

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.026

基于电网电压定向的三相光伏 并网逆变器并网控制策略研究*

何 蛟,徐艺绯,张德华*

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对三相光伏并网逆变器系统稳定性及谐波抑制的问题,对基于电网电压定向的三相光伏并网逆变器双环控制策略进行了研究。在介绍 SVPWM 并网策略的思想和原理的基础上,建立了光伏并网系统的数学模型,并逐步实现了双环控制的设计,给出了各参数的详细设计过程,利用 Matlab/Simulink 对所提出的双环控制策略进行了仿真;并搭建了硬件平台,对整个控制系统进行了实验。研究结果表明,该系统能够稳定可靠的运行,并网电流质量达到国家并网标准,可以实现安全并网。

关键词:SVPWM;三相逆变器;双环控制

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0424-05

Control strategy of three-phase grid-connected photovoltaic inverter based on grid voltage orientation

HE Jiao, XU Yi-fei, ZHANG De-hua

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to guarantee the stability of grid-connected inverter and suppress its total harmonic distortion (THD), the dual-loop control strategy of three phase photovoltaic (PV) inverter based on grid voltage orientation was investigated. With the introduction of the principle and idea of SVPWM grid-connected strategy, the model of the inverter system was constructed, and the design procedure of the control strategy was described, the detailed design process of parameters was displayed. By using Matlab/Simulink, the control strategy of the three-phase photovoltaic grid-connected inverter was simulated. The hardware platform of dual-loop control system was built, and the whole system was verified. The experimental results show that the inverter system is stable and the output current is expected to reach synchronization with the grid voltage, the quality of output current meets the specified requirements.

Key words: SVPWM; three phase inverter; dual-loop control

0 引 言

近年来,能源短缺和环境恶化逐渐成为全球关注的热点。太阳能作为一种极具潜力的新能源,是太阳内部不断的核聚变反应而产生的能量。太阳能光伏发电是太阳能利用的一种重要形式,主要采用光伏电池

将光能转换为电能。与其他发电方式相比,光伏发电具有能源转换效率高、资源储量丰富、环境友好、易于管理和维护,建造和拆除方便等等优势^[1]。目前,光伏系统正在由独立运行向并网发电方向发展,三相电压型并网逆变器的性能是光伏并网系统的关键和核心。为获得高品质并网电流,系统通常采用双闭环控

收稿日期:2014-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107117)

作者简介:何 蛟(1989-),男,四川绵阳人,主要从事三相光伏并网逆变器方面的研究。E-mail:wenyuan_he0312@126.com

通信联系人:张德华,女,副教授,硕士生导师。E-mail:eedhzh@zju.edu.cn

制。其中电流内环动态性能是系统控制关键,直接影响着电压外环的控制性能和稳定性。

1 电压空间矢量脉宽调制 SVPWM

电压空间矢量脉宽调制 SVPWM 技术是近几年出现的,这种技术本质上是可以提供一个最优开关模式,使得转换设备的应力和开关损耗减少,同时,线电流波形也得到改善。因为 SVPWM 控制策略的开关损耗小,直流电压利用率高,消除谐波的效果好,它被广泛用于可替代的电流速度调节系统。

单级式光伏并网发电系统示意图如图 1 所示。

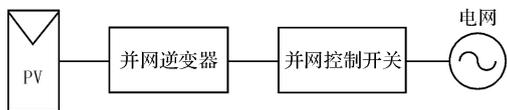


图 1 单级式光伏并网发电系统示意图

SVPWM 是一种性能优越的易于数字化实现的 PWM 方案,最初主要用于 PWM 整流器及电机控制,主要研究方向为如何获得幅值恒定的圆形旋转磁场。随并网控制技术的发展,这种技术也广泛应用于逆变器的并网控制中。

在光伏并网逆变器的控制中,依据逆变器空间电压矢量切换来控制逆变器是一种新颖思路,它能在功率开关器件频率不高的情况下输出质量较好的正弦波,并且能提高直流电压的利用率。空间矢量脉宽调制具有线性调节范围宽、直流电压利用率高、输出谐波小和易于数字化实现等特点^[2]。

