

# 光伏并网逆变器控制策略的仿真与试验研究

张浩 刘文达 蒋炜

(中国船舶重工集团公司七一二研究所, 武汉 430064)

**摘要:** 光伏并网逆变器作为光伏并网发电系统与电网接口的主要设备, 其控制技术已成为研究的热点。本文简要介绍了光伏并网逆变器系统的结构和工作原理, 重点分析了其并网工况的控制方案设计及其电流调节器的实现过程。最后, 在MATLAB/SIMULINK环境下进行了系统的建模与仿真, 仿真结果表明输出并网电流波形良好、和电网电压同频同相。

**关键词:** 并网逆变器 电流跟踪控制 闭环控制 电流调节器

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A **文献分类号:** 1003-4862 (2010) 010-0043-04

## Simulation and Experiment of Control Technology for Photovoltaic Generation Grid-connected Inverter

Zhang Hao, Liu Wenda, Jiang Wei

(Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion, CSIC, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** *The grid-connected inverters control technology becomes a research hotspot, because the inverter is an important equipment, which connects the photovoltaic grid-connected system and the grid. At first, the structure and the principle of the photovoltaic grid-connected system are introduced in brief, then the control scheme and its current regulator implementation are analyzed in detail. Finally, the modeling and the simulation of the system based on MATLAB/SIMULINK environment are presented and the experiment verifies that the output wave of grid-connected current is better, and has the same frequency and phase as utility grid.*

**Key words:** *grid-connected inverter; current tracking control; closed loop control; current regulator;*

### 1 引言

当前, 随着石油能源的高度消耗, 能源危机愈来愈盛, 同时石化能源的开采、运输和利用对环境的影响和破坏也不容忽视。世界上主要发达国家都开始重视可再生能源的利用和研究。所有再生能源中, 光伏发电是利用最灵活、最可行的一种能源。因此, 在我国政府的高度重视下太阳能光伏并网发电也被列入了重点扶持的范围。光伏并网发电是利用太阳能发电的一种有效方式, 光伏并网发电系统需要采用并网逆变器作为电能转换装置将光伏阵列所输出的直流电转换成交流

电送入电网<sup>[1]</sup>。

光伏并网发电系统的核心是并网逆变器, 其控制系统的好坏直接影响整个系统的性能。为了达到并网逆变器输出电流的幅值与相位可控并可快速跟随电网电压实现能量回馈的目的, 一般采用电流内环及电压外环的双闭环控制结构, 其中电压外环用于控制逆变器的输出电压, 电流内环实现网侧电流的波形和相位控制, 电流内环的动态性能直接影响电压外环的控制性能和稳定性。因此, 本文通过在同步坐标系中将三相交流电流分解转换成直流量, 分别对有功电流和无功电流控制的基础上, 采用基于空间矢量的调制方式控制并网电流, 相对与采用滞环控制方式具有实时控制、电流响应快、输出电压电流波形不含特定次谐波等优点, 且功率器件的开关频率固定的优

