

DOI: 10.7667/PSPC151977

# 不平衡电网电压下光伏并网逆变器滑模 直接电压/功率控制策略

朱晓荣<sup>1</sup>, 刘世鹏<sup>1</sup>, 张海宁<sup>2</sup>, 王东方<sup>2</sup>, 李春来<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;

2. 青海省光伏发电并网技术重点实验室, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 不平衡电网电压下, 光伏并网逆变器的输出功率和输出电流都将产生波动, 给电力系统的稳定运行造成不利影响。根据光伏并网系统的数学模型, 提出了光伏并网逆变器基于滑模控制的直接电压/功率控制策略。该控制策略可在电网电压不平衡时有效抑制并网逆变器输出有功功率和无功功率的波动。根据光伏并网逆变器输出功率和正、负序电流的关系, 提出了以消除负序电流为控制目标的改进控制策略。此外, 为提高系统的运行性能, 提出了功率电流协调控制策略。最后, 对所提出的控制策略进行了仿真分析, 仿真结果验证了所提出控制策略的有效性。  
**关键词:** 光伏并网逆变器; 不平衡电网电压; 滑模控制; 直接电压/功率控制

## Sliding mode control based direct voltage/power control strategy for PV grid connected inverter under unbalanced grid voltage

ZHU Xiaorong<sup>1</sup>, LIU Shipeng<sup>1</sup>, ZHANG Haining<sup>2</sup>, WANG Dongfang<sup>2</sup>, LI Chunlai<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Photovoltaic Grid Connected Power Generation Technology, Xining 810000, China)

**Abstract:** Under unbalanced grid voltage, second order pulsation component will appear in the output power and the output current of the PV grid connected inverter, which will affect the stable operation of the power system. Based on the mathematical model of PV grid connected system, this paper proposes a direct voltage/power control strategy based on sliding mode control (SMC) for the PV grid connected inverter. When the grid voltage is unbalanced, the control strategy can effectively suppress the power oscillation in the active and reactive power. According to the relationship between the output power and the positive/negative sequence current of the PV grid connected inverter, an improved control strategy is proposed to eliminate the negative sequence current. In addition, a power/current coordinated control strategy is proposed to improve the operating performance of the PV system. Finally, simulation analysis is carried out, and the results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

**Key words:** PV grid connected inverter; unbalanced grid voltage; sliding mode control; direct voltage/power control

## 0 引言

光伏发电作为一种成熟的可再生能源发电技术, 在我国的能源结构中所占的比重越来越大。由于我国特殊的地理环境和能源结构, 光伏发电以大规模并网为主, 且多集中在西北地区。这些地区电网较弱, 光伏发电与电力系统之间的相互影响越来越

越大<sup>[1]</sup>。一方面, 电网电压的不平衡会导致光伏并网逆变器输出功率的波动和输出电流波形的畸变, 影响逆变器的安全运行<sup>[2]</sup>。另一方面, 逆变器输出功率的波动和畸变电流也会对电力系统的稳定运行造成影响。因此, 研究电网电压不平衡时光伏并网逆变器的控制策略具有重要意义。

文献[3]提出一种双  $dq$  轴、正负序电流控制方案, 通过设置不同的电流参考值, 可以实现不同的不平衡控制目标, 该方法需要设置 4 个电流调节器, 控制系统复杂, 且需要对电流进行正负序分解, 存

在延时和误差。文献[4]提出一种在  $\alpha\beta$  坐标系中的比例谐振电流控制方案,该方法可实现对正负序分量的统一调节,因此仅需要两个电流调节器,但电流参考指令的计算较为复杂。文献[5]提出一种在正转坐标系中的比例降阶谐振电流控制方案,能够不进行正、负序电流分解,在正序同步旋转坐标系下对正、负序电流进行控制。由于电网电压不平衡时并网逆变器的输出功率波动和电流谐波不能同时消除,文献[6]分析了光伏并网逆变器输出功率波动和电流谐波产生的原理,提出一种功率/电流质量的协调控制,提高了系统运行性能。

以上文献均采用矢量控制方案,在电网电压不平衡时,为实现控制目标,需要复杂的相序分离和电流参考值计算。直接功率控制具有实现简单和响应速度快的优点。文献[7-8]提出一种并网逆变器的滑模直接功率控制方案,并在电网电压不平衡时实现了消除负序电流、消除有功脉动、消除无功脉动三个控制目标。

在光伏发电系统中,光伏并网逆变器的一个重要的控制目标是维持直流电压的稳定。采用上述的直接功率控制策略,需要设置额外的电压调节器,增加了控制系统的复杂度。此外,控制器参数的整定和配合也较为困难。