SVPWM 技术本质上并不复杂,相当于在三相对称的正弦波参考信号中注入零序分量并利用规则采样来实现的 SPWM 技术。与传统的 SPWM 相比,其开关器件的开关次数可以减少 1/3,直流电压的利用率可提高 15%,能获得较好的谐波抑制效果,且易于实现数字化控制,但是,常规 SVPWM 方法需要进行复杂的三角函数和坐标旋转运算,计算量大,复杂的算法对高精度实时控制产生了不可忽视的影响^[3]。

2 三相逆变器的数学建模

2.1 数学模型概述

三相逆变桥是光伏系统的核心,PV 阵列输出的直流电,经过逆变过程,可以变成工频交流电,从而实现

并网。三相并网逆变器主要有两平逆变桥、三电平逆变桥、H 桥并联等几种典型拓扑,目前的研究中,两电平逆变器拓扑结构应用最广泛^[4-5]。该拓扑结构简单,易控制,更易实现 SVPWM 调制技术,故本研究采取该拓扑。其结构如图 2 所示,其中,定义 e_a, e_b, e_c 分别是三相电网的电压,中点设定为 O 。经过逆变后的并网电流分别设为 i_a, i_b, i_c 。图 2 也给出了电压和电流的正方向。逆变器桥臂输出电压分别定义为 V_a, V_b, V_c, L 代表滤波电感, R 是滤波电感的等效电阻。基于逆变器的数学模型,本研究可以作如下假设:①电网电动势是三相对称的正弦波。②系统中的电感和电容均是理想器件。③开关管都被认为是理想的,因此开关死区时间可以被忽略。

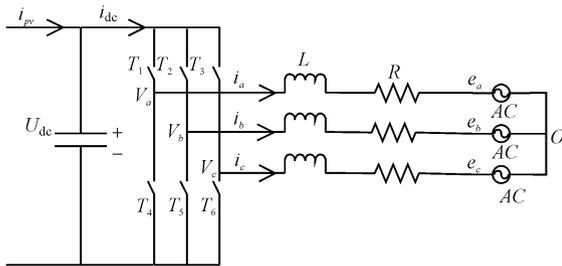


图 2 三相逆变器的拓扑结构

在本研究中,综合多方面考虑,最终选定的三相并网逆变器的等效模型如图 3 所示。

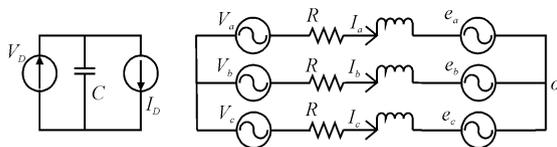


图 3 三相逆变器的等效电路

2.2 dq 坐标系下的解耦

由三相并网逆变器在 dq 坐标系下的数学模型,可以得到:

$$\begin{aligned}
 e_d &= V_d - i_d R - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q \\
 e_q &= V_q - i_q R - L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

由式(1)可知, d 轴和 q 轴的分量是耦合的,这样,问题就变得比较复杂,不便于本研究的设计和,因而,需要对模型进行解耦。

又因为, dq 坐标下可以看出,相比于 d 轴, q 轴的电流很小,因此,可以认为 q 轴电流几乎不影响 d 轴,那么,由式(1)变形为:

$$\begin{aligned} i_d R + L \frac{di_d}{dt} &= v_d + \omega L i_q - e_d \\ i_q R + L \frac{di_q}{dt} &= v_q + \omega L i_d - e_q \end{aligned} \quad (2)$$

假设:

$$\begin{aligned} v'_d &= v_d + \omega L i_q - e_d \\ v'_q &= v_q + \omega L i_d - e_q \end{aligned} \quad (3)$$

联立式(2,3),可以得到:

$$\begin{aligned} i_d R + L \frac{di_d}{dt} &= v'_d \\ i_q R + L \frac{di_q}{dt} &= v'_q \end{aligned} \quad (4)$$

上式中, d 轴和 q 轴的电流是独立控制的, 等效控制变量 v'_d 和 v'_q 可以由电流环 PI 调节器输出决定, 假设 Δv_d 和 Δv_q 分别是 d 轴和 q 轴电流调节器的输出, 那么:

$$\begin{aligned} v'_d &= \Delta v_d - 0 = K_{pi} (1 + 1/\tau_{pi}s) (i_d^* - i_d) \\ v'_q &= \Delta v_q - 0 = K_{pi} (1 + 1/\tau_{pi}s) (i_q^* - i_q) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: K_{pi} —比例系数; τ_{pi} —积分时间常数; d 轴和 q 轴的指令电流分别是 i_d^* 和 i_q^* , 联立上式, 可以得到:

$$\begin{aligned} v_d &= K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi}s} \right) (i_d^* - i_d) - \omega L i_q - e_d \\ v_q &= K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi}s} \right) (i_q^* - i_q) - \omega L i_d - e_q \end{aligned} \quad (6)$$

