]// Power Electronics (IICPE), 2014 IEEE 6th India International Conference. Kurukshetra; IEEE, 2014: 1-5.
- [5] 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.
- [6] 马亮.大功率光伏并网逆变系统研究[D].北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2012.

(下转第 482 页)

### 本文引用格式:

黄显斌,林达,王慧芳,等.含无功电流注入的光伏低电压穿越策略研究[J].机电工程,2016,33(4):458-463,482.

HUANG Xian-bin, LIN Da, WANG Hui-fang, et al. Low voltage ride through strategy with reactive current injection for grid connected photovoltaic system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(4):458-463,482.