

# 三相光伏并网逆变器 SVPWM 电流控制技术研究

芮骥骅, 杜少武, 姜卫东, 赵 钦  
(合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**建立了基于空间矢量脉宽调制(SVPWM)电流控制的三相并网逆变器数学模型,提出了以电网基波频率同步旋转坐标系下电网电压前馈和电流比例积分(PI)控制相结合的三相并网逆变器控制方案.给出了系统的软件锁相环设计,并通过提高模数转换器(ADC)采样频率减小控制延时.样机实验表明,逆变器输出电流谐波含量低,控制方案具有良好的稳态和动态性能.

**关键词:**逆变器; 并网; 空间矢量调制; 锁相

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2010)04-0004-02

## Current Regulation for Three-phased Grid-connected Inverter Based on SVPWM Control

RUI Qi-hua, DU Shao-wu, JIANG Wei-dong, ZHAO Qin  
(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper develops mathematics model of SVPWM-based current controller for three-phased grid-connected inverter and a novel current scheme under two phase synchronous rotating frame is presented, which is combination of grid feed forward controller and PI controller. A kind of software phase-locked and dual-timer sampling scheme which decreases the control delay is proposed. Finally, a laboratory prototype is designed to verify the discussion and analysis. The experimental results show that the proposed scheme has very good dynamic and static properties, meanwhile, highly accurate steady output and less harmonic disturbance is gained.

**Keywords:** inverter; grid-connected; space vector modulation; phase-locked

### 1 引言

光伏并网发电系统核心是三相电压型并网逆变器,其控制系统的设计直接影响整个系统性能.为获得高品质并网电流,系统一般采用双闭环控制.其中电流内环动态性能直接影响电压外环的控制性能和稳定性,是系统控制关键.目前,电压型逆变器的电流控制主要分为间接控制和直接控制.研究了固定开关频率空间矢量脉宽调制(SVPWM)电流控制,与正弦波脉宽调制(SPWM)控制相比,其直流侧电压利用率更高和动态性能更好,同时还可在同步旋转坐标系下方便地消除交流输入的稳态误差.

### 2 光伏并网逆变器数学模型

图 1 示出三相并网逆变器的拓扑结构.在三相静止  $a, b, c$  坐标系下,根据基尔霍夫定律,三相并网逆变器模型可描述为<sup>[1]</sup>:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L+R} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L+R} \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $i_a, i_b, i_c$  为逆变器输出电流;  $u_a, u_b, u_c$  为逆变器输出相电压;  $e_{ga}, e_{gb}, e_{gc}$  为电网相电压;  $L$  为输出滤波电感值;  $R$  为电感内阻和开关管等效内阻.

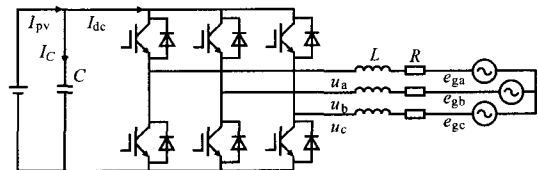


图 1 主电路拓扑结构

图 2 示出三相电网电压矢量旋转角度  $\theta$  及静止  $a, b, c$  与同步旋转  $d, q$  坐标系间的关系。

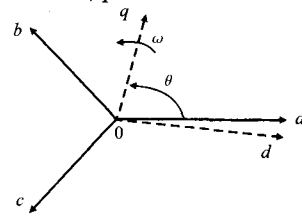


图 2  $a, b, c$  与  $d, q$  坐标系的关系  
考虑三相平衡,通过 Park 变换矩阵:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta+2\pi/3) \\ \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $x$  为相应的电压、电流量;  $\theta$  为  $q, a$  轴间的夹角。

将式(1)变换至  $d, q$  坐标系下:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d - e_{gd} - Ri_d \\ u_q - e_{gq} - Ri_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为电网基波电压旋转角频率。

在同步旋转  $d, q$  坐标系下,三相并网逆变器的有功和无功分别为:

$$P=3(e_{gd}i_d+e_{gq}i_q)/2, \quad Q=3(e_{gd}i_q-e_{gq}i_d)/2 \quad (4)$$

定稿日期: 2009-10-11

作者简介: 芮骥骅(1985-),男,江苏常州人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

如果三相电网电压是理想正弦波, 电网电压在  $d, q$  坐标系下为:  $e_{gd}=U, e_{gq}=0, U$  为电网相电压峰值。

结合上式, 则式(4)可改写为:

$$P=3e_{gd}i_d/2, \quad Q=3e_{gd}i_q/2 \quad (5)$$

由式(5)可知, 在同步旋转坐标系下通过对  $d, q$  轴电流解耦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控制。

