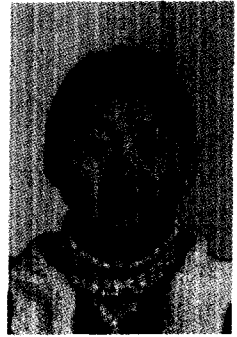


# 光伏系统并网逆变器控制策略\*

谢萍, 刘永强, 马士超, 黄俊彦  
(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)



谢萍 (1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

**摘要:** 太阳能作为一种新型的可再生能源近年来得到了广泛的应用。光伏并网技术成为有效利用太阳能发电的核心和关键。通过分析传统光伏并网逆变器控制策略, 提出一种具有功率跟踪的固定开关频率的电流控制技术。仿真结果表明, 并网电流与电网电压基本同频同相, 并网系统的功率因数近似为 1, 满足设计要求。

**关键词:** 光伏系统; 并网; 逆变器

**中图分类号:** TM 615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5531(2010)14-0024-04

## Control Strategy of Grid-Connected Photovoltaic Inverter

XIE Ping, LIU Yongqiang, MA Shichao, HUANG Junyan

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The solar energy was applied widely in recent years, as a kind of renewable energy. Photovoltaic (PV) grid technology became the key and core of the most efficiency ways of using solar energy. A current control technology with a fixed switching frequency which could track the power was put forward, through analyzing the traditional PV grid inverter control strategy. The results of the simulation showed that the network voltage and grid-connected current were basically synchronic. And the power factor of grid system was 1 approximately, which met design requirement.

**Key words:** photovoltaic system; grid-connected; inverter

### 0 引言

随着全球经济的发展, 新能源发电技术也迅速发展。太阳能以其资源量最丰富、分布广泛、清洁成为最有发展潜力的可再生能源之一。进入 21 世纪以来, 世界太阳能光伏发电产业发展迅速, 市场应用规模不断扩大, 在后续能源的发展中的作用越来越重要。开发利用太阳能光伏技术是我国实行资源节约型社会、节能减排、可持续发展、改善生存环境等的重要举措之一。当前, 全球能源资源日益减少且环境问题日益突出, 如何合理、有效地利用可再生能源成为建设节约型社会的重要课题。

光伏逆变电源并网运行时本质上为电流源。如何有效控制输出电流以及在尽量减少对电网谐波污染的前提下, 如何满足与电网电压同频同相

是光伏电源并网运行的 2 大难点和关键点。而逆变器是并网系统的核心装置, 逆变器控制和调制技术成为并网技术的关键。目前, 国内外纷纷开展光伏并网系统的研究, 并网可看作与电网的并联, 通过对可控逆变器的控制实现无冲击并网。

本文针对光伏系统中的逆变器, 分析了已有的基于电流跟踪和电压跟踪的 PWM 控制策略, 并提出一种新型的具有功率跟踪功能的电流控制策略。PWM 调制控制策略不仅可以对逆变器实现灵活可靠的控制, 还可以减小谐波含量, 从而提高逆变器输出电能质量。

### 1 常用控制策略

#### 1.1 电流跟踪控制策略

并网逆变器采用的电流控制是将逆变器输出作为电流源, 它与电网的并联可看作电流源与电

刘永强 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

马士超 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

\* 基金项目: 广东省绿色能源技术重点实验室资助 (2008A060301002)

压源的并联工作。并网工作中只需控制逆变器的输出电流频率、相位跟踪电网电压变化即可达到并联运行的目的。

常用的电流跟踪控制策略主要有瞬时值滞环控制方式、三角波比较控制方式及无差拍控制方式<sup>[1]</sup>。

滞环控制是把正弦电流基准值与输出瞬时值比较得到的误差量作为滞环比较器的输入,其输出用来控制逆变电路功率管的通断。该控制方式选择适当的环宽很重要,环宽越小,跟踪误差越小,但开关频率越高,开关损耗越大。该控制方式电路简单、不用载波、电流响应速度快,输出电压波形中不含特定频率的谐波分量。但功率开关频率随负载电流的变化而变化,造成功率开关工作具有很大的不确定性,导致逆变器输出电压中谐波频率随开关频率变化而变化,从而给输出滤波器的设计带来困难。

