

# 单相光伏并网系统中级联多电平逆变器的研究

钟德刚, 王 培

(浙江工业大学 信息学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 针对光伏并网系统的改善输出电压和输出电流波形、降低谐波含量以及提高直流电压的利用率等问题, 将级联多电平逆变器应用在光伏并网系统中。在分析级联式多电平逆变器工作原理和其载波移相控制方法的基础上, 建立了多 DC-DC 变换器和多电平逆变器相结合的光伏并网模型, 并用 Matlab 对模型进行了仿真。同时提出了 TMS320C2812 数字信号处理器(DSP)实现逆变系统的数字化控制方案, 实现了多路 SPWM 脉冲对功率单元级联式逆变器的控制。研究表明, 该模型具有优良的输出特性和有效的电压利用率。

**关键词:** 级联逆变器; 光伏并网; 数字信号处理器; 正弦脉宽调制

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)05-0628-04

## Research on cascaded multilevel inverter of single-phase photovoltaic power system

ZHONG De-gang, WANG Pei

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of improving waveforms of output voltage and output current, reducing harmonics and increasing the utilization of DC voltage, the cascade multilevel inverters were used in photovoltaic systems. Based on analyzing the principle of cascaded multilevel inverter and the phase-shifted carrier sine pulse width modulation (SPWM) control strategy, a new photovoltaic grid model with several DC-DC converters and cascade multilevel inverter was proposed, and the model was simulated by Matlab. And TMS320C2812 digital signal processor (DSP) was used in this system to achieve digital control programs, and the multi-pulse SPWM which can control cascade inverter was realized. The experimental result shows that the model has excellent output characteristics and effectiveness of voltage.

**Key words:** cascaded inverter; photovoltaic; digital signal processor (DSP); sine pulse width modulation (SPWM)

### 0 引 言

光伏并网发电系统一般采用电压源 PWM 逆变器把直流电转化成交流电。逆变器要具有如下特征, 例如, 能产生高质量的输出电压、电流波形, 以及低的谐波降, 从而降低对电气设备的损害。从高质量的输出电压和降低开关设备频率的角度来看, 级联多电平逆变器能够代替传统的电压源 PWM 逆变器, 并且在相同开关频率下具有级联型电路输出电压的谐波含量更低, 以及冗长开关状态和功率器件电压应力小<sup>[1-2]</sup>等优点。

本研究采用多 DC-DC 变换器和级联多电平逆变器相结合的光伏并网模型, 不仅提高了光伏并网发电

系统的功率和输出电压质量, 同时降低逆变器单位功率的成本, 提高系统的灵活性。

### 1 单相光伏并网发电系统组成

光伏并网发电系统主要由光伏阵列、DC-DC 升压电路、DC-AC 逆变电路、LC 滤波电路 DC-DC 控制电路和 DC-AC 控制电路构成。光伏并网发电系统的结构框图如图 1 所示, 其工作过程为: 由光伏阵列产生的直流电经过 DC-DC 变换器升压, 进入逆变器主回路, 经逆变器转换成交流方波, 再经滤波器滤波成为正弦波电压送至电网。本研究采用 TMS320F2812 控制芯片, 控制光伏电池输出功率在最大功率点上, 并保证并网逆变器输出的正弦电流与电网电压同步<sup>[3-5]</sup>。

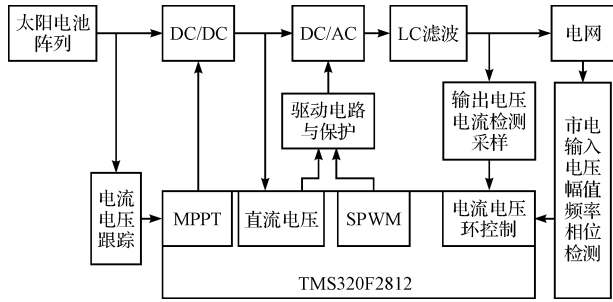


图1 光伏并网发电系统结构图

## 2 级联多电平电路工作原理

### 2.1 级联多电平逆变器拓扑结构

经过多年不断地发展,已经研究出多种多电平主电路拓扑结构。较为典型的有3种:二极管箝位型、飞跨电容型和级联多电平逆变器。其中级联多电平逆变器基于传统两电平全桥变换器结构单元,技术成熟,易于模块化,无需大量的箝位二极管和箝位电容,拓扑结构简单。