### 3 系统控制

图 3 示出了系统控制框图。  $i_d^*$  由 MPPT 算法给定,  $i_q^*=0$ 。在解耦的  $d, q$  轴电流内环控制中, 所有的交流量转换成直流量, 利于 PI 调节器对并网电流进行闭环控制, 最终消除电流的稳态误差。由图 1 可知, 电网电压相当于外部的电压扰动, 且幅值较大, 为此加入电网电压前馈控制, 抵消电网的扰动, 减轻反馈控制的负担。

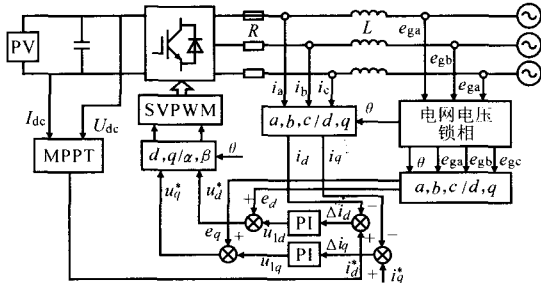


图 3 系统控制框图

#### 3.1 PI 调节器设计

根据式(3), 基于同步旋转  $d, q$  坐标系光伏并网逆变器描述为:

$$u_d=L \frac{di_d}{dt}+Ri_d-\omega Li_q+e_{gd}, \quad u_q=L \frac{di_q}{dt}+Ri_q+\omega Li_d+e_{gq} \quad (6)$$

逆变器  $d, q$  轴变量相互耦合, 解耦实现如下<sup>[2]</sup>:

$$\begin{cases} u_d=-\left(K_{ip}+\frac{K_{ii}}{s}\right)\left(i_d^*-i_d\right)-\omega Li_q+e_{gd} \\ u_q=-\left(K_{ip}+\frac{K_{ii}}{s}\right)\left(i_q^*-i_q\right)+\omega Li_d+e_{gq} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $K_{ip}, K_{ii}$  分别为电流环比例系数和积分系数。

结合式(6), (7), 得解耦后的  $d, q$  轴电流环为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt}=\left[\left(K_{ip}+\frac{K_{ii}}{s}\right)\left(i_d^*-i_d\right)-Ri_d\right]/L \\ \frac{di_q}{dt}=\left[\left(K_{ip}+\frac{K_{ii}}{s}\right)\left(i_q^*-i_q\right)-Ri_q\right]/L \end{cases} \quad (8)$$

为保证电流环有良好的跟随性, 按照典型 I 型系统设计调节器参数<sup>[3]</sup>。加入前馈环节抵消网侧电压扰动时, 电流内环开环传递函数为:

$$W_{oi}(s)=\frac{K_{ip}K_{PWM}}{R\tau_i s(1.5T_s s+1)} \quad (9)$$

式中:  $K_{PWM}$  为 PWM 桥路等效增益。

若采用 SPWM, 则  $K_{PWM}=U_{dc}/2$ ; 若采用 SVPWM, 则  $K_{PWM}=U_{dc}/\sqrt{3}$ , 可见 SVPWM 可以提高直流侧电压利用率;  $\tau_i$  为 PI 调节器零点抵消电流控制对象传递函数极点,  $\tau_i=L/R$ ;  $T_s$  为 PWM 开关周期。

取系统阻尼  $\xi=0.707$ , 得:

$$\frac{1.5T_s K_{ip} K_{PWM}}{R\tau_i}=\frac{1}{2} \quad (10)$$

求解得:  $K_{ip}=R\tau_i/3T_s K_{PWM}, K_{ii}=K_{ip}/\tau_i=R/3T_s K_{PWM}$ 。

电流环通过典型 I 型系统设计, 达到系统要求, 在稳定基础上具有快速跟随性。  $d$  轴电流环的控制结构如图 4 所示。  $q$  轴电流设置参数与  $d$  轴一致。

