

基于 ARM 的单周期控制逆变电源研究

褚鹏超, 郑玉莲, 田晓燕, 孙频东

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 单周期控制是模拟电源技术中一种被广泛使用的控制策略,它具有结构简单、调控速度快等优点,通常使用模拟电路构成控制电路,利用 ARM 控制芯片实现数字单周期控制,单周期控制电路中的积分器、电压比较器、RS 触发器等硬件电路均用软件实现,最后与模拟电路构成的单周期电路相比较发现其在动态性能方面具有相似的特性。

[关键词] 单周期控制, ARM 控制器, 逆变电源, 光伏电源

[中图分类号] TM464 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2012)04-0016-06

Study on One-Cycle Control Inverter Based on ARM

Chu Pengchao, Zheng Yulian, Tian Xiaoyan, Sun Pindong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: One-cycle control is a kind of control strategy of analog power technology which is widely used. It has such merits as simple structure, rapid control speed and so on. Analog circuit is always used to form control circuit. In this paper ARM is used to realize one-cycle control. The components of one-cycle control circuit such as the integrator, comparator, RS flip-flop and other hardware circuits are realized by ARM. Finally, compared with one-cycle control which is realized by analog circuit, they are similar in the characteristics of dynamic performance.

Key words: one-cycle control, Arm controller, inverter, optical-voltage

单周期控制策略^[1-2]是由加州大学 Smedley^[3-4]等提出的一种行之有效的控制策略,开始用于 buck 和 boost 等简单开关电源电路中^[5],现在已被广泛运用于电源变换、谐波补偿^[6]、单相电路及三相电路中。单周期控制策略具有控制电路简单、成本低等优点,通常用硬件电路实现。随着微电子技术的发展,数字控制器的成本逐渐降低,ARM 控制器被广泛应用到工业控制设备中,和传统的模拟电路构成的单周期控制相比,用 ARM 构成的单周期控制器已越来越显示其优越性,不仅成本和用硬件构成的单周期控制器相当,而且其体积也小,就控制系统的改进和灵活性方面还比模拟控制器更具有优越性。在光伏控制系统^[7-8]中使用 ARM 单周期控制器对提高系统的性价比更有意义。

1 逆变电源的工作原理

1.1 光伏逆变电源的构成

光伏逆变电源由光伏阵列、滤波电容器、全桥电路和输出滤波器构成,如图 1 所示。输入直流电压,输出交流电压,是一种 DC/AC 的变换电路,逆变电源采用基于单周期的控制方式,输出交流电压的频率为 50 Hz。

1.2 开关工作模式

全桥电路工作模式分为正负半周、正半周、 M_4 导通、 M_3 截止、 M_1 、 M_2 交替导通,等效电路如图 2(a) 所示。第一阶段 M_1 导通、 M_2 截止,直流电源向负载提供能量,同时,电感储能。第二阶段 M_1 截止、 M_2 导通,电感储能向负载供电,等效电路工作原理同 Buck 电路。

收稿日期:2012-08-26。

通讯联系人:孙频东,副教授,研究方向:电力电子与电力传动。E-mail: 61019@njnu.edu.cn

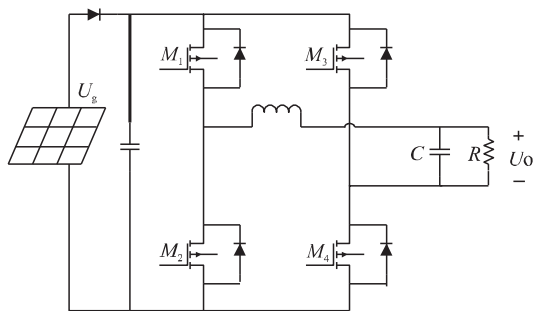
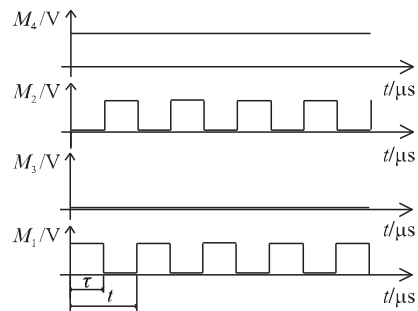


