基于新型电流环控制策略光伏并网逆变器实验研究

主要研究光伏并网逆变器中的控制策略问题，对于传统解耦控制策略中*dq*轴都需要电感*L*的准确值，而实际系统中电感量值会变化的问题，提出对传统解耦控制进行改进，得出无须电感量*L*值的解耦控制策略。搭建了基于新型解耦控制策略的系统仿真模型并进行仿真验证，最后动手搭建以DSP2812最小系统为主控制器的实验平台，进行了基于新型控制策略的光伏系统并网实验，实验结果表明理论分析和仿真结果的正确性。

李安平／南京市产品质量监督检验院
宋丽霞　彭家琦／江苏省智能电网应用产品检测技术有限公司

李安平／工程师

关键词/Keywords
光伏·
并网逆变器·
电流环·
解耦控制·

光伏并网逆变器是采用逆变器电路组成的光伏发电并网装置，通过对逆变器中全控型开关管控制，可以快速实现该装置将光伏装置发的电能输送到电网的过程[1-3]。

目前对于光伏并网逆变器系统中的控制策略问题研究已有很多文献论述，文献[4]在直接转矩控制的基础上引入了空间矢量控制及预测控制思想，可以克服直接转矩控制中开关频率不固定的不足。但是这在一定程度上也增加了控制系统的复杂性和实现难度。文献[5]提出了一种状态反馈解耦控制，但是该解耦方法需引入的状态变量比较多，算法非常复杂，同时与控制器设计相关的系统参数很多，对系统参数要求很苛刻，降低了控制系统的鲁棒性。文献[6-7]对基于解耦控制的间接电流控制策略进行了详细的分析，这种控制策略中有个固定的缺陷，就是其中的解耦控制算法需要准确知道逆变系统与电网之间连接电感的值，但是由于制作电感的材料和工艺的差别以及系统运行中电感量会变化，这将导致电感值无法准确获取，随着逆变系统输出的电流过大，连接电感饱和，电感量变化，由此会导致控制系统失去控制或者更严重的情况发生。

本文主要在上述文献的基础上，就并网逆变器传统解耦控制需要准确知道连接电感量值或者电感量变化导致系统失去控制等问题提出一种改进方法，这种新型的控制策略无须知道电感*L*的值，消灭了电感量变化带来的控制影响，接着按照上述的理论在Matlab中搭建了新型解耦控制系统仿真模型，最后通过实验验证了理论的正确性和可行性。

光伏并网逆变器的结构与运行原理

电压源型桥式电路结构在光伏并网逆变器装置中应用比较广泛，电压源型逆变器电路直流侧为电容。本文研究的也主要是基于电压源型桥式电路的三相光伏并网逆变器，其采用*L*型滤波器并联接入电力系统中的功率电路连接图如图1所示。

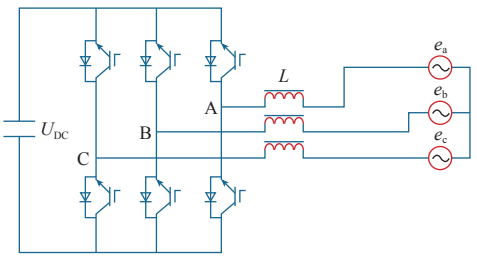

图1　三相光伏并网逆变器拓扑结构图

三相光伏并网逆变器的工作原理就是通过控制逆变器装置中的开关管从而控制逆变器交流侧输出电压的大小和

中国知网　https://www.cnki.net

相位，当逆变器交流侧输出电压的相位超前于电力系统电压时，就可以使得有功电流流向电力系统，从而也就有效地实现了光伏发电的有功功率输送到电力系统中。

系统数学模型与新型控制策略分析

1. 系统数学模型

基于L型滤波器三相光伏并网逆变器系统电路连接图如图1所示。不计输电线路阻抗时，三相光伏并网逆变器接入点电压即为电网电压。电网电压为三相对称正弦波，令其相电压有效值为V_s，三相光伏并网逆变器装置交流侧输出的三相基波电压有效值为V_c。

电流取从电网流入到逆变器的方向，可得

$$\begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{pmatrix} + L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + R\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \tag{1}$$

