

# 基于单周控制的单相并网逆变器仿真分析

高学军, 曹 冲, 周 鑫

(三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为研究太阳能光伏发电单相并网问题,将单周控制技术应用到并网逆变器中。在开关周期内利用单周控制原理对每个开关管进行了精确控制,基于该方法实现了正弦脉宽调制,其控制电路简单,动态控制响应快。利用 Matlab/Simulink 软件对该并网逆变器进行了建模仿真实验,实验结果显示逆变器输出波形 THD 小,对“孤岛”效应反应迅速。研究结果表明该方法实现单相并网技术简单,为居民用户光伏发电并网提供了新的途径。

**关键词:**单周控制;单相并网;逆变器;Matlab/Simulink 仿真

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0620-04

## Simulation analysis of single-phase grid inverter based on one-cycle control

GAO Xue-jun, CAO Chong, ZHOU Xin

(Institute of Electrical Engineering and Renewable Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** For the study of solar photovoltaic power generation on single-phase grid problem, one cycle control was applied to the grid inverter. One cycle control theory was used to control each switch precisely in every switching. Based on this method, the sinusoidal pulse width modulation was realized, the control circuit is simple and it has fast dynamic control response. Matlab/Simulink software was used to establish simulative model of grid inverter. The experimental results show that the output wave's THD of grid inverter is very small, and this inverter could rapidly respond "single island" affect. The results show that using this method to realize single-phase grid technology is simple, and it provides a method for photovoltaic to power generation grid of residential customers.

**Key words:** one cycle control; single-phase grid; inverter; Matlab/Simulink simulation

## 0 引 言

近年来全球的能源问题越来越突出,环境污染不断地加剧,各国都在寻找一种能够可持续发展的清洁能源<sup>[1]</sup>。到了 20 世纪末,光伏发电技术和其它可再生能源发电技术一样,成为全球减少温室气体排放的重要技术手段,不少发达国家开始实施基于并网的太阳能光伏发电屋顶计划<sup>[2]</sup>。随着国家开始倡导“低碳生活”,我国已有城市实验了 20 kW 光伏屋顶并网发电系统。而像 5 kW 的小容量居民用户光伏并网系统的应用则很少,光伏并网系统中的核心部件是并网逆变器。早期并网逆变器体积大,不适合家庭使用。随着器件高频化,逆变器的体积在不断地缩小,但是控制相

当复杂,居民用户使用不经济。

基于光伏并网技术的要求,本研究应用单周控制单相电压型并网逆变器的方法,通过 Matlab/Simulink 软件仿真,证明了该方法的可行性。其控制电路简单,成本低。并网电压谐波含量少,逆变器输出效率高,对电网电压“孤岛效应”响应迅速。

## 1 单相并网逆变器原理

并网逆变器主要有两种控制方式:电压和电流控制。该方法采用电压控制模式,母线电压作为外环控制,以保证系统的正常运行。通过锁相技术与市电进行同步,通过隔离之后生成  $V_{ref}$  送入单周控制系统,生成 SPWM 信号。这样并网的电压完全与市电同步,一