为此,本文根据光伏并网系统的数学模型,提出一种基于滑模控制的直接电压/功率控制策略,根据直流电压和无功功率误差直接获得逆变器的调制电压,简化了控制器的结构和参数的调整。在电网电压不平衡时,该控制策略可有效消除并网逆变器输出有功功率和无功功率的脉动。根据光伏系统输出功率和正、负序电流的关系,提出了以消除负序电流为控制目标的改进控制策略。此外,为提高系统的运行性能,提出了功率电流协调控制策略。仿真结果验证了所提出控制策略的有效性。

## 1 光伏并网逆变器的滑模直接电压/功率控制策略

### 1.1 光伏并网逆变器数学模型

光伏并网逆变器的结构图如图1所示。

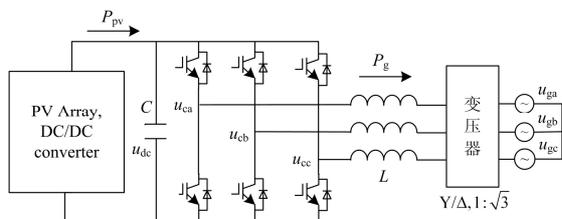


图1 光伏并网逆变器结构图

Fig. 1 Structure diagram of the grid connected inverter

整个光伏发电系统由光伏阵列、DC/DC变换器、并网逆变器、进线电抗器和电网组成。DC/DC变换器主要实现电压的变换和光伏阵列的MPPT控制。并网逆变器将直流量转换为交流量,实现光伏发电系统的并网运行。本文主要研究并网逆变器的控制。

忽略进线电抗器的电阻,光伏并网逆变器在  $dq$  旋转坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_{gd}}{dt} = \frac{1}{L}(\omega Li_{gq} + u_{cd} - u_{gd}) \\ \frac{di_{gq}}{dt} = \frac{1}{L}(-\omega Li_{gd} + u_{cq} - u_{gq}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{gd}, u_{gq}$  分别为电网电压  $dq$  轴分量;  $u_{cd}, u_{cq}$  分别为并网逆变器交流侧电压  $dq$  轴分量;  $i_{gd}, i_{gq}$  分别为并网电流  $dq$  轴分量;  $L$  为进线电抗器的等效电感;  $\omega$  为电网角频率。

忽略DC/DC变换器和并网逆变器的开关损耗,直流侧电容的数学模型为

$$Cu_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = P_{pv} - P_g \quad (2)$$

式中:  $C$  为直流侧电容;  $u_{dc}$  为电容电压;  $P_{pv}$  为光伏阵列的输出功率,由最大功率追踪算法实现;  $P_g$  为并网逆变器流向电网的有功功率。

光伏并网逆变器流向电网的有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_g = u_{gd}i_{gd} + u_{gq}i_{gq} \\ Q_g = u_{gq}i_{gd} - u_{gd}i_{gq} \end{cases} \quad (3)$$

采用电网电压定向,即  $u_{gd} = U_g, u_{gq} = 0$ ,则光伏并网逆变器流向电网的有功功率和无功功率可简化为

$$\begin{cases} P_g = U_g i_{gd} \\ Q_g = -U_g i_{gq} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $U_g$  为电网电压幅值。

### 1.2 滑模控制器设计

滑模控制是一种非线性控制,具有动态响应迅速,鲁棒性强等优点<sup>[9]</sup>。滑模控制的另一个显著特点是能够实现对交流量的无静差调节<sup>[10]</sup>。由于电网电压不平衡时,并网逆变器的输出电流和输出功率都将出现二倍频波动。因此,为了使光伏并网逆变器在电网电压不平衡时具有良好的控制性能,本文采用滑模控制设计光伏并网逆变器的控制器。

滑模控制器的设计主要包含两个部分<sup>[11]</sup>:

1) 设计滑模面  $s$ ,使得在滑模面上运动的系统具有良好的动态特性。

2) 设计控制率  $u$ ,使得系统能够在任意的初始状态在有限的时间内到达滑模面,并且保持在滑模

面上运动。

### 1.2.1 设计滑模面

光伏并网逆变器的主要控制目标是维持直流电压的恒定和输出稳定的无功功率, 并且具有良好的动态响应性能。为维持直流电压的稳定, 传统的控制策略一般设置电压外环、功率(或电流)内环的级联控制器, 导致参数的整定和配合较为困难<sup>[12]</sup>。为克服以上缺点, 本文提出一种基于滑模控制的直接电压/功率控制方案, 即以直流电压和并网逆变器输出无功功率的误差设计滑模面。