该系统在三相abc静止坐标系下的数学模型，再经过坐标变换可得该系统在dq坐标系下的简化数学模型，详细推导见参考文献[6-7]，即

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} = -Ri_d + \omega Li_q + v_{sd} - v_{cd} \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} = -Ri_q - \omega Li_d + v_{sq} - v_{cq} \end{cases} \tag{2}$$

式中，v_{sd}、v_{sq}为电网电压在dq坐标系下的分量；v_{cd}、v_{cq}为逆变器交流侧基波电压在dq坐标系下的分量。

根据式（2）的数学模型，可得出其控制系统结构框图，该装置的控制系统一般设计为电压外环和电流内环控制。电压外环主要完成逆变器直流侧电容电压稳定的控制，电流内环主要完成指令电流的跟踪控制。传统的双闭环解耦控制控制框图如图2所示。

V_{dc-ref}为设定的逆变器直流侧电压给定值；i_d^*为直流侧电压采样值与V_{dc-ref}的差经控制器后得出的有功指令；i_q^*为无功电流指令值，在并网逆变器中一般设置为0。

2. 新型控制系统设计

由上述光伏并网逆变器在dq坐标下传统双闭环解耦控制框图可知，传统控制系统中需要知道连接电感L的准确值，由于工艺和材料的差异，电感L的值无法准确测得，而且光伏并网逆变器系统在运行过程中由于电流过大会导致电感出现饱和等情况，这将会导致光伏并网逆变器输出的有功以及无功电流无法准确跟踪上有功和无功电流指令，由此可能会让整个系统控制崩溃。

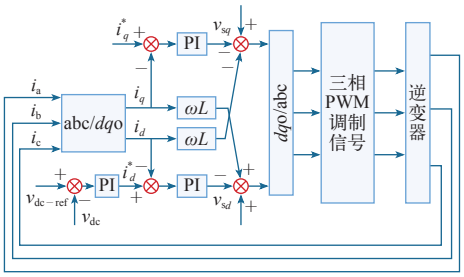

图2 dq坐标下传统解耦控制框图

下面就基于光伏并网逆变器数学模型的基础上提出一种无须知道电感L值的新型控制策略，由上述可知光伏并网逆变器在dq坐标系下的数学模型如式（2）所示。

对光伏并网逆变器的数学模型，引入中间变量x_1、x_2，其中经坐标变换$v_{sd}=\sqrt{2}V_s$，$v_{sq}=0$，可得

$$\begin{cases} x_1 = \sqrt{2}V_s - v_{cd} + \omega Li_q \\ x_2 = 0 - v_{cq} - \omega Li_d \end{cases} \tag{3}$$

经过整理可得

$$\begin{cases} v_{cd} = \sqrt{2}V_s + \omega Li_q - x_1 \\ v_{cq} = -\omega Li_d - x_2 \end{cases} \tag{4}$$

上式中需要知道电感L的准确值，因此对上式中电感值L的设计如下的PI控制参数

$$\begin{cases} \omega Li_d = \dfrac{K'_{Id}}{s}(i_d^* - i_d) \\ \omega Li_q = \dfrac{K'_{Iq}}{s}(i_q^* - i_q) \end{cases} \tag{5}$$

对于x_1、x_2，可以设计如下的PI控制参数

$$\begin{cases} x_1 = \left(K_{Pd} + \dfrac{K_{Id}}{s}\right)(i_d^* - i_d) \\ x_2 = \left(K_{Pq} + \dfrac{K_{Iq}}{s}\right)(i_q^* - i_q) \end{cases} \tag{6}$$

将式（5）和式（6）带入式（4）中可得

中国知网 https://www.cnki.net

$$\begin{cases} v_{cd} = \sqrt{2}V_s + \dfrac{K'_{Iq}}{s}(i_q^* - i_q) - \left(K_{Pd} + \dfrac{K_{Id}}{s}\right)(i_d^* - i_d) \\ v_{cq} = -\dfrac{K'_{Id}}{s}(i_d^* - i_d) - \left(K_{Pq} + \dfrac{K_{Iq}}{s}\right)(i_q^* - i_q) \end{cases} \tag{7}$$