电流状态反馈的引入, 使得 d 轴和 q 轴的电流得以实现独立控制。考虑到整个逆变系统的动态性能, 本研究将电网电压作为前馈补偿, 同时, 控制系统的稳定性也有良好的表现。

3 双环控制及仿真

控制系统由直流电压外环和电流内环组成。电压外环的作用是为了调节电压。当引入电压反馈, 在 dq 坐标下, 通过一个 PI 调节器就可实现电压的无静差控制^[6-8]。电流内环的主要作用是让并网电流能够精准地跟踪电网电压, 并且保证并网逆变器的单位功率因素运行。电流内环是在 dq 坐标中实现控制的, 电流内环 PI 调节器的输出信号经过 $dq/\alpha\beta$ 逆变换之后, 就能通过空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 得到并网逆变器相应的开关驱动信号, 最终实现了三相光伏并网逆变器的并网控制^[9]。电流环的设计如图 4 所示。

3.1 电流内环控制原理及其设计

图 4 中, T_a, T_b, T_c —时间常数, 取 $T_a = 0.1T_s, T_b =$

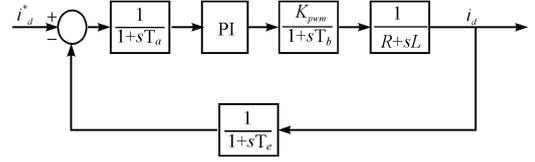


图 4 电流环的设计

T_a —电流采样延迟时间, T_b —逆变器全桥电路固有的延迟时间常数, T_c —反馈电流信号的滤波时间常数

$0.5T_s, T_c = nT_s, T_s$ —开关周期, K_{pwm} —逆变器增益。则, 电流内环的开环传递函数为:

$$G_{io}(s) = \frac{1}{1 + T_1 s} \cdot \frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{K_{pwm}}{1 + T_b s} \cdot \frac{1}{sL + R} \cdot \frac{1}{1 + T_c s} \quad (7)$$

采用一个一阶惯性环节 $\frac{1}{1 + T_s}$ 来代替上式中的 3 个小惯性环节, 其中:

$$T = T_a + T_b + T_c = (0.6 + n) T_s \quad (8)$$

为了便于设计, 取:

$$\frac{k_p}{k_i} = \frac{L}{R} \quad (9)$$

将式(8,9)代入式(7), 可得:

$$G_{io}(s) = \frac{k_p K_{pwm}}{sL(1 + sT)} \quad (10)$$

式(10)是一个典型的二阶系统, 闭环函数如下:

$$\Phi_{ic}(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{k_p K_{pwm}}{TLs^2 + Ls + k_p K_{pwm}} \quad (11)$$

取最佳阻尼比, 经过与典型二阶系统函数的形式比对后, 可以得到:

$$k_p = \frac{L}{4\delta^2 TK_{pwm}} \quad (12)$$

$$k_i = \frac{R}{4\delta^2 TK_{pwm}} \quad (13)$$

当开关频率很高的时候, T_s 就会很小, T 也会很小, 电流闭环的传递函数 s^2 项系数远小于 s 项系数, 所以, s^2 可以忽略, 电流内环可以近似等效成一个惯性环节。电压环的设计如图 5 所示。

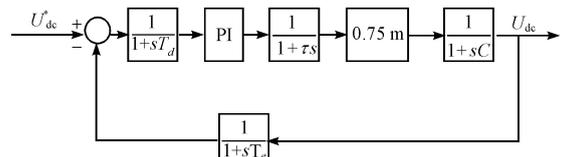


图 5 电压环的设计

T_d —电压外环采样时间, T_e —电压外环反馈信号的滤波时间常数

3.2 电压外环控制原理及其设计

图 5 中, $T_d = 0.1T_s, T_e = gT_s$ 。电压外环传递函

数是:

$$G_{uo}(s) = \frac{1}{1 + T_d s} \cdot \frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{0.75m}{1 + \tau s} \cdot \frac{1}{sC} \cdot \frac{1}{1 + T_e s} \quad (14)$$