三角波比较控制方式将正弦电流基准值与输出瞬时值比较得到误差量经 PI 调节器后送比较器,与三角波比较后得到的 SPWM 信号去控制主电路功率管的导通与截止。该控制方式与电路跟踪特性和 PI 电路参数有关,对于 PI 电路响应快的系统,必须提高三角波载波频率。三角波载波常使用三相三角波信号,以改善输出电压波形,该方法输出电流的谐波脉动比滞后比较器方式少,因此,常用于对谐波和噪声要求较高的地方<sup>[1]</sup>。

无差拍微处理器控制 PWM 逆变器是一种基于电路方程式的控制法,其思路是根据电路理论求出决定脉冲宽度的控制方程式,并借助微处理器进行脉宽计算,使逆变器的输出电压逼近理想的正弦波。由于脉冲宽度是根据逆变器当前的电路状态实时确定的,因而无差拍 PWM 调制法比开环 PWM 调制法具有更好的动态性能和较强的负载适应能力。当负载突变时,可以减少过渡过程时间,当用于非线性负载时,可以减少输出电压的谐波含量。

## 1.2 电压控制

电压控制逆变器是将逆变器输出作为电压源,它与电网的并联看做 2 个电压源并联运行,由于市电系统与发电系统中逆变输出相比可视为容量无穷大的交流电压源,因此,要保证逆变器输出与电网同步,需采用锁相控制技术使逆变器输出电压与市电电压同步,同时还要调整逆变器输出

电压幅值以避免产生环流。要实现准同步并网,必须要求逆变器输出端各项电动势的瞬时值与电网端对应相电压的瞬时值完全一致(包括波形、频率、幅值、相位、相序)。

锁相环(PLL)是一个能够自动追踪输入信号频率和相位的闭环控制系统,在并网系统中起到很关键的作用。典型的锁相电路基本结构如图 1 所示,它是由鉴相器(PD)、环路滤波器(LF)和压控振荡器(VCO)组成的相位闭环系统<sup>[2]</sup>。鉴相器用来鉴别输入信号  $u_1$  与输出信号  $u_2$  之间的相位差,并输出误差电压  $u_d$ 。 $u_d$  中的噪声和干扰成分被低通性质的环路滤波器滤除,形成压控振荡器的控制电压  $u_f$ 。 $u_f$  作用于压控振荡器的结果是把它的输出振荡频率  $f_2$  拉向环路输入信号频率  $f_1$ ,当两者相等时,环路被锁定<sup>[3]</sup>。

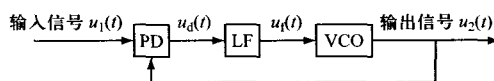


图 1 锁相电路基本结构

## 2 双环控制策略

### 2.1 电压电流双闭环控制

针对现有的光伏发电系统,提出了多种双环控制方案<sup>[4-6]</sup>,最常用的是电压电流双环控制策略。基本思路为:外环为电压环,把逆变器输出电压与正弦基准电压比较后得到的误差值经 PI 调节后作为电流内环的参考基准;内环为电流环,逆变输出电流与电流基准信号相比较得到误差值送比较器,与三角载波比较产生 PWM 信号去控制功率器件的导通与关断,从而控制逆变器的输出。该方法中,逆变器开关器件工作频率等于三角载波频率,因此,它的工作频率是固定的。由于载波频率固定,逆变器输出谐波频率是固定的,滤波器设计相对于滞环电流瞬时值控制简单,控制效果较好<sup>[7]</sup>。由于采用了电压、电流双环控制,能较好地获得逆变输出、减小并网环流的作用。结构图如图 2 所示。

另外,有一种基于  $\alpha\beta$  模型的电感电流内环、电压外环的双闭环控制器,对电压外环采用离散积分滑膜控制可以改善系统的稳态性并能增强系统的鲁棒性,保证逆变器在负载变化及参数扰动