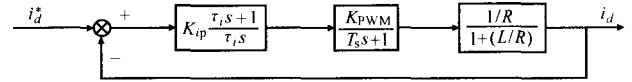


图 4 d 轴电流控制环结构图

#### 3.2 软件锁相设计

并网有功电流与电网电压保持同频同相需要用到同步正弦信号  $\sin\omega t$ 。结合闭环 SVPWM 电流控制方案提出了软件锁相, 图 5 示出软件控制框图<sup>[4]</sup>。

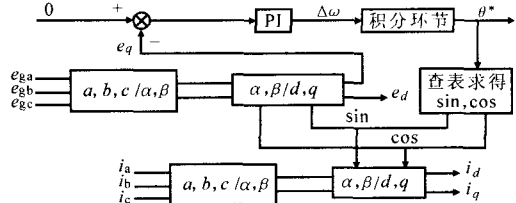


图 5 软件锁相控制框图

电网电压  $e_{ga}, e_{gb}, e_{gc}$  转换到  $\alpha, \beta$  坐标系, 结合锁相环输出的相位角  $\theta$  转换为  $d, q$  坐标系, 得到交流电压的直流量  $e_d, e_q$ 。如果锁相角与电网电压同步, 则  $e_q=0$ 。零与  $e_q$  相减经 PI 调节器输出误差信号, 经积分环节得到最终相位  $\theta^*$ 。整个流程构成负反馈, 通过 PI 调节器锁相。当系统处于稳态时, 同步正弦信号相位完全跟踪电网电压相位。

#### 3.3 提高 ADC 采样频率

A/D 转换器(ADC)采样数据的延时会对系统整体性能产生消极影响。采用预测控制虽可提高系统的控制效果, 但算法相对复杂<sup>[5]</sup>, 故可通过提高系统采样频率减小采样延时, 提高控制精度, 如图 6 所示。

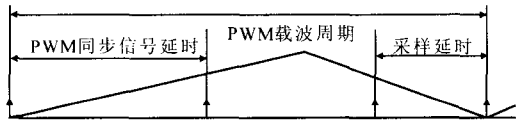


图 6 ADC 采样

通过 PWM 同步信号启动并延时触发 A/D 转换, 利用定时器控制 ADC 在 A, B 两点采样。在各 PWM 载波周期内, ADC 在 B 点完成采样后 PWM 发生装裁中断, 然后根据缓冲区 PWM 脉冲占空比来修改 PWM 输出。通过提高 ADC 采样频率缩短了采样信号的延时, 在满足 DSP 计算能力的条件下有效减小系统的控制误差, 提高了电流动态响应。同时, ADC 在一个 PWM 周期内多点采样, 一旦系统过流, DSP 能更及时地封锁 PWM 信号输出。

### 4 实验结果分析

研制一台 5 kW 实验样机, 在滤波(下转第 14 页)