式(2)所示的直流侧电容模型为设计电压控制器的基础。可以看出, 直流电容模型存在  $u_{dc}$  和  $\dot{u}_{dc}$  的耦合项, 若直接选取  $u_{dc}$  为被控量, 会给控制器的设计带来困难。因此引入新的被控量  $u_c$ , 令

$$u_c = u_{dc}^2 \quad (5)$$

则式(2)可简化为

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{2}{C}(P_{pv} - P_g) = \frac{2}{C}e_p \quad (6)$$

式中,  $e_p$  定义为有功功率误差。可以看出,  $u_{dc}$  和  $\dot{u}_{dc}$  的耦合项得以消除, 模型得到简化。由于  $u_{dc}$  为正值, 被控量的改变并不会影响系统的控制性能。

根据系统的控制目标, 定义跟踪误差

$$\begin{cases} e_u = u_c^* - u_c \\ e_Q = Q_g^* - Q_g \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $u_c^*$  为直流电压参考值的平方;  $Q_g^*$  为网侧变换器输出无功功率的参考值。

本文采用积分滑模面<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} s_u = e_u + c_1 \int e_u dt \\ s_Q = e_Q + c_2 \int e_Q dt \end{cases} \quad (8)$$

式中: 积分项的引入是为了消除系统的静态误差;  $c_1$  和  $c_2$  为正实数。

### 1.2.2 设计控制率

根据滑模控制的设计方法<sup>[13]</sup>, 滑模控制的控制率可取为

$$u = \Delta u + u_{eq} \quad (9)$$

式中:  $\Delta u$  为开关控制;  $u_{eq}$  为等效控制。开关控制的作用是使系统从任意的初始状态在有限的时间内到达滑模面。等效控制的作用是使系统在理想状态下沿滑模面运动, 等效控制可以加快系统的响应速度, 减小系统的静态误差。

考虑到  $u_c^*$  为常数, 对  $s_u$  求二阶导数, 对  $s_Q$  求一阶导数, 并将式(1)、(4)和(6)代入得

$$\begin{cases} \dot{s}_u = \frac{2U_g}{CL}(-c_1 Li_{gd} + \omega Li_{gq} - u_{gd}) + \frac{2c_1 P_{pv}}{C} + \frac{2U_g}{CL} u_{cd} \\ \dot{s}_Q = -\frac{U_g}{L}(-c_2 Li_{gq} + \omega Li_{gd} + u_{gq}) + \dot{Q}_g^* + c_2 Q_g^* + \frac{U_g}{L} u_{cq} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可得

$$\begin{cases} \partial \dot{s}_u / \partial u_{cd} = 2U_g / CL \neq 0 \\ \partial \dot{s}_Q / \partial u_{cq} = U_g / L \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

由相对阶的定义可得<sup>[14]</sup>, 切换函数  $s_u$  的相对阶为 2, 切换函数  $s_Q$  的相对阶为 1。因此可以采用二阶滑模设计系统的控制率, 二阶滑模控制可以消除系统抖振, 提高系统的控制性能。

本文采用二阶滑模控制中的超螺旋算法设计开关控制。相比于其他算法, 该算法不需要滑模变量导数及其符号信息, 并且当系统的相对阶为 1 时, 可以直接应用二阶滑模算法, 不需要引入新的控制量。其具体算法见附录 A<sup>[15-16]</sup>。结合式(7)和式(8), 可得系统的开关控制为

$$\begin{cases} \Delta u_{cd} = -k_{u1} \sqrt{|s_u|} \operatorname{sgn}(s_u) - k_{u2} \int \operatorname{sgn}(s_u) dt \\ \Delta u_{cq} = -k_{Q1} \sqrt{|s_Q|} \operatorname{sgn}(s_Q) - k_{Q2} \int \operatorname{sgn}(s_Q) dt \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $k_{u1}$ ,  $k_{u2}$ ,  $k_{Q1}$  和  $k_{Q2}$  为正常数。

对于二阶滑模, 等效控制令  $\dot{s} = \ddot{s} = 0$  获得。令  $\dot{s}_Q = \ddot{s}_u = 0$ , 由式(10)可得系统的等效控制为

$$\begin{cases} u_{cdeq} = -\omega Li_{gq} + u_{gd} - \frac{c_1 L}{U_g} e_p \\ u_{cqe} = \omega Li_{gd} + u_{gq} - \frac{c_2 L}{U_g} e_Q - \frac{L}{U_g} \dot{Q}_g^* \end{cases} \quad (13)$$

最终, 得到光伏并网逆变器总的控制输入为

$$\begin{cases} u_{cd} = \Delta u_{cd} + u_{cdeq} \\ u_{cq} = \Delta u_{cq} + u_{cqe} \end{cases} \quad (14)$$