且市电停电形成“孤岛”情形,逆变器能在短时间内作出反应,及时切断对电网的供电,该系统原理框图如图1所示<sup>[3-4]</sup>。

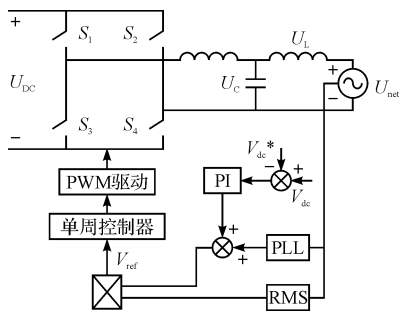


图1 单周控制并网逆变器原理图

家庭用户使用的并网逆变器采用高频控制信号作为控制器的载波信号,开关元件采用IGBT管。单周控制电路简单、运行可靠,外加单片机作为辅助控制系统,来检测市电电压。

## 2 单周控制原理

单周控制是通过控制开关元件的占空比,使每个元件在一个开关周期中的开关变量严格等于或正比于控制参考量。单周控制器电路主要包括积分器、复位开关 $S_2$ 、比较器和RS触发电路,如图2所示。其中核心器件就是有逻辑关系的RS触发器,当时钟信号到来时,RS触发器的输出端只有0和1两种信号。积分器一直处于积分状态,直到输出电压 $V_{in}$ 等于控制参考电压 $V_{ref}$ ,比较器输出复位,RS触发器输出端信号反转,逆变器开关元件 $S_1$ 关断,控制器复位开关 $S_2$ 导通,等待下一个周期信号, $V_{out}$ 总是跟随 $V_{in}$ ,单周控制波形图如图3所示,其关系如下:

$$\begin{cases} V_{in} = V_{out} & (0 < t < DT) \\ V_{out} = 0 & (DT < t < T) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ —开关周期, $D$ —占空比。

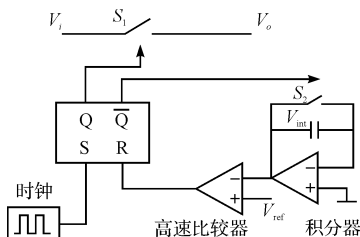


图2 单周控制电路原理图

且:

$$V_{ref} = \int_0^{DT} V_{in} dt = \int_0^{DT} V_{out} dt = \int_0^T V_{out} dt \quad (2)$$

式中: $V_{ref}$ —控制参考电压。

在一个时钟周期中 $V_{out}$ 的平均值等于 $V_{ref}$ 。实现单周控制的目标,根据图3可知 $V_{out}$ 的频率和脉宽与开关周期一致, $V_{out}$ 的包络跟随输入信号 $V_{in}$ ,开关占空比 $D$ 由控制参考信号 $V_{ref}$ 所调制。

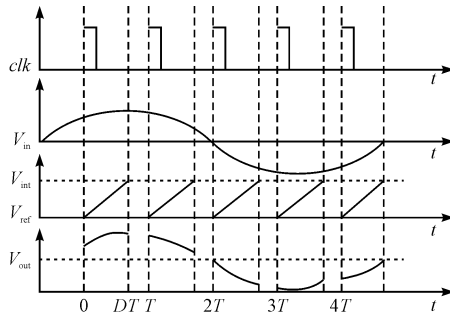


图3 单周控制波形图

## 3 并网单周控制 DC-AC 原理

图1中的单周控制单相桥式电压型SPWM逆变器拓扑结构图,采用普通型单极(Uniform Pulse-Width Modulation/UPWM)控制方式,开关管 $S_1$ 、 $S_2$ 采用单周控制生成SPWM信号,通过隔离驱动分别将信号传给 $S_1$ 与 $S_2$ <sup>[5-6]</sup>。开关管 $S_3$ 、 $S_4$ 采用脉冲控制信号与单周控制信号同步,当 $S_1$ 有驱动信号时,给 $S_4$ 一个持续的导通信号。当 $S_1$ 撤除驱动信号时, $S_4$ 同时也撤除驱动信号。同理,下半桥开关管 $S_2$ 与 $S_3$ 采用负半周驱动信号,与 $S_1$ 和 $S_4$ 形成互补。UPWM控制方式如图4所示。