收稿日期: 2010-06-12

作者简介: 张浩 (1981-), 男, 硕士, 研究方向: 舰船综合电力推进系统。

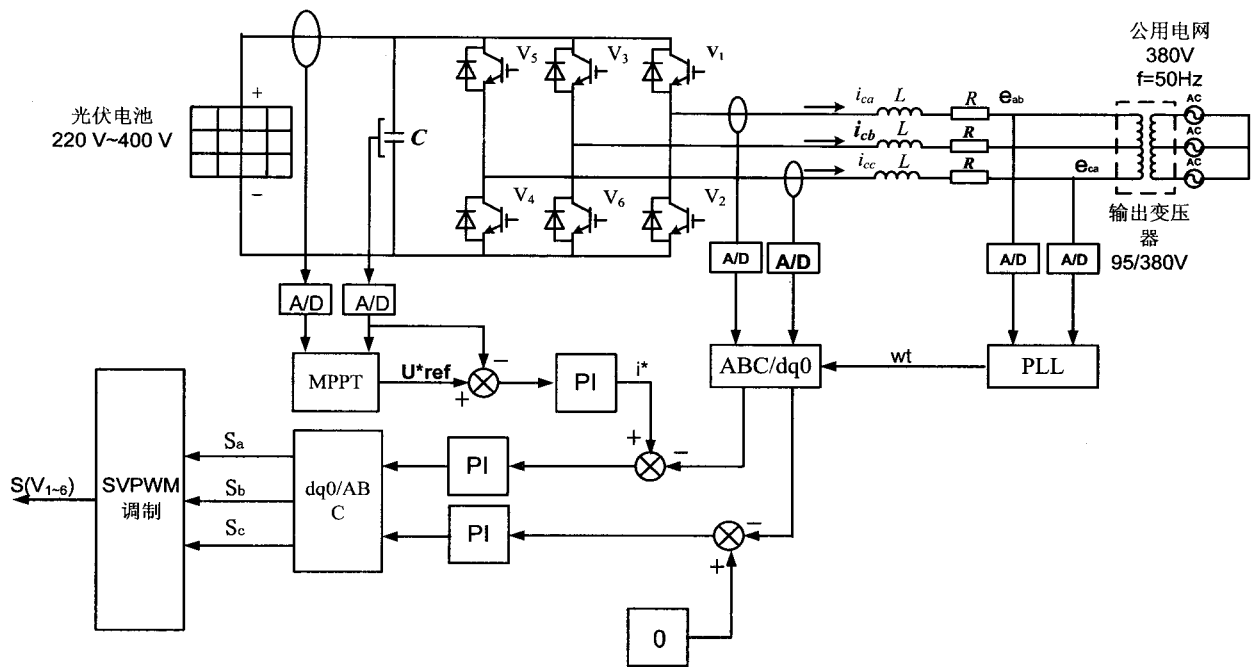


图 1 三相 VSR p-q 解耦矢量控制法结构框图

点。控制框图如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

## 2 光伏并网系统原理

系统的基本控制过程如下：首先，控制系统将采集到的并网逆变器输出三相电流  $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$  经过 Clark 变换和 Park 变换后，分解为有功电流量和无功电流量，再与指令电流比较后经过 PI 电流调节器后生成新的逆变器控制指令；由于并网逆变器通常需要控制为单位功率因数运行，因此，令无功电流为零，而有功电流的指令由 MPPT 控制器给出。为使并网系统的有功功率输出达到最大，须采用锁相技术控制输出电流的频率和相位与电网电压严格同步，此时采集电网电压  $e_{ca}$ 、 $e_{cb}$ 、 $e_{cc}$ ，利用式(1)将所测得的电网电压进行变换，然后采用相应算法利用反正切函数求得电网矢量电压旋转角度  $\theta$ ， $\theta$  角为同步旋转 d-q 坐标系下 q 轴与电网 A 相坐标轴之间的角度。见图 2<sup>[3]</sup>。

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \\ e_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ca} \\ e_{cb} \\ e_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在静止三相 ABC 坐标系下，三相电流并网状态方程可由下式 (2) 来描述：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{ca} \\ e_{cb} \\ e_{cc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

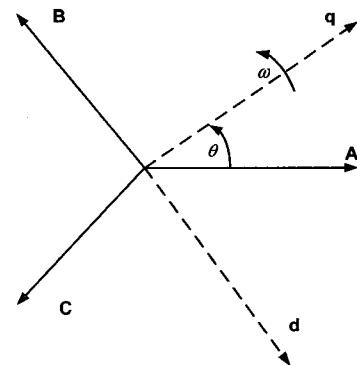


图 2 静止 ABC 与同步旋转 d-q 坐标系间的变换式中忽略电感内阻 R。

为了实现有功电流和无功电流分别控制的目的，将基于静止 ABC 坐标系的并网方程 (2) 变化为同步 d-q 坐标系下的状态方程 (3)。这样所有的交流量变换为直流量，有利于 PI 电流调节器对并网电流进行闭环控制。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_{cd} \\ e_{cq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中，下标 d、q 代表 d-q 轴参数量； $\omega$  为电网基波电压旋转角度。

假设三相电网电压为不含任何谐波的正弦分量，应用 Park 变换可得 d-q 坐标系下<sup>[4]</sup>：

$$\begin{cases} U_{cd} = V \\ U_{cq} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $V$  为电网每相电压的峰值。

再根据三角函数的关系, 在同步旋转  $d$ - $q$  坐标系下, 三相光伏并网系统输送到电网的有功和无功功率为:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(U_{cd}i_d + U_{cq}i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(U_{cd}i_q - U_{cq}i_d) \end{cases} \quad (5)$$