图1 DC/AC 全桥逆变电路图

Fig. 1 DC/AC full-bridge inverter circuit

图2 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 触发脉冲示意图Fig. 2 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 trigger pulse diagrammatic sketch

负半周、 M_2 导通、 M_1 截止、 M_3 、 M_4 交替导通,等效电路如图 2(b) 所示。第一阶段 M_2 导通 M_1 截止,直流电源向负载提供能量,同时,电感 L 反向储能。第二阶段 M_1 导通 M_2 截止时,电感储能向负载供电。

从 BUCK 电路的工作原理^[9]可得输出电压 V_o 和输入电压 E 之间的关系如下:

$$V_o = D \cdot V_g, \quad (1)$$

其中 $D = \tau/T$ 为触发脉冲的占空比; T 为开关切换周期; τ 为 M_4 导通的时间(正半周期),或为 M_2 导通的时间(负半周期),改变占空比 D 可以调节输出电压 V_o 值。

由 Buck 电路的原理知,当输入为直流电压时,要求输出为按正弦规律变化的交流电压,只能通过改变电路的占空比来实现。因此,电路通过改变占空比调节输出电压的大小,通过改变开关元件的导通顺序来控制输出电压的极性。

2 单周期控制策略

2.1 模拟单周期控制原理

一般单周期控制方式由模拟电路实现,传统的单周期控制电路及各点脉冲波形如图 3 所示。控制器中主要有以下部件构成:可复位积分电路、电压反向器、电压比较器、时钟发生器、RS 触发器及正弦参考电压发生器等。图 3 所示单周期控制电路,可以控制 BUCK 电路占空比按照正弦规律变化,配合极性控制,便可输出正弦电压。采用单周期控制关系如下:

$$V_c = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_D dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_g dt = V_g D, \quad (2)$$

其中 V_D 为续流二极管 D 两端的电压; T_s 为开关周期; D 为占空比; V_g 为光伏电池电压; V_c 反映了光伏电压在一个周期内的积分值。它与参考电压 V_{ref} 应有下列关系式。

$$V_{ref} = V_c = V_g D, \quad (3)$$

式(3)表明每个周期内 V_c 跟随 V_{ref} 变化,产生合适的占空比 D 。

$$V_o = \frac{V_{ref}}{1 + \frac{L}{R}S + LCS^2} \text{ 或 } V_o = \frac{RV_{ref}}{R + LS + RLCS^2}, \quad (4)$$

式(4)中 L 、 C 、 R 分别为电路中电感电容和负载电阻的参数。电路中的 L 、 R 、 C 参数是固定的,所以只要 V_{ref}

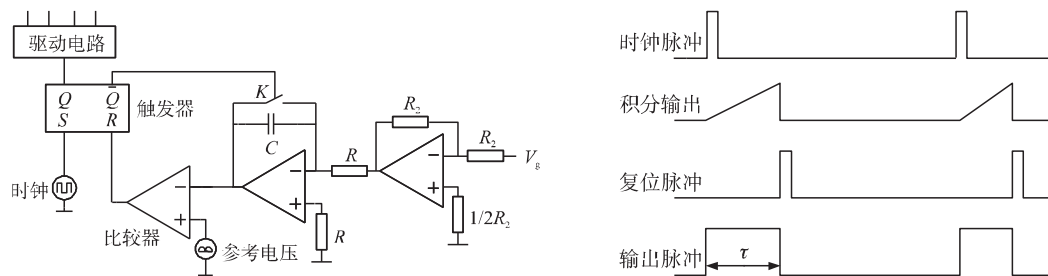


图3 单周期控制电路及波形

Fig. 3 The circuit of One-Cycle control and the waveform

不变,输出电压 V_o 就保持恒定,从而输出稳定电压.

由于占空比 D 在每个周期中都是根据实时的 V_g 产生,所以单周期控制能够在在一个开关周期内使 V_o 跟踪基准值,从而消除了输入电压变化负载突变引起的电压变化.