其中,PWM 调制比为 1,可以把电流环,电压采样和电压反馈延迟 3 个惯性环节合并为一个小惯性环节,则 $T_u = T_d + T_e + \tau$,于是上式可化简为:

$$G_{uo}(s) = \frac{0.75k_i \left(1 + \frac{k_p}{k_i} s\right)}{Cs^2 (1 + T_u s)} \quad (15)$$

按照三阶系统的最佳参数来设计,电压环可得到最大的相角裕度和较快的响应速度,典型的三阶系统开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K(1 + T_1 s)}{s^2(1 + T_3 s)} \quad (16)$$

对照可以得到:

$$k_p = \frac{5C}{6T_u} \quad (17)$$

$$k_i = \frac{5C}{6T_u^2} \quad (18)$$

3.3 三相光伏并网逆变器双环控制的仿真

根据设计的三相光伏并网逆变器及其控制策略,本研究在 Matlab/Simulink 环境下搭建系统的仿真模型,进行验证。仿真模型的参数如表 1 所示。

表 1 基于电网电压定向的矢量控制仿真参数

参数	项目
三相逆变器额定容量/kVar	10
电网相电压(有效值)/V	220
逆变器额定输出相电压频率/Hz	50
开关频率/kHz	20
滤波电感/H	0.000 6
电阻/ Ω	0.05

三相并网电流波形如图 6 所示。由图 6 可以看出,三相波形具有很好的对称性,且谐波较小,总谐波畸变率 $THD = 0.13\%$ 。并网指令电流由 50 A 跌落至 10 A 时的仿真并网电流波形如图 7 所示,可以看出,该控制系统具有良好的动态响应过程,并网电流能够很快达到稳态。

并网电压与电流波形如图 8 所示。从稳态运行时的仿真波形可以看出,在同一个频率下,并网电流和并网电压同相位,并且,并网电流能够很好地跟踪电网电压,能够实现单位功率因数的并网运行。

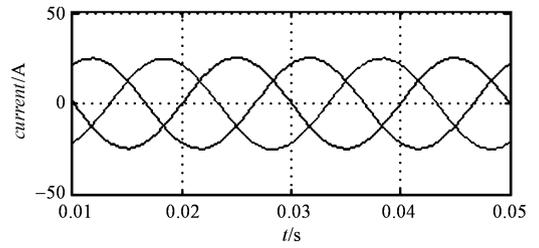


图 6 并网电流波形

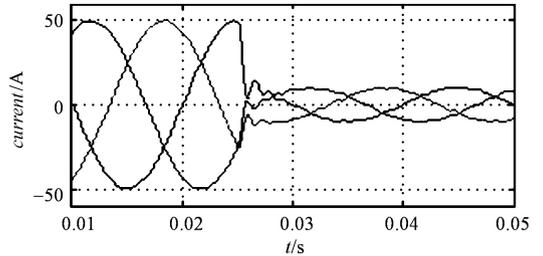


图 7 负载变化时并网电流波形

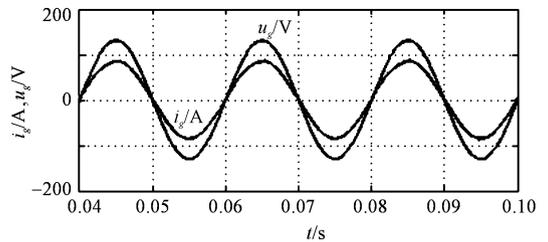


图 8 并网电压与电流

4 实验及结果分析

基于 TI 公司 DSP28335 优异的控制性能^[10],本研究以其 ePWM 模块为基础,搭建了实验硬件平台,对本研究提出的策略进行了实验验证。实验中,电流传感器主要采用了 ACS714 系列,开关器件主要为 STB11NM80 系列,A/D 采样主要使用了 DSP28335 自带的采样模块。

硬件平台的开关驱动波形如图 9 所示。并网电压和并网电流波形如图 10 所示,由图 9、图 10 可以看出,并网电流能够很好地跟踪并网电压,实现了单位功率因素运行。对并网电流的 THD 分析如图 11 所示。