根据式（7）可以得出光伏并网逆变器新型解耦控制策略框图如图3所示。

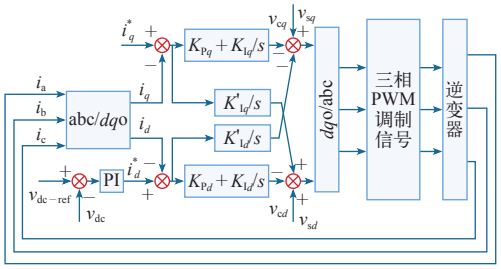

图3　*dq*坐标下新型解耦控制框图

从图3中可以看到，*dq*轴耦合部分可以分别进行参数整定，其中含有电感*L*的部分被替换，因此该控制策略中电感量的影响就不存在了。

系统仿真与实验验证

在Matlab中搭建了基于新型双闭环控制策略光伏并网逆变器系统的仿真模型如图4所示，其主参数为：电网线电压有效值380 V，基波频率50 Hz，采用空间矢量调制算法，载波频率取10 kHz。

根据上述所搭建的光伏并网逆变器系统仿真模型进行系统的双闭环控制仿真。整个仿真的时间设为0.2 s，并设置并网无功电流为0，单位功率因数并网，而并网有功电流从0—10 A—20 A变化，以验证基于新型双闭环控制策略光伏并网逆变器系统能够很好地运行。

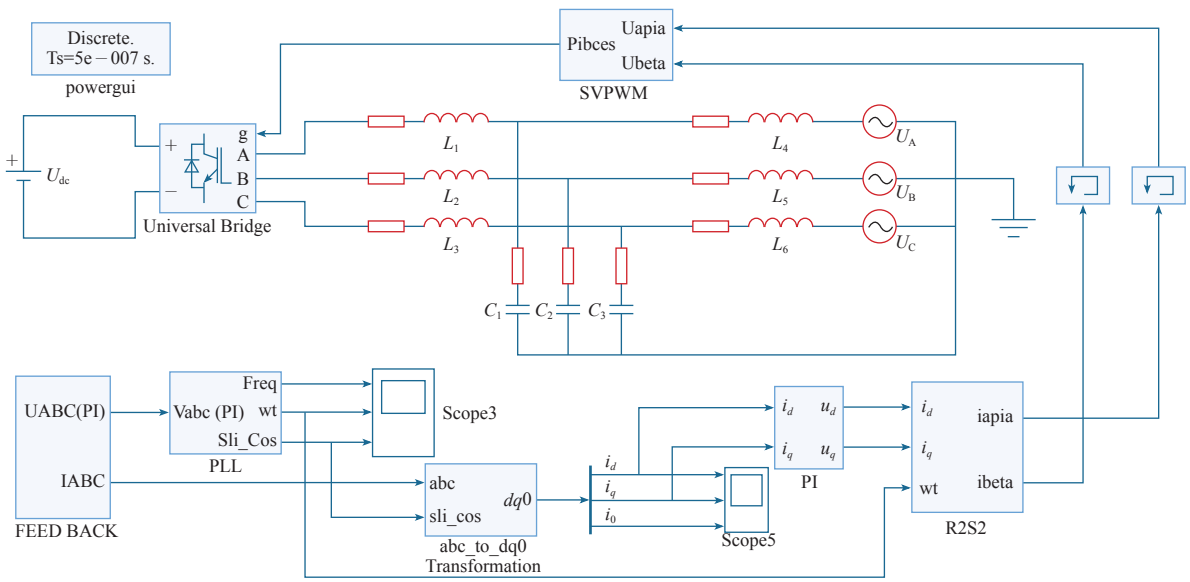

图4　光伏并网逆变器系统的仿真模型

光伏并网逆变器输出的A相电流i_{sa}与电网电压v_{sa}波形如图5所示，从仿真波形图中可以看出，光伏并网逆变器输出的电流与电网电压的相位基本一致，如此保证光伏系统发出的电能可以以单位功率因数的形式并入电网。

为了进一步验证该系统的可行性，搭建了15 kW的光伏并网逆变器实验平台[8-9]，如图6所示，其中控制策略采用上述新型双闭环的控制算法，并进行并网实验。具体实验参数如下表所示。