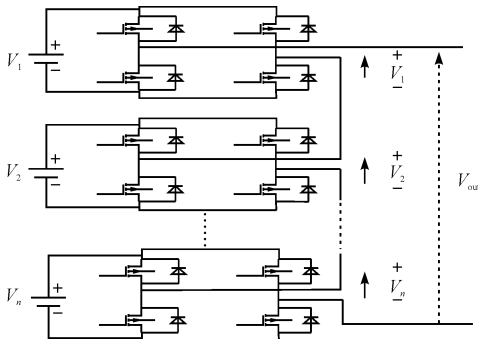


图2 单相级联多电平逆变器拓扑结构

级联多电平逆变器有多个全桥逆变器组成,单相级联多电平逆变器的拓扑结构如图2所示。多电平逆变器的输出总电压为:

$$V_{out} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (1)$$

式中: $V$ —每个功率单元输出电压, $V=1,2,\dots,n$ 。

图2中的所有的dc电压源是相等的且等于 $V_{dc}$ ,则逆变器是对称多电平逆变器。 $n$ 单元级联多电平逆变器的输出电压电平数为:

$$N_{step} = z_n + 1 \quad (2)$$

最大输出电压 $V_{max}$ 为:

$$V_{max} = n \times V_{dc} \quad (3)$$

### 2.2 级联多电平逆变器控制方法

级联多电平逆变器的基本思想是通过一定的主电路拓扑结构获得多电平阶梯波输出以逼近正弦电压。主要控制方法主要有:移相脉宽调制控制、多载波

PWM控制、矢量空间PWM(SVPWM)。因为载波移相控制方法简单易行,本研究在不同的输出电压最适用于单元级联型电路下面具体讨论级联多电平逆变器在载波移相法的工作原理。

#### 2.2.1 功率单元 PWM 控制原理

级联多电平逆变器单个功率单元如图3所示。功率单元PWM控制原理如图4所示,首先建立左、右桥臂相差 $180^\circ$ 的标准正弦波为参考信号,再建立控制信号三角波(如图4(a)所示)。左桥臂 $S_{a1}$ (如图4(b)所示)的控制信号由正的参考波与载波三角波比较得到,当参考波大于载波时 $S_{a1}$ 导通、 $S_{a2}$ 截止输出高电平;反之 $S_{a1}$ 截止、 $S_{a2}$ 导通输出低电平。所以 $S_{a2}$ 的控制信号由 $S_{a1}$ 反相得到。右桥臂 $S_{b1}$ (如图4(c)所示)的控制信号由负的参考波与载波三角波比较得到。当参考波大于载波时 $S_{b1}$ 导通、 $S_{b2}$ 截止输出高电平;反之 $S_{b1}$ 截止、 $S_{b2}$ 导通输出低电平。所以 $S_{b2}$ 的控制信号由 $S_{b1}$ 反相得到。左桥臂和右桥臂的控制信号之差得到的波形,与整个单元输出电压波形相同,如图4(d)所示。