单周期控制器能够很好地抵制输入电压的变化,使控制点输出波形严格按照给定参考电压变化,而且在每个开关周期即可完成调节.

2.2 数字单周期控制的可行性

考察单周期控制电路可以发现其控制核心在于可复位积分器,每个开关周期都会根据采集电压重新设定其占空比.搭建实际的单周期控制电路相对复杂,而且模拟电路不可避免地存在一些寄生参数,使得信号在传输过程中存在失真.

数字化单周期控制中各个功能部件用数字方式实现,ARM 数字处理器的速度可达到 72 M,在时间上能够达到实时控制要求.通过使用 ARM 中的定时器、A/D 转换器、GPIO 口可以方便地实现上述硬件电路的功能.最重要的是,如果光伏控制系统中需要加入某种控制算法,比如使用 MPPT 控制方法,采用数字式控制就可以有更好的灵活性.

另外,ARM 处理器可以方便地添加故障处理功能,比如过压过流,通过中断响应函数可以进行合理地处置.

3 数字化单周期控制器的实现

单周期控制器的核心在于每个开关周期都能采集反馈电压改变开关管的占空比.利用数字处理器就可以十分便捷地实现这个控制要求.

3.1 占空比的产生

数字控制器采用查表的方法实现模拟电路中的积分器功能.积分电路的目的是得到反映实际需要的占空比,如何用数字电路的方法实现是问题的关键.考虑到电路的实际情况,做以下假定:

(1) 光伏输出电压 V_g 在一个开关周期 T_s (采用 20 kHz 周期为 50 μ s) 内可以认为是基本恒定的(考虑到滤波电容的存在).假设输出电压的最大电压下降为额定值的 1/3,则对额定最大输出为 24 V 的光伏电源,最小输出应为 16 V;

(2) 输出电压为正弦,每一行的参考电压按正弦规律变化,参考电压大小表示正弦值的有效值大小.假设每周均匀取 20 个点,频率按 50 Hz 计算,则每两个点对应时间为 1 ms,即每 1 ms 采集一次参考电压,依据参考电压调整占空比;

(3) 占空比为:

$$D = \beta \frac{V_{ref}}{V_g} \quad (5)$$

式中,占空比与 V_{ref} 成正比,与 V_g 成反比, β 为比例系数, β 依据 V_g 的变化范围和输出要求设定.占空比受参考电压和光伏反馈电压 V_g 控制.

通过预先计算把不同的 V_{ref} 和 V_g 所对应的占空比求出来,如表 1 所示,列成数组存放在处理器中以查询方式使用,可以大大加快处理器的反应速度.

表 1 占空比列表

Table 1 The tabulation of duty ratio

序号	0	1	2	3	4	5	6	7	...	19
α	0	18°	36°	54°	72°	90°	108°	126°	...	342°
V_{ref}	0	0.31	0.59	0.81	0.95	1	0.95	0.81	...	0.31
$D(24\text{ V})$	0	0.186	0.334	0.486	0.57	0.6	0.57	0.486	...	0.186
$D(23\text{ V})$	0	0.194	0.357	0.507	0.595	0.626	0.595	0.507	...	0.194
$D(22\text{ V})$	0	0.203	0.373	0.530	0.622	0.655	0.622	0.530	...	0.203
...
$D(16\text{ V})$	0	0.279	0.531	0.729	0.855	0.9	0.855	0.729	...	0.279

数字单周波可以很及时地调整占空比,例如,在序号 2 时,电压为 22 V,则占空比为 0.373.一个周期

后,序号3时,采集电压为23 V,则占空比为0.507,对比0.530(序号3 22 V时占空比)此时的占空比抑制了输出电压的上升,稳定了输出电压,并保持正弦波形。

3.2 幅值恒定的正弦电压的产生

每个开关周期系统都检测实时 V_g ,通过查表法产生占空比,ARM 控制器能够根据给定的占空比自动生成 PWM 波形,因此实现幅值恒定的电压。只要 V_{ref} 按照正弦规律变化,即可产生幅值恒定的正弦电压,输出 SPWM 驱动信号,设置 ARM 处理器即可生成四路全桥驱动波形并带有死区保护。