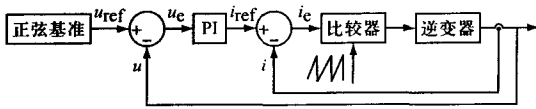


图2 带电压电流双环控制逆变器控制流程图

时输出电压动态响应快、稳态精度高、波形失真率小<sup>[8]</sup>。

### 2.2 电流瞬时值和电流有效值双闭环控制

为了控制逆变电路输出的交流电流为稳定、高品质的正弦波,且与电网电压同频同相,目前还研究出了另一种电压控制电流的双闭环方式,即外环为电流有效值(RMS)闭环,通过对输出电压的控制来调节并网电流的大小;内环为电流瞬时值闭环,通过实时的电流反馈,修正电流的输出波形<sup>[9]</sup>。有效值和瞬时值构成的双闭环控制系统保证了对输出电流幅值和波形的要求,并且具有控制物理意义明确、易于软件实现、动态响应快等优点。基本结构图如图3所示。

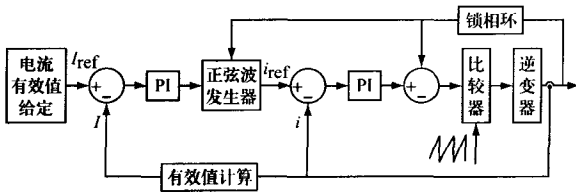


图3 电流瞬时值和电流有效值双闭环控制流程图

## 3 具有功率跟踪的固定开关频率电流控制技术

结合以上方法的分析,本文采用改进型双反馈三角形比较方式作为逆变器输出控制策略。由于光伏逆变器输出功率与光伏器件所提供的能量是相关的,而光伏系统输出功率又是光伏器件所处环境(如日照强度、温度等)的函数,因此,逆变器参考电流会随着光伏器件的输出功率的变化而变化<sup>[10]</sup>。据此分析,给出光伏系统中并网逆变器的控制原理框图(见图4)。图中,  $U_{PV}$ 、 $I_{PV}$ 、 $P_{PV}$  分别为光伏器件电压、电流及光伏阵列捕获的最大功率。与上面介绍的电压电流双环控制有所改进的是,逆变器控制电流参考信号是根据光伏器件输出功率及电网电压得到,这样得到的电流指令能根据光伏输出功率和电网电压作实时调整。它与正弦表值相乘得到交变的输出电流指令  $i_{ref} \sin \omega t$ ,其中,正弦表值由电网电压同步信号得

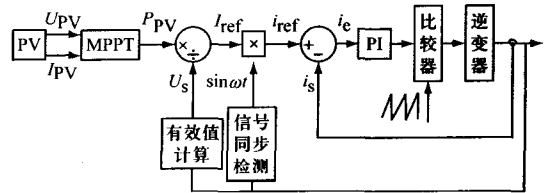


图4 光伏系统并网逆变器控制框图

到,能够跟踪电网电压波形变化。电流指令  $i_{ref}$  与逆变器输出电流相比较得到误差信号,经PI调节器后送比较器,与三角波比较得到的SPWM信号去控制主电路功率管的通断,从而控制逆变器输出电压能够跟踪电网电压,有效减小并网环流,同时使输出功率因数很好地趋近于1。

## 4 仿真结果

用 Matlab/Simulink 进行仿真,仿真电路如图5所示。主电路主要由光伏阵列、全桥逆变器、LC滤波器及升压变压器组成。

该仿真试验中,为验证该控制策略的正确性及可靠性,暂作以下考虑:

(1) 不具体研究光伏器件情况,假设已实现最大功率点跟踪,当光照强度变化时,母线电流变化,保持电压稳定,以保证光伏电池始终为最大输出;

(2) 用直流电压源代替稳定输出的光伏电池电压;

(3) 为了便于观察,将逆变器输出电流放大50倍与电网电压进行对比。

仿真参数设置:光伏系统额定输出功率为600 W,输出直流电压为300 V,并网电压为220 V,频率为50 Hz。锁相环设置  $K_p = 180, K_i = 3200, K_d = 1$ 。PI控制器设置  $K_p = 0.5, K_i = 2$ ,载波频率设置为1500 Hz。设置电网有功负载为3 kW,感性无功为500 Var,容性无功为50 Var。光伏系统带三相负载,额定电压为220 V,频率为50 Hz,有功为500 W,感性无功为300 Var,容性无功为0。将逆变器输出电流放大50倍后与电网电压比较的仿真结果如图6所示。对逆变器输出电流采用快速傅里叶变换的谐波分析图如图7所示。