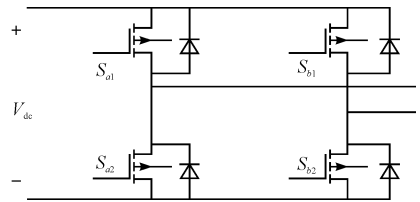


图3 单个功率单元结构

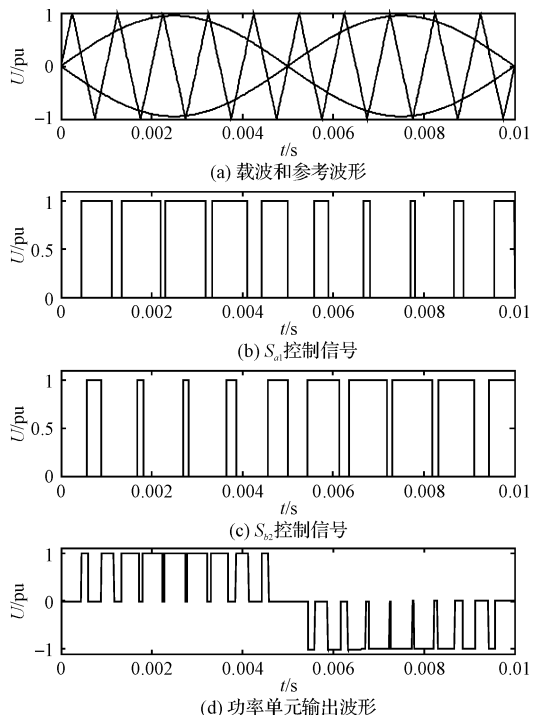


图4 功率单元控制原理图

### 2.2.2 级联多电平逆变器的载波移相实现方法

级联多电平逆变器由多个功率单元级联而成,级联功率单元数为  $N$ ,参考波为正弦波,载波为三角波。功率单元的参考波相同,但是每个相邻的功率单元载波有相位差,相位差  $\theta$  (相对于载波信号)由以下公式计算:

$$\theta = 360^\circ / N \quad (4)$$

控制信号生成原理:5 个单元的控制信号采用同一参考波(正负  $V_{sin}$ )分别与相差  $72^\circ$  的 5 个载波信号( $V_{\beta 1}$ 、 $V_{\beta 2}$ 、 $V_{\beta 3}$ 、 $V_{\beta 4}$ 和  $V_{\beta 5}$ )比较得到。载波信号和参考波波形如图 5(a)所示,5 个单元的输出电压相加得到的电压输出波形如图 5(b)所示<sup>[6-9]</sup>。

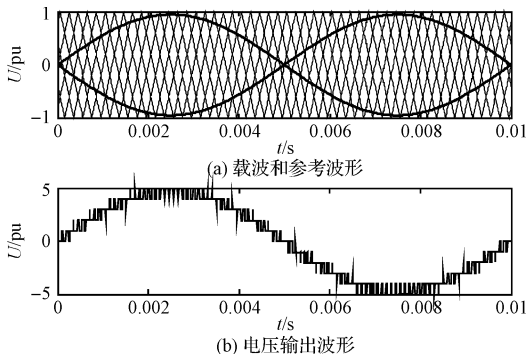


图 5 单相五单元级联逆变器控制原理图

## 3 级联多电平逆变器三角载波移相控制仿真

为了对级联多电平逆变器进行进一步分析,及检验级联多电平逆变器工作的正确性,本研究采用三角载波移相控制法输出的 PWM 电压波形,并采用 Matlab/Simulink 进行仿真研究。仿真参数:逆变器输出直流侧每单元电压为 48 V,逆变桥开关频率为 1 kHz。调制比为 0.9 的输出电压如图 6(a)所示,调制比为 0.95 的输出电压如图 6(b)所示。