4 ARM 控制器的构成

本系统采用 Arm Cortex-m3 系列处理器的 STM32F103RBT6 芯片,它具有 32 位字长,核心带 128 K 字节闪存,控制器最高工作频率为 72 MHz,另外它还具有功耗低等特点。ADC 采样具有 1M 的转化速率,TIM1 定时器具有六通道三路互补 PWM 的输出,此处理区具有极快的中断响应速度,主要用于电机控制,机器人控制等实时响应要求高的场合,满足文中电路控制要求。

4.1 系统的硬件结构

用 ARM 构成的控制系统硬件结构如图 4 所示。

4.2 控制器的软件结构

用 ARM 控制器实现单周期控制的软件流程如图 5 所示,在主程序中通过采样计算 V_g 的平均值,然后结合本周期 V_{ref} 的值得到最新的占空比,实时改变逆变器的占空比。由于每次采样的是一个开关周期中的平均值,因此在工作原理上和模拟积分等效。

5 实验结果

实验搭建了模拟单周波控制全桥逆变电路,以及基于 ARM 控制的全桥逆变电路,驱动电路及主电路采用完全相同的硬件实现,载波频率为 20 kHz,模拟单周参考波形和积分器输出波形如图 6 所示。积分器每个周期都按照参考波形变化, V_{ref} 按照正弦规律改变,产生满足控制要求的驱动信号。

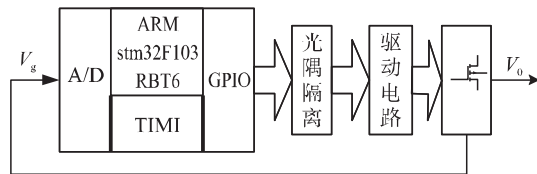


图 4 ARM 控制系统硬件结构图

Fig. 4 Hardware structure block of control system based on ARM

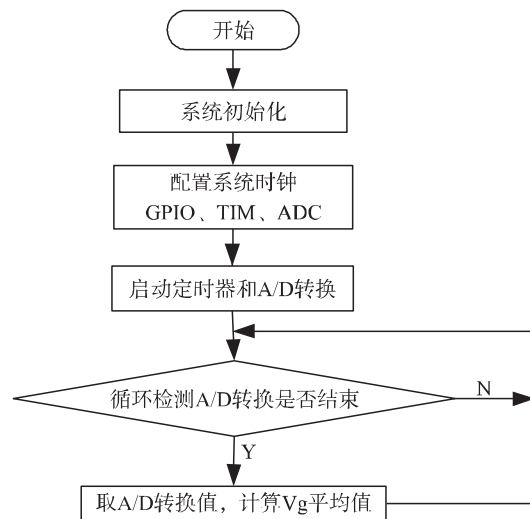


图 5 ARM 控制软件流程图

Fig. 5 Software procedures of ARM

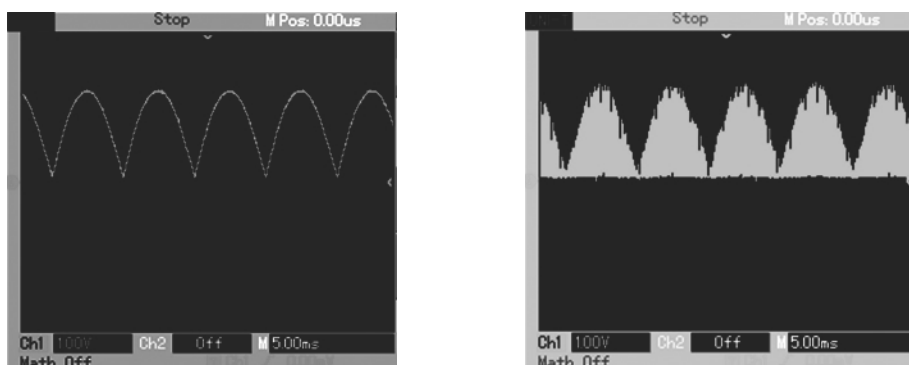


图 6 模拟单周期控制电路波形图

Fig. 6 The waveforms of One-Cycle controlled analogous circuit

桥式电路中 M_1 管的驱动波形如图 7 所示,结合极性变化,正半周期 M_1 保持导通,负半周期 M_1 保持关断。图 7(a) 为模拟电路构成的单周期控制电路所发出的驱动脉冲波形,图 7(b) 为基 ARM 的单周期控

制电路所发出的驱动脉冲波形,可以观察到图 7(b) 中间有一些空白,主要是因为占空比较大,载波频率较高所致.