## 2 不平衡电网电压下的控制策略

### 2.1 不平衡电网电压下光伏并网逆变器的输出功率模型

不平衡电网电压下, 电网电压和并网逆变器的输出电流都将存在正序分量和负序分量。在静止坐标系中, 正、负序分量分别以角速度  $\omega$  和  $-\omega$  旋转。则在正转坐标系中, 正序分量为直流量, 负序分量以角速度  $-2\omega$  旋转。在正转坐标系中, 电网电压、逆变器输出电流各分量可分别表示为

$$\begin{cases} u_{gd} = u_{gd}^+ + u_{gd}^- \\ u_{gq} = u_{gq}^+ + u_{gq}^- \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} i_{gd} = i_{gd}^+ + i_{gd}^- \\ i_{gq} = i_{gq}^+ + i_{gq}^- \end{cases} \quad (16)$$

式中, 上标+、-分别表示正、负序分量。

将式(15)和式(16)代入式(3), 可得电网电压不平衡时并网逆变器输出的有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_g = u_{gd}^+ i_{gd}^+ + u_{gq}^+ i_{gq}^+ + u_{gd}^- i_{gd}^- + u_{gq}^- i_{gq}^- + \\ \quad u_{gd}^+ i_{gd}^- + u_{gq}^+ i_{gq}^- + u_{gd}^- i_{gd}^+ + u_{gq}^- i_{gq}^+ \\ Q_g = u_{gq}^+ i_{gd}^+ - u_{gd}^+ i_{gq}^+ + u_{gq}^- i_{gd}^- - u_{gd}^- i_{gq}^- + \\ \quad u_{gq}^+ i_{gd}^- - u_{gd}^+ i_{gq}^- + u_{gq}^- i_{gd}^+ - u_{gd}^- i_{gq}^+ \end{cases} \quad (17)$$

根据电网电压不平衡时逆变器输出有功功率和无功功率的特点, 有功功率和无功功率可分别分为3个部分, 如式(18)。

$$\begin{cases} P_g = P_{g0} + P_{g1} + P_{g2} \\ Q_g = Q_{g0} + Q_{g1} + Q_{g2} \end{cases} \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} P_{g0} = u_{gd}^+ i_{gd}^+ + u_{gq}^+ i_{gq}^+ + u_{gd}^- i_{gd}^- + u_{gq}^- i_{gq}^- \\ P_{g1} = u_{gd}^+ i_{gd}^- + u_{gq}^+ i_{gq}^- \\ P_{g2} = u_{gd}^- i_{gd}^+ + u_{gq}^- i_{gq}^+ \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} Q_{g0} = u_{gq}^+ i_{gd}^+ - u_{gd}^+ i_{gq}^+ + u_{gq}^- i_{gd}^- - u_{gd}^- i_{gq}^- \\ Q_{g1} = u_{gq}^+ i_{gd}^- - u_{gd}^+ i_{gq}^- \\ Q_{g2} = u_{gq}^- i_{gd}^+ - u_{gd}^- i_{gq}^+ \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_{g0}$ 、 $Q_{g0}$ 分别为有功功率和无功功率稳态分量;  $P_{g1}$ 、 $Q_{g1}$ 分别为正序电压、负序电流产生的有功功率和无功功率二倍频波动;  $P_{g2}$ 、 $Q_{g2}$ 分别为负序电压、正序电流产生的有功功率和无功功率二倍频波动。

## 2.2 不平衡控制策略

电网电压不平衡时, 若不加以控制, 并网逆变器的输出有功功率和无功功率都将产生二倍频波动, 并网逆变器的输出电流也将产生不平衡畸变。为提高并网逆变器在不平衡电网电压下的运行性能, 本文提出了三种控制目标: 1) 消除有功功率和无功功率的二倍频波动; 2) 消除并网电流负序分量; 3) 功率电流协调控制。

### 1) 消除有功功率和无功功率的二倍频波动

由于滑模控制能够对交流量进行控制, 当直流电压和无功功率存在二倍频波动时, 只要设置控制器的参考值为直流量, 即可消除直流电压和无功功率的二倍频波动。由式(2)和式(6)所示的直流侧数学模型可以看出, 直流电压的稳定实质上反映了光伏阵列输出功率  $P_{pv}$  和并网逆变器输出有功功率  $P_g$  之间的平衡。由于  $P_{pv}$  为可视为恒定的直流量, 因此