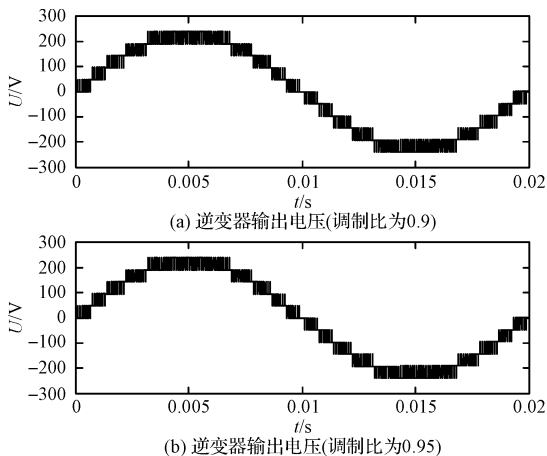


图 6 五单元级联逆变器仿真结果

## 4 光伏并网级联多电平逆变器

### 4.1 级联多电平逆变器的光伏并网结构和控制原理

基于五单元级联多电平逆变器光伏并网结构如图 7 所示,包括作为电源的光伏电池组,DC-DC 升压变换器和五单元级联多电平逆变器。

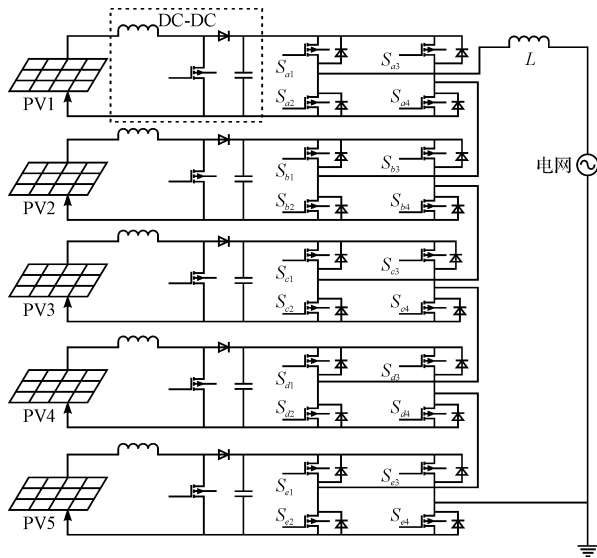


图 7 基于五单元级联多电平逆变器光伏并网结构

光伏阵列中每一块的光伏电池单元电压约为 0.5 V,通过串联和并联组成电池组,一般一块光伏电池组的电压有 12 V、24 V、48 V 等。以五单元级联多电平逆变器为例,如图根据逆变器的拓扑结构,可选用 5 块 48 V 的光伏电池组,再通过 DC-DC 升压到 400 V 左右,这样就能保证逆变后达到 220 V 的交流电。DC-DC 升压环节不仅能提高太阳能电池的输出电压,同时控制其工作在最佳工作点上,有效提高了太阳能板的工作效率。

在光伏并网系统的逆变器控制策略方面,针对级联多电平逆变器的特性,采用改进的双环控制。级联多电平逆变器控制策略结构图如图 8 所示。

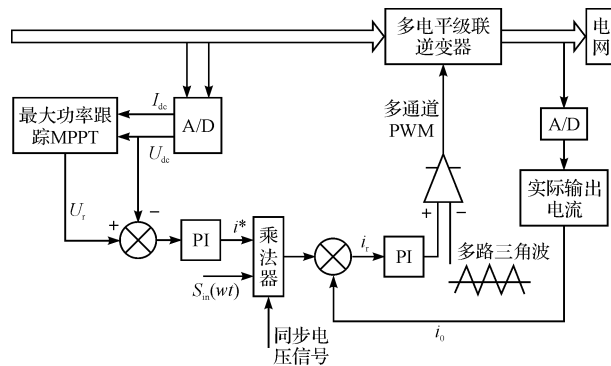


图 8 级联多电平逆变器控制策略结构图

### 4.2 级联多电平逆变器的光伏并网结构仿真结果

根据上述控制原理,本研究采用 Matlab/Simulink 对系统进行仿真研究。仿真参数:逆变器输出直流侧每单元电压为 48 V,逆变桥开关频率为 4 kHz,滤波器电感为 3 mH,电阻为 0.01 Ω,参考电流为 40 A。级联多电平逆变器的光伏并网结构仿真结果如图 9 所示。图中波形从上往下依次为输出电平电压,实际输出电流电网电流和电网电压。实际输出电流能够对电网电压频率和相位进行跟踪,并且 THB 测量值小于 1%,而同等参数下全桥逆变器的 THB 测量值为 3% 左右。