在图 11 中,A 点和 B 点分别为开关频率处和二倍开关频率处的谐波量。可以看出,电网电流谐波主要集中在开关频率以及二倍开关频率处,三倍及以上开关频率处的谐波很小,基本可以忽略。由谐波分析软件得到并网电流总谐波畸变 $THD = 3.6\%$ 。

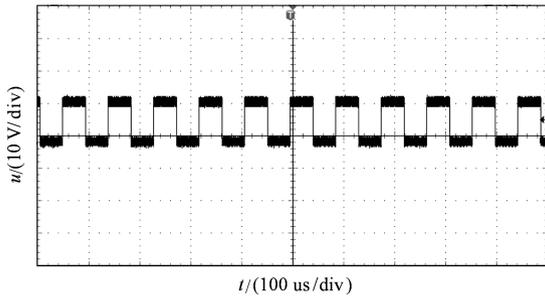


图 9 开关驱动波形

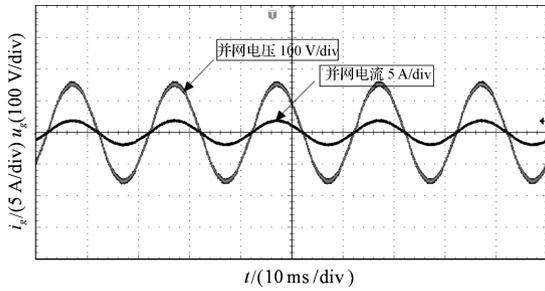


图 10 并网电压和电流的波形

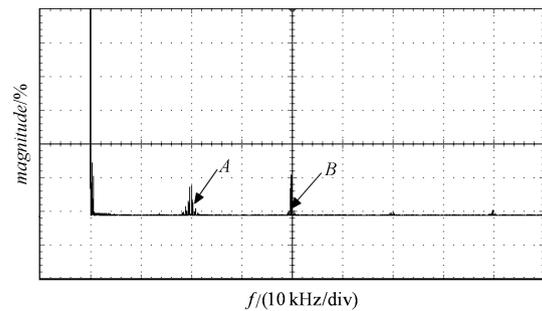


图 11 并网电流 THD 分析

5 结束语

本研究利用 Matlab/Simulink 对所提出的双环控制策略进行了仿真。研究表明,三相光伏并网逆变器的双环控制设计策略设计的系统稳定性高,动态

响应好,输出的电能质量也达到了国际标准,可以实现安全并网。

参考文献 (References):

- [1] 朱晓亮. 基于电网电压定向三相并网逆变器的研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2010.
- [2] 周雪松,宋代春,马幼捷,等. 光伏并网逆变器的控制策略[J]. 华东电力,2010(1):80-83.
- [3] 周卫平,吴正国,唐劲松,等. SVPWM 的等效算法及 SVPWM 与 SPWM 的本质联系[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2):133-137.
- [4] 张 兴,曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [5] KADRI R, GAUBERT J P, CHAMPENOIS G. An improved maximum power point tracking for photovoltaic grid-connected inverter based on voltage-oriented control [J]. **IEEE Trans. Ind. Electron.**, 2011, 58(1):66-75.
- [6] YAN S, ZHANG Q, DU H. A simplified SVPWM control strategy for PV inverter[C]. // **Control and Decision Conference (CCDC)**. 2012 24th Chinese. IEEE, 2012: 225-229.
- [7] 陈瑞睿,陈辉明,王正仕. 光伏发电系统并网逆变器控制策略研究[J]. 机电工程,2013,30(5):619-622.
- [8] 于 宁,何通能,王泽锴. 基于 DSP 的三相逆变并网同步控制算法及实现[J]. 机电工程,2013,30(7):878-881.
- [9] 王斯成,余世杰,王德林,等. 3 kW 可调型并网逆变器的研制[J]. 太阳能学报,2001,22(1):17-20.
- [10] 符 晓,朱洪顺. TMS320F2833x DSP 应用开发与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

何 蛟,徐艺菲,张德华. 基于电网电压定向的三相光伏并网逆变器并网控制策略研究[J]. 机电工程,2015,32(3):424-428.

HE Jiao, XU Yi-fei, ZHANG De-hua. Control strategy of three-phase grid-connected photovoltaic inverter based on grid voltage orientation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(3):424-428.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>