对直流电压的调整实质上是对  $P_g$  的调整, 只要直流电压恒定, 即可保证  $P_g$  为无脉动的直流量。综上所述, 无需对 1.2 节所示的滑模控制进行修正, 只要设置控制器的参考值为直流量, 即可在电网电压不平衡时消除有功功率和无功功率的脉动。

### 2) 消除并网电流负序分量

消除并网电流的负序分量, 即令  $i_{gd}^- = 0$ ,  $i_{gq}^- = 0$ 。

在此情况下, 可以得到三相正弦的输出电流。由式(19)和式(20)可知, 由负序电流引起的功率波动  $P_{g1}$  和  $Q_{g1}$  必须被消除。而由负序电压和正序电流引起的功率波动  $P_{g2}$  和  $Q_{g2}$  则需要保留。

为达到上述目标, 仅需要对有功分量  $P_{g0}$  和  $P_{g1}$ 、无功分量  $Q_{g0}$  和  $Q_{g1}$  进行调节。重新定义式(6)和式(7)中的有功功率误差和无功功率误差为

$$\begin{cases} e'_p = P_{pv} - (P_{g0} + P_{g1}) \\ e'_q = Q_g^* - (Q_{g0} + Q_{g1}) \end{cases} \quad (21)$$

将式(21)第一项代入式(6)可得

$$\frac{du}{dt} = \frac{2}{C} (P_{pv} - (P_{g0} + P_{g1})) \quad (22)$$

可以看出, 采用式(21)所示的无功功率跟踪误差, 即可消除波动分量  $Q_{g1}$ ; 采用式(22)所示的直流电压模型, 即可消除波动分量  $P_{g1}$ 。由于未对  $P_{g2}$  和  $Q_{g2}$  进行调节, 逆变器输出正序电流不受影响。

为使式(21)和式(6)、式(7)所示的功率误差尽可能一致, 根据式(18)所示的关系对式(21)进行调整。

$$\begin{cases} e'_p = P_{pv} - P_g + P_{g2} = e_p + P_{g2} \\ e'_q = Q_g^* - Q_g + Q_{g2} = e_q + Q_{g2} \end{cases} \quad (23)$$

可见, 以消除并网电流负序分量为目标的控制策略仅需在原有的控制策略的功率误差中加入功率补偿  $P_{g2}$  和  $Q_{g2}$ , 控制器的其它部分则不需要修改。

### 3) 功率电流协调控制

由上文的分析可知, 当以消除功率波动为控制目标时, 并网电流负序分量较大, 可能导致三相波形畸变严重, 不满足并网要求; 相反, 当以消除负序电流为控制目标时, 并网功率波动较大。在实际运行中, 需要综合考虑并网功率和并网电流质量。因此, 本文提出一种功率电流协调控制策略, 对式(23)所示的有功功率和无功功率误差进行修正:

$$\begin{cases} e'_p = P_{pv} - P_g + kP_{g2} = e_p + kP_{g2} \\ e'_q = Q_g^* - Q_g + kQ_{g2} = e_q + kQ_{g2} \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $k$  为补偿系数, 取值范围为  $0 \leq k \leq 1$ 。

由式(24)可以看出, 当  $k=0$  时, 可实现控制目标1; 当  $k=1$  时, 可实现控制目标2; 当  $0 < k < 1$  时, 可实现控制目标3。在实际运行中, 可选择适当的  $k$  值,

以同时满足并网功率和并网电流的要求。

功率补偿项的计算需要电网电压和逆变器输出电流的正负序分量信息, 本文在  $dq$  坐标系中采用 100 Hz 陷波器提取<sup>[17]</sup>。所提出的不平衡控制策略的控制框图如图 2 所示。

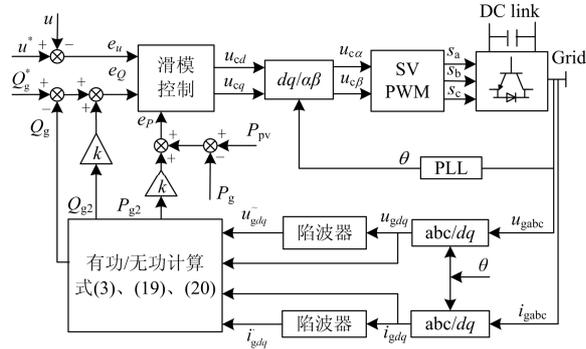


图 2 不平衡电网电压下并网逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of the inverter under unbalanced grid voltage

综上所述, 所提出的控制策略仅需要设置两个控制器。电网电压不平衡时, 补偿项的计算相对简单, 且仅需要提取负序电压和正序电流两个序分量, 减小了相序分离对控制精度的影响。整个控制系统的结构和参数的整定相对简单。