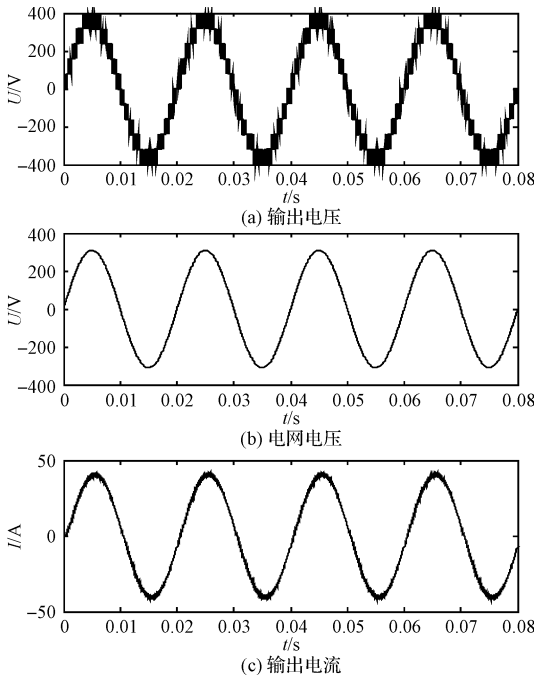


图9 仿真结果

## 5 光伏并网级系统硬件结构

单相电压源型 11 电平级联逆变器需要 20 路 SPWM 发生器,扩展到单相  $N$  单元级联逆变器,就需要  $4N$  路 SPWM 发生器。而目前功能最强大适合于逆变器控制的 TMS320C2812 最多只能提供 16 路脉冲,现场可编程门阵列芯片 (FPGA) 内部包含的逻辑门数从几百至几万,具有可任意配置的几百个寄存器和 I/O 口,并且开发周期短,可灵活配置实现多种功能而无需改动硬件电路<sup>[10]</sup>。光伏并网结构硬件结构如图 10 所示。

## 6 结束语

光伏并网逆变器是光伏并网发电系统的核心器件之一,其性能的优劣直接影响着光伏并网发电系统所发电能的质量。本研究讨论了级联多电平逆变器的工

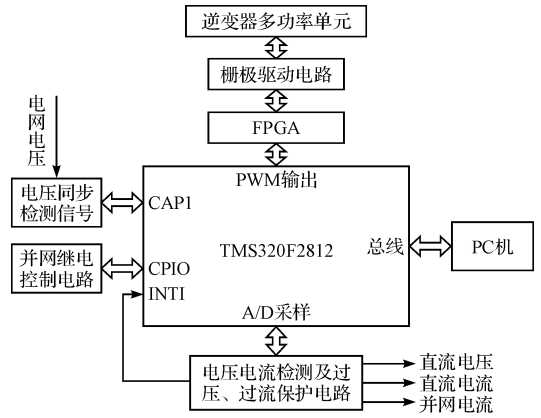


图10 光伏并网结构硬件结构图

作原理,在此基础上研究了基于多电平逆变器的光伏并网系统。通过仿真实验结果可以看出,并网电流很好地跟踪了电网电压,并且电流正弦度较好,谐波含量较少,达到了向电网输送高质量电能的目的。

### 参考文献 (References):

- [1] CALAIS M, DYMOND M S. A cascaded inverter for transformerless single-phase grid-connected photovoltaic systems [J]. **Renewable Energy**, 2001, 22(1-3): 255-262.
- [2] 牟伟,关振宏,胡鹏. 级联逆变器的工作原理[J]. 电气传动自动化, 2006, 28(3): 22-26.
- [3] 吴玉荣,张国琴. 基于 DSP 控制的单相光伏并网逆变系统的设计[J]. 继电器, 2008, 36(4): 51-53.
- [4] TAFTICHT T, AGBOSSOU K, DOUMBIA M L. An improved maximum power point tracking method for photovoltaic system [J]. **Renewable Energy**, 2008, 33(7): 1508-1516.
- [5] AHMEDA N A, MIYATAKE M. A novel maximum power point tracking for photovoltaic applications under partially shaded insolation conditions [J]. **Electric Power Systems Research**, 2008, 78(5): 777-784.
- [6] 朱凌,刘涛,鲁志平. 基于 DSP 的载波移相电平 PWM 实现方法[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 21-25.
- [7] 余威,江友华,张晓群,等. 级联型多电平逆变器的谐波分析及仿真研究[J]. 继电器, 2006, 34(14): 58-61.
- [8] KANG F S, CHO S E, PARK S J. A new control scheme of a cascaded transformer type multilevel PWM inverter for a residential photovoltaic power conditioning system [J]. **Solar Energy**, 2005, 78(6): 727-738.
- [9] TAHRL A, DRAOU A. A comparative modelling study of PWM control techniques for multilevel cascaded inverter [J]. **Leonardo Journal of Sciences**, 2005, 4(6): 42-58.
- [10] 丁伟,欧阳红林,朱思国,等. 级联式多电平逆变器三角载波移相控制的研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(8): 237-241.

[编辑:柴福莉]