路的传输效率约达 92%,而典型 Boost ZVT\_PWM 电路的传输效率约为 75%。

### 4 新型 Boost ZVT-PWM 电路的应用

图 5 示出光伏发电系统的原理框图,其中虚线框内为新型 Boost ZVT-PWM 电路在光伏发电最大功率追踪系统中的应用框图。

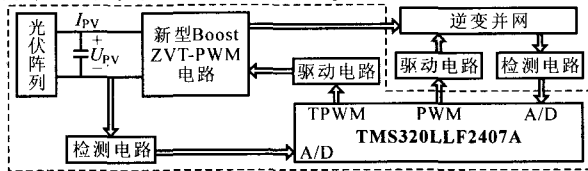


图 5 最大功率追踪系统的原理框图

系统中,MPPT 采用最有梯度算法<sup>[5]</sup>。光伏电池模块采用 STP010-12/Kb,将该模块两两串联后再 8 组并联成光伏阵列进行输出。

图 6 示出新型 Boost ZVT-PWM 电路实现光伏电池最大功率追踪控制得到的光伏电池输出功率随时间的变化曲线。

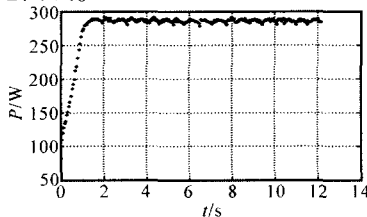


图 6 最大功率追踪系统的功率-时间曲线  
由实验结果可见,系统在较短的时间内便跟踪

(上接第 5 页)器输出端接入一个三相升压变压器,初、次级线电压比值为 250/380。利用二极管不控整流代替分布式电源,母线电压稳定在 400 V,取输出滤波电感为 5 mH,选用 DSP 56F8037,PWM 开关频率为 5 kHz,ADC 采样频率为 10 kHz。图 7a 示出变压器初级 a 相电网电压  $e_{ga}$  与并网电流  $i_{ga}$  波形, $e_{ga}$  与逆变器输出电流同频同相,功率因数为 1。受直流侧纹波和变压器影响, $i_{ga}$  有少量谐波存在,谐波畸变率  $THD < 3%$ ,符合 IEEE 规定的低于 5% 的标准。图 7b 示出逆变器输出线电压  $u_{ab}$  与变压器 250 V 侧线电压  $u_{gs}$  波形。图 7c 示出系统突加 1.5 kW 负载时输出  $e_{ga}$  与  $i_{ga}$  波形,电流具有良好的跟随性能且超调量较小。

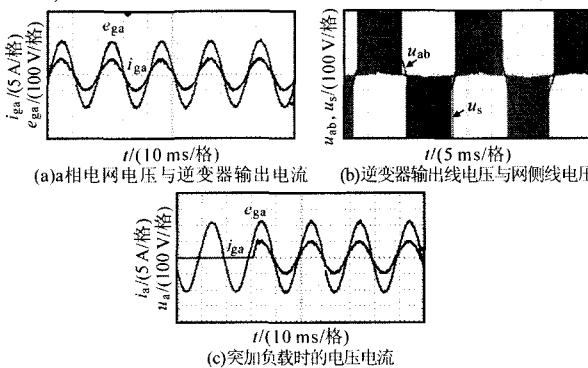


图 7 实验波形

到光伏电池阵列的最大功率点并稳定工作在最大功率点附近。系统采用新型 Boost ZVT-PWM 电路作为最大功率跟踪系统的 DC/DC 电路,可以大大提高系统的传输效率,以及光伏电能的利用效率。

### 5 结论

构建了新型 Boost ZVT-PWM 电路和典型 Boost ZVT-PWM 电路的硬件电路,对比分析了电路的工作波形,研究了其在不同占空比、开关频率和负载条件下的传输效率,并将前者运用于光伏发电的最大功率追踪系统。实验结果证明该电路可进一步降低辅助开关的开关损耗,从而使整个电路的效率得到提高,同时也体现了其应用于光伏系统的巨大优势。

### 参考文献

- [1] Ching-Jung Tseng. Novel ZVT-PWM Converters With Active Snubbers[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 1998, 13(5): 861-869.
- [2] Guichao Hua. Novel Zero-voltage-transition PWM Converters[J]. IEEE Trans. on Power Electron, 1994, 9(2): 213-219.
- [3] 王增福,李昶,魏永明. 软开关电源原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [4] 何茂军,李晓帆. 一种新型 ZVT-PWM 软开关 Boost 变换器[J]. 通信电源技术, 2001, (6): 17-20.
- [5] 何薇薇,杨金明. 太阳能光伏发电最大功率跟踪系统的研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(8): 30-32.

### 5 结论

结合 SVPWM 电流控制研制了高性能的三相光伏并网逆变器,相对于 SPWM 电流控制具有更高的直流侧电压利用率。设计了软件锁相环保证并网电流与电网电压同频同相。通过提高 ADC 采样频率,有效减小系统控制延时。样机实验验证了提出的控制方法和系统参数设计的正确性。

### 参考文献

- [1] M Prodanovic, T C Green. Control and Filter Design of Three-Phase Inverters for High Power Quality Grid Connection[J]. IEEE Trans. on Power Electronic, 2003, 18(1): 373-180.
- [2] Ye Y, Kazerani M, Quiatana V HA Novel Modeling and Control Method for Three-phase PWM Converters[A]. IEEE 32th Annual PESC '01[C]. 2001, 1: 102-107.
- [3] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [4] 曹世华,张维娜,沈鸿,等. 新型软件锁相环三相电压型 PWM 整流器的控制[J]. 电力电子技术, 2008, 42(5): 72-73.
- [5] Zeng Q, Chang L, Song P. SVPWM-based Current Controller with Grid Harmonic Compensation for Three-phase Grid-connected VSI[A]. IEEE PESC '04[C], Aschen, Germany, 2004: 2494-2500.