### 3 仿真研究

为了验证本文所提出控制策略的有效性, 搭建了光伏并网系统仿真模型, 仿真系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of the simulation system

参数	数值	参数	数值
光伏额定功率	5 600 W	滤波电感	2.3 mH
直流侧电压	500 V	滤波电感阻值	0.1 Ω
三相电网电压	380 V	开关频率	2 kHz

稳态时, 光伏发电系统输出额定有功功率, 输出无功功率为 0。在电网 A 相电压跌落 50% 的情况下, 对三种控制目标进行了验证。控制目标 1:  $k=0$ , 即消除并网逆变器输出功率脉动; 控制目标 2:  $k=1$ , 即消除并网电流负序分量; 控制目标 3:  $k=0.5$ , 即功率电流协调控制。仿真结果分别如图 3—图 5 所示。

从图 3 可以看出, 当采用控制目标 1 时, 并网逆变器输出的有功功率和无功率脉动基本得到消除, 且直流侧电压较为平稳。但在  $dq$  坐标系中, 并网电流存在较大的二倍频波动, 三相电流波形畸变较大。

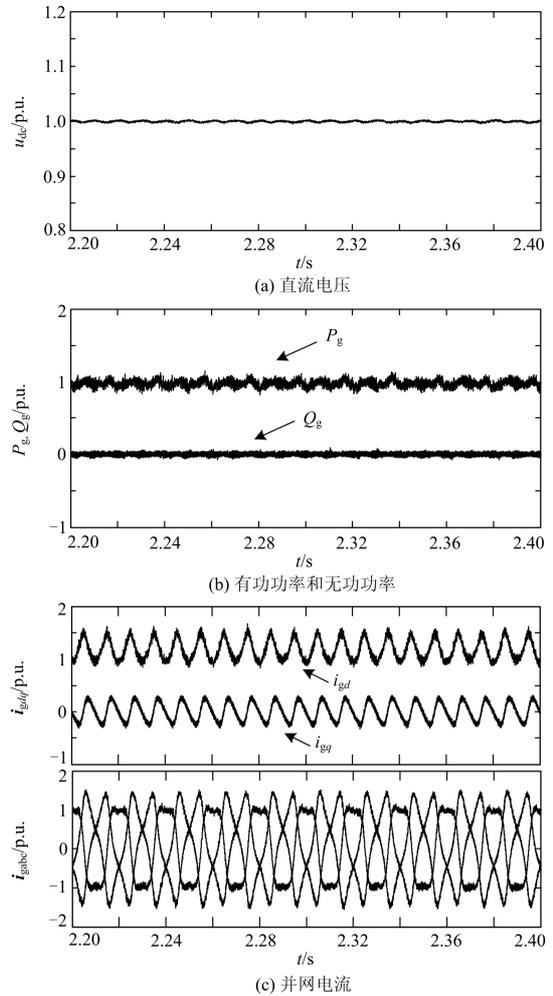


图 3 抑制并网逆变器输出功率脉动的仿真波形

Fig. 3 Output waveforms when the power pulsation elimination control strategy is adopted

从图 4 可以看出, 当采用控制目标 2 时, 在  $dq$  坐标系中, 并网电流的二倍频脉动基本得到消除, 并网三相电流保持正弦且无波形畸变。由于此时直流  $P_{pv}$  和  $P_g$  中的  $P_{g0}$  和  $P_{g1}$  保持平衡, 恒定的  $Q^*$  和  $Q_g$  中的  $Q_{g0}$  和  $Q_{g1}$  保持平衡,  $P_g$  中的  $P_{g2}$  分量以及  $Q_g$  中的  $Q_{g2}$  分量并没有消除, 因此逆变器输出的有功功率和无功率仍存在较大的二倍频脉动, 直流电压也存在二倍频波动。

从图 5 可以看出, 当  $k=0.5$  时, 并网电流和逆变器输出功率中的二倍频波动都没有完全消除, 因此并网三相电流仍存在一定的波形畸变, 直流电压也有较小的二倍频脉动。但对比图 3 和图 5 可以看出, 图 5 中并网电流的  $d$ 、 $q$  轴分量的波动和三相电流波形畸变均也有所减小。对比图 4 和图 5 可以看出, 图 5 中逆变器输出功率的波动有所减小。图 5 中直流电压波动介于图 3 和图 4 之间。