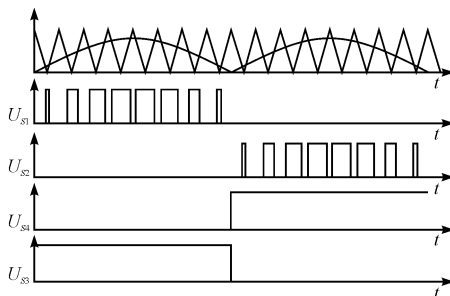


图4 UPWM控制方式

单周控制器工作方式:当时钟信号来时,单周控制器的积分电路开始积分,同时给 $S_1$ 输出驱动信号。积分曲线的斜率与给定的 $V_{in}$ 有关, $V_{in}$ 越大斜率越高。在一个时钟周期中,积分值与电网电压值 $V_{ref}$ 进行比较,一旦积分值超过电网电压值,便停止积分同时撤除 $S_1$ 的驱动信号。如图5所示在电网电压的半个周期中,根据正弦波形的值而改变,便对 $S_1$ 输出了不同脉宽的SPWM波形。逆变器采用高频控制时,输出的SPWM信号能够更好地模拟电网电压信号,并且谐波信号主要是高频信号。由于根据电网电压的情况生成

了 SPWM 信号,逆变器能够很好地与电网电压同步,并且一旦电网停电,逆变器会在短时间内停止对电网供电,能够有效地防止“孤岛效应”<sup>[7]</sup>。

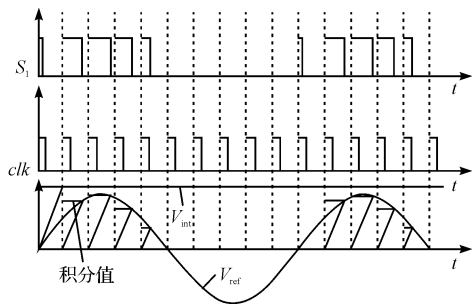


图 5 单周控制逆变器波形图

### 4 单周控制器模型

由图 1 可知,单周控制的  $V_{ref}$  信号来源是电网电压,经过锁环与调相后,生成与电网电压同相、同频率的正弦信号。取  $U_{int}$  为控制器积分上限值,控制器的方程为:

$$V_{ref} = \sin(\omega t + \theta), \int_0^k C dt = U_{int} \quad (3)$$

式中:  $T_s$ —系统的时钟触发周期。

单周控制器将连续的函数离散化,生成 PWM 信号<sup>[8]</sup>,由式(3)可以得出单周控制器的传递函数<sup>[9]</sup>为:

$$G(s) = \frac{(s \cdot \sin \theta + \omega \cdot \cos \theta) T_s \cdot s^2}{(s^2 + \omega^2) U_{int}} \quad (4)$$

式(4)是一个时钟周期的反馈环节,而在一个正弦周期中,有  $N$  次时钟周期,因此单周控制器类似于一个采样系统。根据采样定理,单周控制器离散形式为:

$$G(z) = \frac{(z - 1)N(z - \cos \omega)}{U_{int}(z^2 - 2z \cos \omega + 1)} \quad (5)$$

单周控制器自身并不调节系统误差,需要与 PI 控制器检测系统误差,并进行纠正。单周控制器数学模型如图 6 所示(其中,  $P(z)$  为逆变电源模型,  $d$  为外界干扰信号,通过 PI 调节反馈)<sup>[10]</sup>。

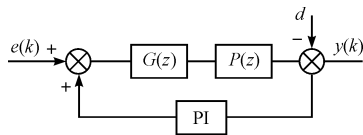


图 6 单周控制器数学模型

### 5 单周控制单相并网逆变器仿真

采用 Matlab/Simulink 7.0 软件仿真单周控制单相并网逆变器的结构图如图 7 所示,其主电路结构与如图 1 所示的结构相同,输出电压经 LC 滤波电路后输