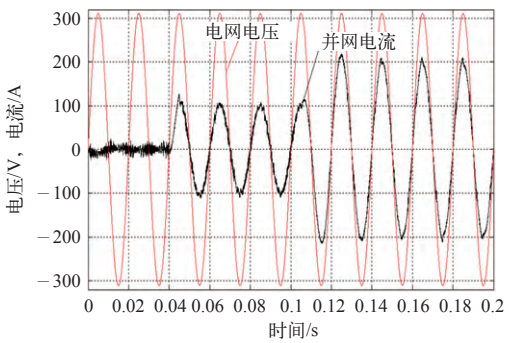

图5　光伏并网逆变器系统A相电流和并网电压仿真波形

中国知网　https://www.cnki.net

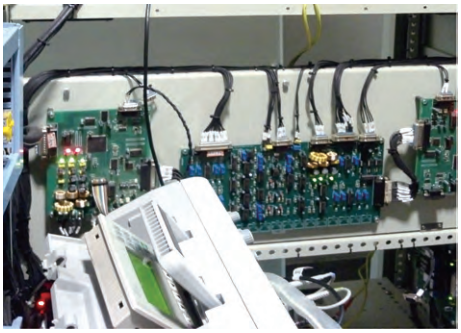

图6　逆变器装置控制电路实物图

表　实验参数

隔离变压器电压比K	380：80	阻尼电阻R /Ω	2.4
变压器漏感L_f/mH	0.8	直流母线电压U_{DC}/V	760
逆变器侧电感L_1/mH	3.2	直流侧电容C/μF	1 100
滤波电容C_f/μF	15	开关频率f_s/kHz	4.8

光伏并网逆变系统A相电流和并网电压的波形如图7所示，从图7中看出并网电流和系统电压基本同相位，由此说明光伏系统是以单位功率因数并网，同时也证明了该新型解耦控制策略的正确性。

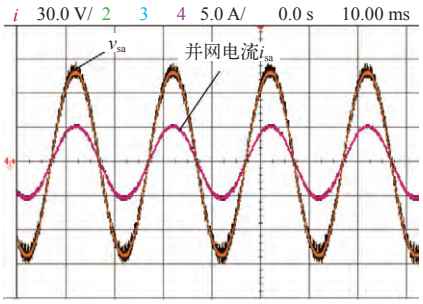

图7　光伏并网逆变器系统A相并网电流和电压试验波形

结束语

本文主要就传统解耦控制的连接电感量值不准确或者变化导致系统失去控制等问题提出一种改进方法，这种新型的控制策略无须知道电感L的值，消灭了电感量变化带来的控制影响。而后接着按照上述的理论在Matlab中搭建了新型解耦控制系统仿真模型，通过典型的PI控制方法实现了整个系统的控制，仿真结果验证了新型PI参数整定和dq解耦控制策略的正确可行性。最后进行了系统模拟实验，实验结果与理论分析基本相符，该方法对光伏并网逆变技术在电力系统中应用起到重要的影响。

参考文献

[1] 苏建徽，余世杰，赵为，等．数字式太阳电池阵列模拟器 [J]．太阳能学报，2002，23 (1)：111-114．

[2] 陈坚．电力电子学——电力电子变换和控制技术 [M]．2版．北京：高等教育出版社，2002．

[3] 彭双剑，罗安，荣飞，等．LCL 滤波器的单相光伏并网控制策 [J]．中国电机工程学报，2011，31 (21)：17-24．

[4] Bouafia A，Gaubert J P，Krim F．Predictive direct power control of three-phase pulsewidth modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM) [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2010，25 (1)：228-236．

[5] 刘飞，段善旭，查晓明．基于LCL 滤波器的并网逆变器双环控制设计 [J]．中国电机工程学报，2009，29 (增刊)：234-240．

[6] 许湘莲．基于级联多电平逆变器的STATCOM及其控制策略研究 [D]．武汉：华中科技大学，2006．

[7] 徐志英，许爱国，谢少军，等．采用LCL 滤波器的并网逆变器双闭环入网电流控制技术 [J]．中国电机工程学报，2009，29 (27)：36-41．

[8] Twing E，Holmes D G．Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2003，18 (5)：888-895．

[9] 吴云亚，谢少军，阚加荣，等．逆变器侧电流反馈的LCL并网逆变器电网电压前馈控制策略 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (6)：54-60．

（收稿日期：2015－03－31）EA

中国知网 https://www.cnki.net