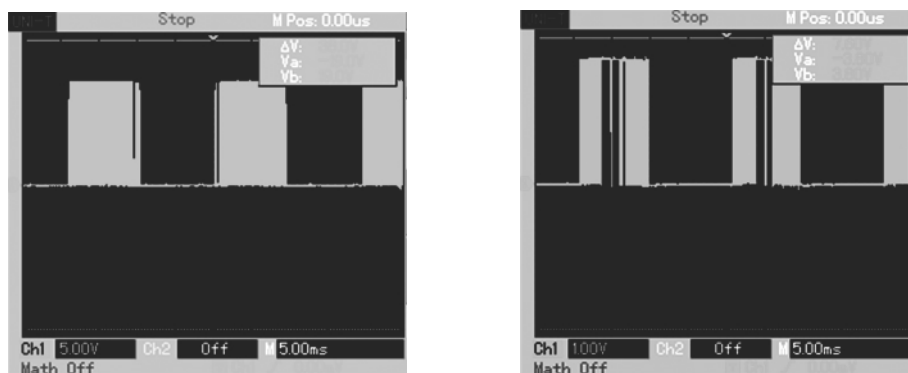


图 7 驱动波形比较图

Fig. 7 The comparison of driving waveforms

图 8(a) 为模拟电路输出波形,其输出波形存在些许畸变,可能是由于模拟电路各个元件总是会存在一些寄生电感、寄生电容,导致波形存在畸变,输出波形不是很完美.

而数字电路控制下的输出电压波形相对好些,通过同样的硬件电路,其输出波形(图 8(b)) 确实比较完美,数字电路实现单周波避免了模拟电路与数字电路的混合,几乎不存在信号的干扰和失真,输出的波形几乎不存在畸变.

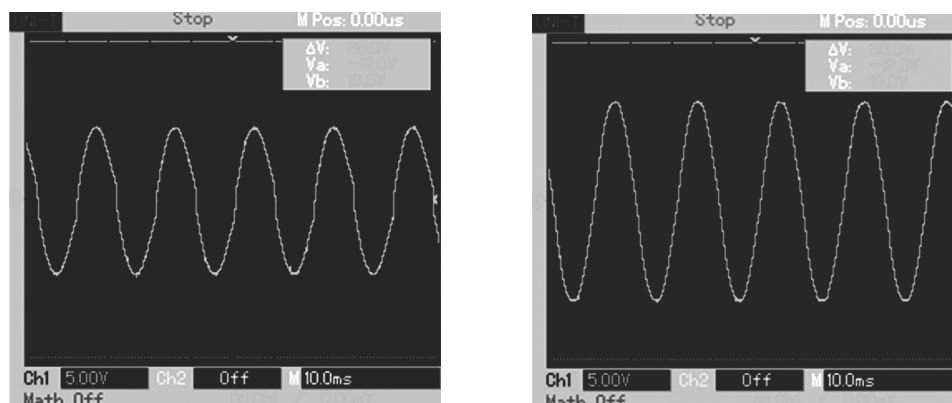


图 8 输出波形比较图

Fig. 8 The comparison of output waveforms

6 结论

本文提出一种数字单周期控制的实现方式,并搭建了基于 ARM Cortex 处理器的逆变电路,将它和模拟电路实现的单周期控制电路进行比较,通过两个电路的控制波形和输出波形比较,表明了数字电路实现单周期控制的可行性,以及相较于模拟实现的优势,值得一提的是本文采用的硬件芯片价格低廉,适于实际推广应用.