入交流电网。控制电路由 UPWM 驱动模块、OOC 单周控制模块和前相锁环电路组成<sup>[11]</sup>。

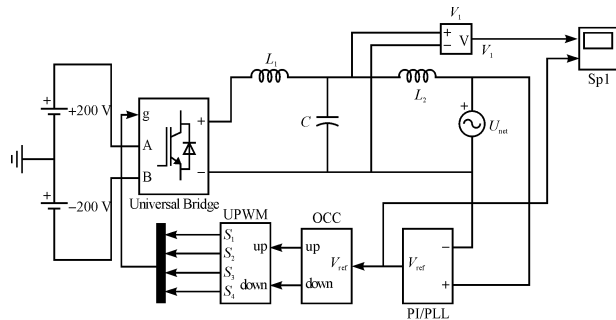
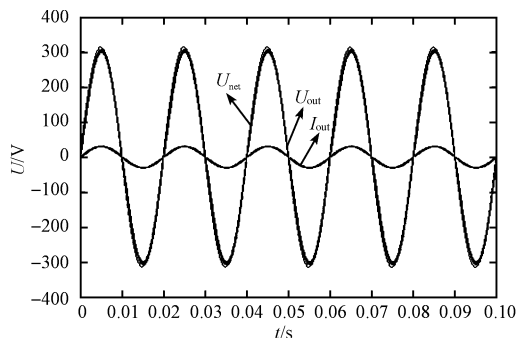


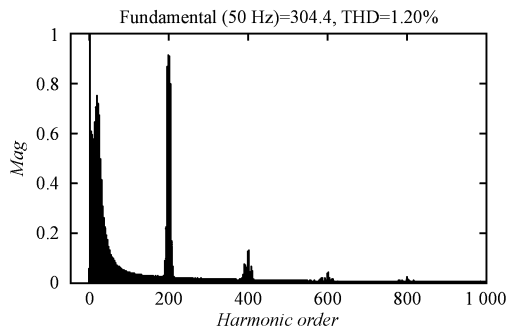
图 7 单周控制单相并网逆变器仿真模型

本研究模拟的电网用一个 50 Hz 的交流电压源来代替,逆变器参数如下:时钟信号的触发周期是  $1 \times 10^{-4}$  s,直流电源由两个 200 V 的直流电源串联而成,电网电压采用 220 V/50 Hz 单相交流电源。滤波电感选择 10 mH,滤波电容选择 2  $\mu$ F。二极管 D 管压降为 0.8 V,全控型开关管 S 为 IGBT,管压降为 1 V,通态电阻  $R_{on} = 0.0001 \Omega$ ;吸收电阻  $R_s = 100 \text{ k}\Omega$ ;单周控制积分输入电压  $V_{int} = 28 \text{ V}$ ,控制器输入参考电压  $V_{ref}$  与电网电压信号同步。

逆变器输出的仿真波形如图 8 所示,由图可知输出波形质量很好,经过 LC 滤波后本研究进行了 FFT 算法谐波分析,总波形畸变率 THD 在 1.20%,并网波形质量好。进行电网突然停电仿真时(如图 9 所示),在 0.035 s 时,将系统电源断开,由图可知逆变器在几个时钟周期便停止对电网供电,对应时间在 2 ms ~ 4 ms。



(a) 电压波形



(b) 谐波分析

图 8 并网输出电压波形和谐波分析

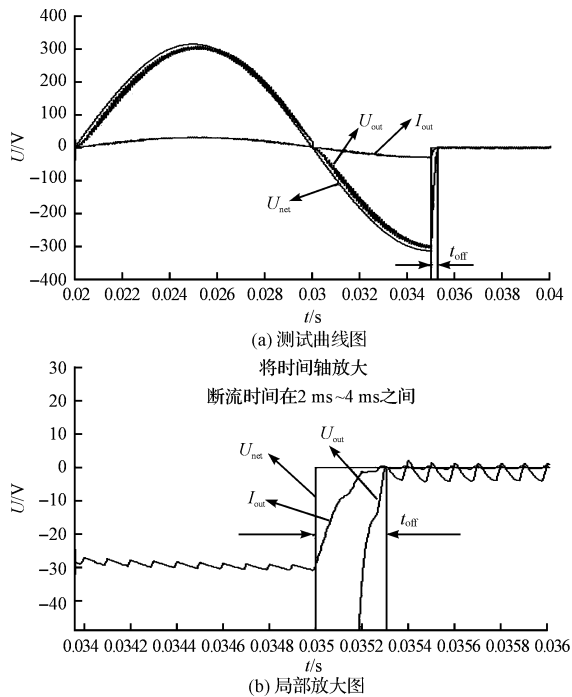


图9 反“孤岛效应”测试

传统 PWM 控制器 THD 含量在 2.79%,当检测系统停电时,传统 PWM 控制器通过判断与传输的延时响应时间在 10 ms 以上<sup>[12]</sup>,如图 10 所示,与单周控制器相比,传统 PWM 控制电路复杂,需要 DSP 或单片机产生 SPWM 信号,动态响应慢。对居民用户来说成本高,运行维护复杂。