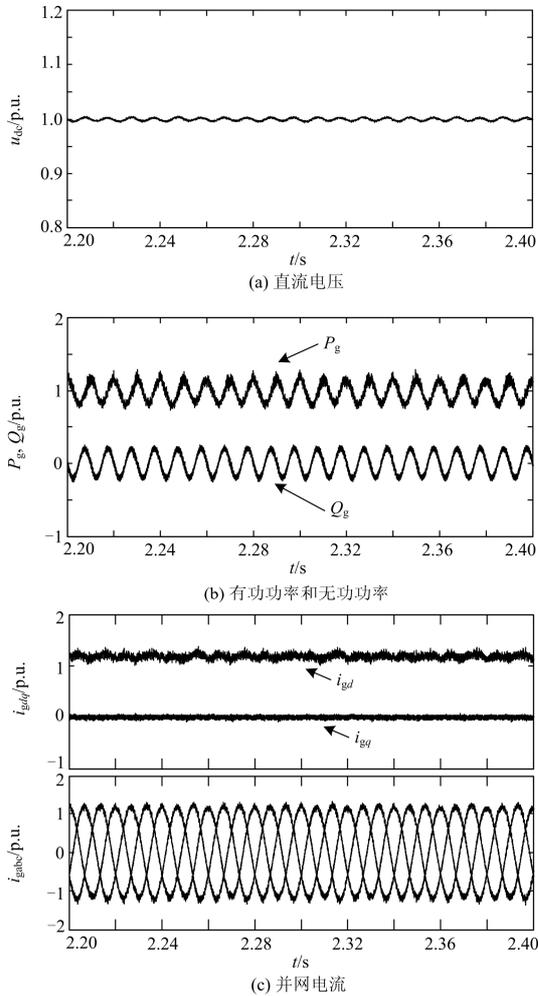


图 4 消除输出电流负序分量的仿真波形

Fig. 4 Output waveforms when the proposed negative sequence current elimination control strategy is adopted

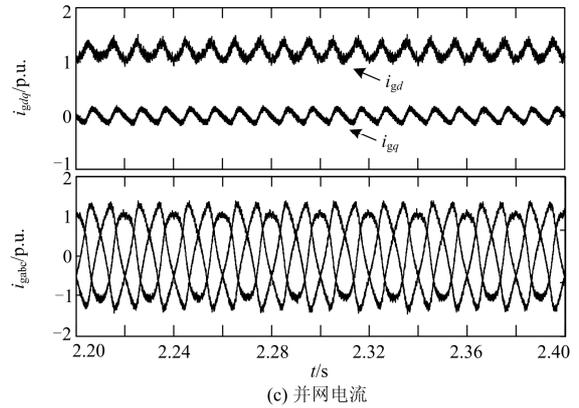
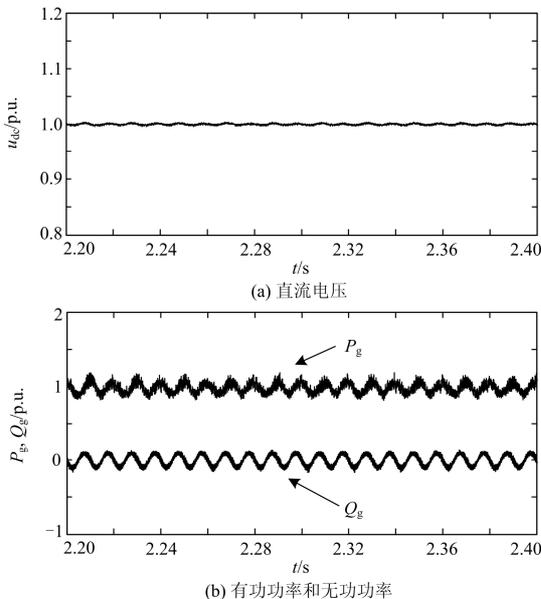


图 5 功率电流协调控制时的仿真波形

Fig. 5 Output waveforms when the proposed power/current coordinated control strategy is adopted

在光伏并网逆变器的实际运行中,可根据电网对逆变器输出功率质量和电流质量的要求调整补偿系数  $k$  的取值,以达到不同情况下的并网要求。

#### 4 结论

本文根据光伏并网逆变器的数学模型,提出了基于滑模变结构理论的直接电压/功率控制策略,简化了控制器的设计和参数的调整。分析了电网电压不平衡时并网逆变器的输出功率模型,通过在原有控制策略中加入不同的功率补偿项,可以分别实现抑制输出功率脉动和保证输出电流正弦两种控制目标。此外,为提高系统的运行性能,提出了功率电流协调控制策略。最后,仿真结果验证了所提出控制策略的有效性。

#### 附录 A

超螺旋算法的具体算法为

$$\begin{cases} \dot{u}(t) = -k_1 \sqrt{|s|} \operatorname{sgn}(s) + z(t) \\ \dot{z}(t) = -k_2 \operatorname{sgn}(s) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $z(t)$  为加速度的估计值;  $k_1$  和  $k_2$  为正常数。