再结合上式 (2-4) 可得:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}U_{cd}i_d = \frac{3}{2}i_dV \\ Q = \frac{3}{2}U_{cd}i_q = \frac{3}{2}i_qV \end{cases} \quad (6)$$

根据上式 (6) 可知, 光伏并网系统输出到电网的有功功率依据  $d$  轴电流  $i_d$  进行调节, 输送到电网的无功功率依据  $q$  轴电流  $i_q$  调节。因此在同步旋转坐标系下通过对  $d$ - $q$  轴电流分别控制就可以实现光伏并网系统输送到电网的有功和无功的解耦控制并且可通过控制  $d$  轴  $i_d$  电流, 调节光伏阵列输出电压实现光伏并网系统的转换效率, 间接提高了系统的经济效益, 同时控制  $q$  轴电流  $i_q$  为 0, 可以使光伏阵列通过电压源型逆变器输出并网电流完全与市电电压相位相同, 功率因数为 1<sup>[5]</sup>。

### 3 电流调节器的设计

光伏并网逆变器的控制目标是实现输出电流对公用电网电压波形快速准确跟踪, 为了获得期望的稳态和动态性能指标, 光伏并网逆变器的电流调节器需要具有很好的随动性能, 快速的跟踪电流控制环的给定信号。本文根据调节器设计特性选择典型 I 型系统设计内环 PI 电流调节器<sup>[6]</sup>。

在时域内 PI 调节器的传递函数为:

$$G_C(s) = (K_p s + K_i) / s \quad (7)$$

式中:  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,

由图 1 可推导得, 并网逆变器电流控制环的开环传递函数为<sup>[7]</sup>:

$$G_p(s) = \frac{KK_f / R}{(1 + \tau_a s) + (1 + \tau_s s) + (1 + \tau_f s)} \quad (8)$$

式中:  $K$  为逆变桥放大系数,  $K_f$  为电流反馈系数,  $\tau_a$  为输出滤波器时间常数,  $\tau_s$  为开关周期,  $\tau_f$  为反

馈滤波时间常数。

加入电流调节器后的 PI 校正环后, 可以推导出电流环开环的传递函数为:

$$G'_p(s) = \frac{\left(\frac{K_{ip}}{K_i} s + 1\right) KK_f K_u / R}{s(1 + \tau_a s)[(1 + \tau_s + \tau_f)s]} \quad (9)$$

考虑到电流内环需要有较快的电流跟踪特性, 按典型 I 型系统设计, 消去一对零极点, 得出 PI 电流调节器应满足<sup>[8]</sup>:

$$K_{ip} / K_i = \tau_a \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (9) 得到校正为典型 I 型系统的电流开环传递函数形式:

$$G'_p(s) = \frac{KK_f K_u / R}{s[(1 + \tau_s + \tau_f)s]} \quad (11)$$

### 4 仿真验证与比较

为了论证光伏并网控制策略的合理性, 为 10 kW 工程样机的调试提供理论依据, 我们以 MATLAB7.1 仿真软件为平台在 SIMULINK 中进行了原理仿真验证。仿真系统设定: 光伏电池额定直流电压  $U_{dc}=400$  V, 直流母线电容  $C=13400$   $\mu$ F, 输出电抗器  $L=10$  mH, 输出变压器为 Y/ $\Delta$  结构、变比 380/95, 电网电压  $U=380$  V, 频率  $f=50$  Hz, 仿真步长  $1e-3$ 。

假设并网逆变器正常工作时电网相电压峰值 311 V; 外环 MPPT 给定电流有效值为 70 A。并网时的输出电流和电网电压波形如图 3 所示。

通过分析光伏并网逆变器的仿真结果, 如图 4 所示, 可以知道: 通过双闭环控制, 交流侧的输出电流接近理想的正弦波, 交流侧电流(方向为从逆变器往电网方向看)与电网电压同相, 输出谐波 THD 值含量为 3.02%, 低于 5% 的国家标准, 达到了单位功率因数运行。