从图中可以看出,逆变器输出电流波形在开始阶段不稳定,但很快能保持正弦输出,并且与电网电压波形基本一致,可以实现同步无冲击并网,且功率因数近似为1。

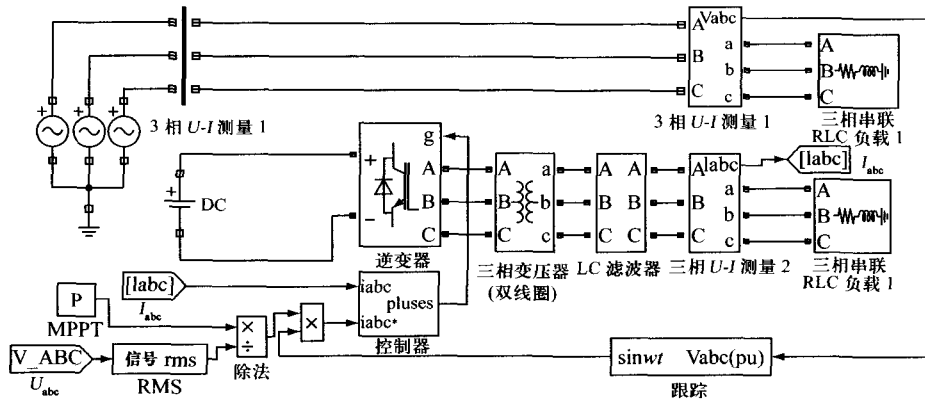
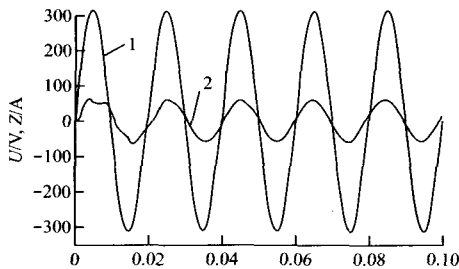


图5 仿真系统图



1—电网电压 2—逆变器输出电流的50倍  
图6 逆变器输出电流与电网电压波形

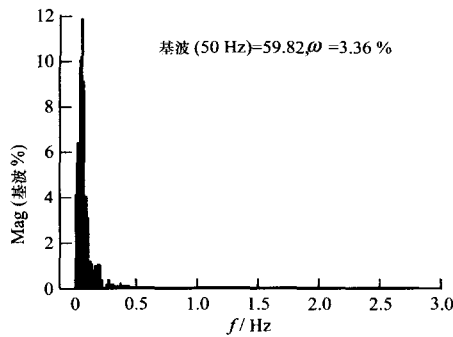


图7 逆变器输出电流谐波分析图

## 5 结 语

由仿真结果可以看出,仿真的结果与设计要  
求是一致的,能稳定地实现光伏逆变并网,使逆  
变频器输出电流较好地与电网电压保持同步实现无冲  
击并网,输出功率因数近似为1。从而验证了这  
种具有功率跟踪,根据电网电压同步信号确定瞬  
时电流基准值,比较后经PI调节器送比较器与三  
角波比较得到逆变器开关控制信号的控制策略的  
正确性与可行性。

## 【参考文献】

- [1] 刘凤君. 正弦波逆变器[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] AWAD H, SVENSSON M J, BOLLEN J. Tuning software phase-locked loop for series-converter onverters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20 (1): 300-308.
- [3] 贝斯特. 锁相环: 设计、仿真与应用(第五版)[M]. 5版. 李永明译. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [4] 许爱国, 谢少军. 电容电流瞬时值反馈控制逆变器的数字控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 49-53.
- [5] 熊键, 周亮, 张凯, 等. 一种高性能的单相逆变器多环控制方案[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 79-83.
- [6] CHERN T, CHANG J, CHIEN C, et al. Microprocessor based modified discrete integral variable-structure control for UPS [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1999, 46(2): 340-347.
- [7] 陈东华, 谢少军, 周波. 瞬时值电流控制逆变技术比较[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(3): 343-347.
- [8] 郑雪生, 李春文, 汤洪海, 等. 三相电压型逆变器的鲁棒跟踪双环控制器[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(1): 154-148.
- [9] 张承慧, 叶颖, 陈阿莲, 等. 基于输出电流控制的光伏并网逆变电源[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 41-45.
- [10] 王章权. 瞬时电流跟踪控制光伏并网技术[J]. 电源技术, 2007, 31(8): 648-650.

收稿日期: 2010-05-24