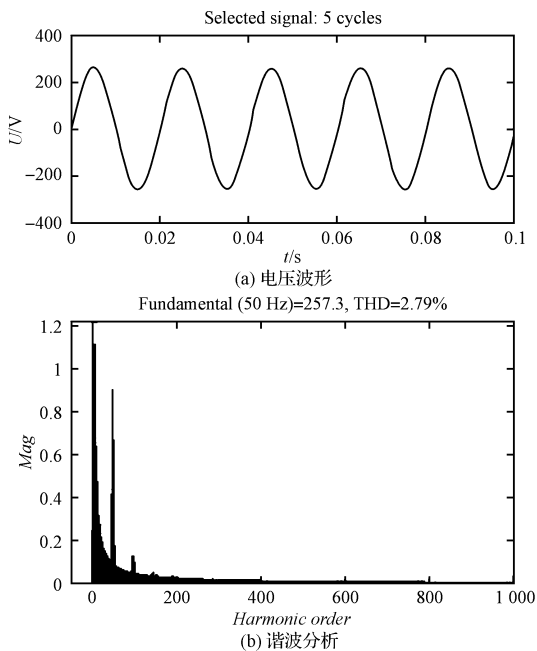


图10 传统 PWM 控制输出电压波形和谐波分析

## 6 结束语

本研究将单周控制理论应用在单相并网逆变器中,通过 Matlab/Simulink 进行并网仿真分析,分析结果表明,该方法应用在单相并网逆变器中能有效减小谐波含量,反“孤岛”迅速,并网电压质量好。

研究表明,与传统并网控制器相比,该方法更具有通用性,制造成本更低,适合应用于居民用户将电能回送电网。

### 参考文献 (References):

- [1] 张 荣. 光伏并网逆变器的研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2006:12-30.
- [2] 张新亮. 光伏并网逆变器研究[D]. 镇江:江苏大学电气学院,2009:25-40.
- [3] 陈贤明,吕宏水,刘国华,等. 单周控制的三相 PWM 逆变器仿真研究[J]. 大功率交流电技术,2009(6):1-6.
- [4] 陈旭红,单鸿涛,鹿 婷. 基于重复控制技术的光伏逆变器并网控制策略研究[J]. 电子技术应用,2008(7):36-41.
- [5] 胡兴柳,彭小兵,穆新华. SPWM 逆变电源的单极性控制方式实现[J]. 机电工程,2004,21(1):38-41.
- [6] ERICKSON R W. Fundamentals of Power Electronics[M]. New York:Chapman and Hall,1997.
- [7] TIRUMALA R, MOHAN N, HENZE C. Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes[C]//17th APEC,2002:1081-1086.
- [8] SONG H, KEIL R, MUTSCHLER P, et al. Advanced Control Scheme for a Single-phase PWM Rectifier in Traction Applications[C]. IEEE 38th IAS Annual Meeting, Salt Lake City, USA,2003.
- [9] 张 娟. 单相独立/并网运行逆变器控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2008:1-15.
- [10] 胡荣强,姜久春,王健强,等. 单周数字控制光伏并网逆变器设计[J]. 电力电子技术,2008,42(1):30-32.
- [11] 于小辉,梁志珊. 带孤岛效应检测的单周控制三相光伏并网逆变器[J]. 电源技术应用,2008,11(9):12-18.
- [12] 侯世英,虞元科,房 勇,等. 矢量模式单周控制的三相双降压式并网逆变器[J]. 电网技术,2010,34(5):128-132.

[编辑:柴福莉]