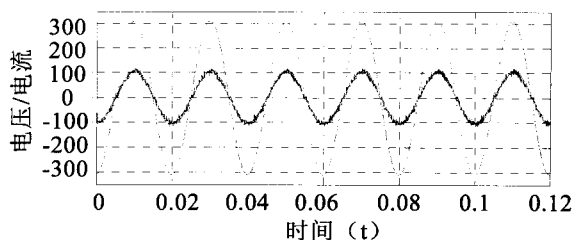


图 3 并网时的输出电流和电网电压波形图

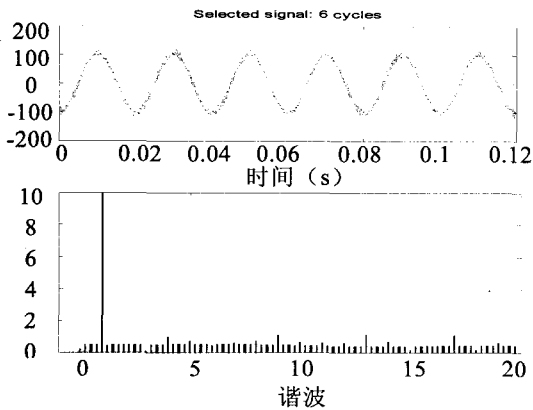


图4 并网时的输出电流的谐波分析图

## 5 结束语

本文通过对 10 kW 光伏并网系统进行了建模和仿真，并在仿真结果的指导下进行了相应的试验研究。试验结果表明，试验与仿真结果基本吻合，从而验证了基于 SVPWM 的双闭环控制方法动态响应速度快，输出电流谐波含量低，功率因数高，可以实现无静差跟踪，不会对电网产生“污染”，做到了经济、环保、节能，具有良好的经济效益和社会效益。

## 参考文献:

- [1] 张崇巍等. PWM 整流器及其控制. 北京: 机械工业出版社[M], 2000.
- [2] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [3] 周德佳, 赵争鸣等. 具有最大功率跟踪算法的光伏并网控制系统及其实现[J]. 中国电机工程学报, 2008(11), 94-100.
- [4] 朱炜锋, 窦伟等. 基于 PI 控制的三相光伏并网逆变器电流控制器设计[J]. 可再生能源, 2009(2), 52-58.
- [5] 许颇, 张崇巍等. 三相光伏并网逆变器控制及其孤岛效应[J]. 合肥工业大学学报, 2006(9), 1139-1143.
- [6] 张兴, 张崇巍等. 采用电流寻优的 MPPT 光伏阵列并网逆变器的研究[J]. 太阳能学报, 2001(3), 306-310.
- [7] 郑诗程, 夏伟. 三相光伏并网系统的控制策略研究[J]. 电力电子, 2007(3), 43-46.
- [8] 王飞, 余世杰等. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005(5), 72-74.

## [海装动态]

### 通用公司再次为美国海军提供 LM2500 用燃气轮机数字式燃油控制系统

[法国航宇防务网 2010 年 5 月 4 日报道] 通用 (GE) 公司将再次为美国海军四艘舰船上的 LM2500 舰用燃气轮机提供 16 套数字式燃油控制 (DFC) 系统。数字式燃油控制系统的维护成本更低，可靠性更高，系统响应更快。

数字式燃油控制系统是 GE 公司最先进的 LM 燃气轮机控制器，该技术现已经成为新 LM2500 和 LM2500+燃气轮机的标准配备。原 LM2500 采用液压机械控制系统。

截至本次合同，美国海军 19 艘舰船总共 76 台燃气轮机已经或即将改造最新的 LM2500 数字式燃油控制系统。在 DDG-51 驱逐舰和 CG-47 巡洋舰已改造的 LM2500 燃气轮机上，数字式燃油控制系统累积运行时间已经接近 180000 小时。安装数字式燃油控制系统成为美国海军舰船系统现代化项目的一部份。

除了用于巡洋舰和高速艇，新 LM2500 燃气轮机也用于各种民用项目中。

数字式燃油控制系统的优点包括：

通过可调定子叶片 (VSV) 的油致动和燃油计量阀，改进了发动机耐燃油污染性。

通过电子反馈和闭路控制达到更精确的燃油/空气配比。此外，可以通过控制软件接口重新校准燃油特性和可调定子叶片的位置。

燃气轮机控制传感器的冗余配置有：压气机出口压力、压气机进口温度和压力、燃气发生器速度、可调定子叶片位置和燃油计量阀位置的。

借助于额外的电力传感器和致动器反馈，改进操作人员信号、报警和查找工作并排除故障。GE 公司的数字式燃油控制系统提高了数据采集和状态监控的能力。

数字式燃油控制系统主要部件包括 1 个燃油计量阀和 2 个可调定子叶片执行器，两者都具有冗余配置的电子反馈。数字式燃油控制系统要求升级燃气轮机控制器和修改船上配线。