[参考文献](References)

- [1] Smedley K M, Cuk S. One-Cycle control of switching converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(6): 625-633.
- [2] Smedley K M, Cuk S. One-Cycle control of switching converters [C]//Power Electronics Specialists Conference Record, 22 Annual IEEE, 1991: 888-896.
- [3] Smedley K M, Cuk S. Dynamics of One-Cycle controlled cuk converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(6): 634-639.

-
- [4] Santi E ,Cuk S. Modeling of One-Cycle controlled switching converters[C]//Telecommunications Energy Conference 14th International. Washington ,DC ,1992: 131-138.
- [5] Egiziano L ,Femia N ,Fortunato M ,et al. Model of One-Cycle control for converters operating in CCM and DCM[C]//Conference on Industrial Electronics ,32nd Annual IEEE. Paris ,2006: 2150-2155.
- [6] Smedley K M. One-Cycle controller for renewable energy conversion systems[C]//Industrial Electronics ,34th Annual Conference of IEEE. Orlando ,FL ,2008: 13-16.
- [7] 李飞亮,张琳洁. 基于 DSP 的大功率数字开关电源设计[J]. 电子技术 ,2011 ,38(12) : 32-33.
LI Feiliang ,Zhang Linjie. The design of the high power digital switch power based on DSP [J]. Electronic Technology ,2011 ,38(12) : 32-33. (in Chinese)
- [8] 薛家祥,蒙万俊,熊丹枫. 基于 ARM 的多功能数字化逆变电源[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版 ,2010 (5) : 95-99 ,132.
Xue Jiaxiang ,Meng Wanjun ,Xiong Danfeng. Multifunctional digital inverter power supply based on ARM [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition ,2010(5) : 95-99 ,132. (in Chinese)
- [9] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京: 高等教育出版社 ,2004.
Chen Jian. Power Electronic [M]. Beijing: Higher Education Press ,2004. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]

(上接第 5 页)

-
- [4] 汤延令. 太阳能热发电技术现状及发展[J]. 福建电力与电工 ,2008 ,28(4) : 12-16.
Tang Yanling. The status and development of solar power technology [J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering ,2008 ,28(4) : 12-16. (in Chinese)
- [5] 高嵩,侯红娟. 太阳能热发电系统分析[J]. 华电技术 ,2009 ,31(1) : 70-74.
Gao Song ,Hou Hongjuan. Analysis of solar thermal electric power generation system [J]. Water Conservancy and Electric Power Machinery ,2009 ,31(1) : 70-74. (in Chinese)
- [6] 郭苏,刘德有,张耀明. 塔式太阳能热发电的定日镜[J]. 太阳能 ,2006(5) : 34-37.
Guo Su ,Liu Deyou ,Zhang Yaoming. Heliostats in solar tower power plant [J]. Solar Energy ,2006(5) : 34-37. (in Chinese)
- [7] 姚梦凯. 塔式太阳能定日镜聚光成像策略研究与控制系统设计[D]. 杭州: 浙江大学控制科学与工程学院 ,2012.
Yao Mengkai. Research and design on heliostats tracking strategies and control system in solar power tower system [D]. Hangzhou: School of Control Science and Engineering of Zhejiang University ,2012. (in Chinese)
- [8] 李艳霞,李胜涛. 定日镜技术研究进展与应用[J]. 中国科技信息 ,2009(24) : 22-23.
Li Yanxia ,Li Shengtao. Development and application of heliostats research [J]. China Science and Technology Information ,2009(24) : 22-23. (in Chinese)
- [9] 徐任学. 塔式定日镜运动规律[J]. 太阳能学报 ,1981 ,2(1) : 101-103.
Xu Renxue. The law of the motion for heliostat of solar tower plant [J]. Solar Energy ,1981 ,2(1) : 101-103. (in Chinese)
- [10] National Renewable Energy Laboratory. Solar position algorithm for solar radiation applications [J]. US Department Energy ,2008(1) : NERL/TP-560-34302.
- [11] Chong K K ,Tan M H. Range of motion for two different sun-tracking methods in the application of the heliostat field [J]. Journal of Solar Energy ,2011 ,85(9) : 1 837-1 850.

[责任编辑: 刘 健]