假设存在正常数  $\Phi$  满足:

$$|s| \leq \Phi \quad (2)$$

控制器的参数  $k_1, k_2$  可通过式(3)进行调整。

$$\begin{cases} k_2 > \Phi \\ k_1 \geq 2\sqrt{\Phi(k_2 + \Phi)/(k_2 - \Phi)} \end{cases} \quad (3)$$

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 周念成, 楼晓轩, 王强钢, 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.
- ZHOU Niancheng, LOU Xiaoxuan, WANG Qianggang, et al. Harmonic currents suppression for three-phase photovoltaic power generation system under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 246-254.
- [3] 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 Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(4): 647-652.
- [4] 章玮, 王宏胜, 任远, 等. 不对称电网电压条件下三相并网型逆变器的控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 103-110.
- ZHANG Wei, WANG Hongsheng, REN Yuan, et al. Investigation on control of three-phase grid-connected inverters under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 103-110.
- [5] 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.
- ZHAO Xin, JIN Xinmin, ZHOU Fei, et al. Unbalanced control of grid-connected inverters based on proportion integral and reduced order resonant controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 84-92.
- [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] 郭旭刚, 金新民, 马添翼, 等. 电网不平衡下基于滑模变结构的三相电压型 PWM 整流器恒频控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 126-133.
- GUO Xugang, JIN Xinmin, MA Tianyi, et al. Constant frequency control for three-phase voltage PWM rectifier under unbalanced grid voltage conditions based on sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 126-133.
- [8] SHANG L, SUN D, HU J. Sliding-mode-based direct power control of grid-connected voltage-sourced inverters under unbalanced network conditions[J]. IET Power Electronics, 2011, 4(5): 570-579.
- [9] 茅靖峰, 吴爱华, 吴国庆, 等. 基于扩张状态观测的永磁直驱风力发电系统 MPPT 自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 58-65.
- MAO Jingfeng, WU Aihua, WU Guoqing, et al. Adaptive sliding mode MPPT control for PMSG-based wind energy conversion systems based on extended state observer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 58-65.
- [10] 张伟奎, 常鲜戎, 李涛, 等. 基于 DSP 和新型滑模控制的 DSTATCOM 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 7-12.
- ZHANG Weikui, CHANG Xianrong, LI Tao, et al. Research on DSTATCOM based on DSP and novel sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 7-12.
- [11] 张迪, 魏艳君, 马利轩, 等. 不平衡电网电压下基于滑模变结构控制的双馈风电系统网侧变流器控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 266-275.
- ZHANG Di, WEI Yanjun, MA Lixuan, et al. Sliding-mode control for grid-side converters of DFIG-based wind-power generation system under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 266-275.
- [12] 徐友, 郑建勇, 梅军, 等. 负序电压前馈补偿的三相光伏逆变器不平衡单周控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 22-28, 18.
- XU You, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. One-cycle control strategy of three-phase PV inverters based on negative sequence voltage feed forward compensation under unbalanced input voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(36): 22-28, 18.
- [13] 郑雪梅, 李琳, 徐殿国. 双馈风力发电系统低电压过

- 渡的高阶滑模控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊 1): 178-183.
- ZHENG Xuemei, LI Lin, XU Dianguo. Simulation study on higher-order sliding mode control of DFIG wind energy system under low voltage ride through[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 178-183.
- [14] 李鹏. 传统和高阶滑模控制研究及其应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- LI Peng. Research and application of traditional and Higher-order sliding mode control[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [15] 易伯瑜, 康龙云, 陶思念, 等. 永磁同步电机抗扰高阶滑模观测器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 132-140.
- YI Boyu, KANG Longyun, TAO Sinian, et al. Design of robust high order sliding mode observer for permanent magnet synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 132-140.
- [16] SUSPERREGUI A, ITSASO M M, TAPIA G, et al. Second-order sliding-mode controller design and tuning for grid synchronisation and power control of a wind turbine-driven doubly fed induction generator[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(5): 540-551.
- [17] XU L, WANG Y. Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 314-323.
- 
- 收稿日期: 2015-11-11; 修回日期: 2016-03-07
- 作者简介:
- 朱晓荣(1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电及并网技术、电力系统分析等; E-mail: xiaorongzhu@ncepu.edu.cn
- 刘世鹏(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及并网技术; E-mail: liushipeng90@foxmail.com
- 张海宁(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度。E-mail: 13997230869@qq.com
- (编辑 葛艳娜)