变频器单电阻电流采样及相电流重构方法

陈小波，黄文新，胡育文，周玉斐，卜飞飞
（南京航空航天大学 自动化学院，江苏 南京 210016）

摘要：电流的采样对电机矢量控制是非常重要的。在低成本应用场合，对母线电流进行单电阻电流采样重构相电流的方法具有竞争优势。在分析SVPWM控制的不同电压矢量情况下母线电流与电机三相电流对应关系的基础上，结合单电阻电流采样特点给出一种间接合成目标矢量的方法，实现了全区域的电流采样及重构。基于飞思卡尔DSP8013芯片结合矢量控制平台进行了实验，论证了该算法的正确性和可行性。

关键词：间接合成目标矢量；SVPWM控制；电流采样；电流重构；飞思卡尔DSP8013
中图分类号：TM343 **文献标识码**：A

Single Resistor Current Sensing and Reconstruction Method for Phase Currents in Inverters

CHEN Xiao-bo, HUANG Wen-xin, HU Yu-wen, ZHOU Yu-fei, BU Fei-fei
(*College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016, *Jiangsu, China*)

Abstract: Current sampling is very important for space vector pulse width modulation (SVPWM) control. In the low-cost applications, the reconstruction method based on the single resistor bus current sampling has a competitive advantage. In the different voltage vectors, the relationship between DC-bus current and phase currents of SVPWM controlled three-phase inverter was analyzed. In view of this, combined with characteristics of single resistor current sampling, a control method of indirect synthesis of command vectors was proposed to make the current reconstruction realized in whole region. Using the Freescale DSP8013, experiment platform is established and the SVPWM is employed. The experimental results demonstrate the correctness and feasibility of the proposed scheme.

Key words: indirect synthesis of command vectors; SVPWM control; current sampling; current reconstruction; Freescale DSP8013

1 引言

20世纪70年代西门子工程师F. Blaschke首先提出异步电机矢量控制理论来解决交流电机转矩控制问题。矢量控制实现的基本原理是通过测量和控制电机定子电流矢量，根据磁场定向原理分别对电机的励磁电流和转矩电流进行控制，从而达到控制电机转矩的目的。

定子相电流检测是否准确直接影响到电机控制的效果。通常电流采样使用霍尔电流传感器，电流传感器使用方便，但成本高，电路体积大。在一些成本限制的场合使用3个电阻采样逆变电路下桥臂电流，得到电机每相的电流，而下桥臂三电阻采样的方法虽然成本较低，但需在固定的“000”矢量下采样电流，不适合用于无“000”矢量的调制算法，且三电阻需要较大的PCB布板面积并造成一定的电路损耗。为克服三电阻采样之不足，一种单电阻采样母线电流并重构电机相电流的方法被提出。其基本原理是，在SVPWM控制系统中，当使用非零的基本矢量时，根据逆变桥开关状态可以通过测量直流母线的瞬时电流来重构电动机的相电流[1-5]。基于单电阻电流采样的相电流重构的算法关键要解决在扇区更迭的过渡区域及低速区域存在电流采样不准的问题。对此本文采

基金项目：国家自然科学基金项目(50977045)
作者简介：陈小波(1987—)，男，硕士研究生，Email：chxb1987@126.com

用了间接合成目标矢量的方法，分析了单电阻电流采样及相电流的重构原理，给出了基于飞思卡尔 DSP8013 的实现方法。

2 单电阻电流采样原理及相电流重构方法

空间电压矢量脉宽调制的基本思想为，以三相对称正弦电压供电式交流电动机的理想磁通圆为参考基准，用逆变器不同的开关模态所产生的实际磁通去逼近基准圆磁通，并由它们比较的结果决定逆变器开关状态，形成指令的 PWM 波形。通过 8 种基本的电压矢量形成任何预期的指令电压矢量，定义每相桥臂的开关管状态分别为 S_a，S_b，S_c，把上桥臂开关管导通时定义为状态“1”；关断时定义为“0”。根据 3 组桥臂（S_a，S_b，S_c）的通断，产生 6 组基本的非零空间矢量，即 $\boldsymbol{V}_{001}$，$\boldsymbol{V}_{010}$，$\boldsymbol{V}_{011}$，$\boldsymbol{V}_{100}$，$\boldsymbol{V}_{101}$，$\boldsymbol{V}_{110}$ 和 2 组零矢量 $\boldsymbol{V}_{000}$，$\boldsymbol{V}_{111}$。

如图 1 所示，以第一扇区为例参考电压矢量 $\boldsymbol{V}$ 由 $\boldsymbol{V}_{110}$ 和 $\boldsymbol{V}_{100}$ 2 个基本矢量合成，作用有效时间分别为 t_1 和 t_2。电压矢量 $\boldsymbol{V}$ 经调制的 PWM 波形如图 2 所示。在基本矢量 $\boldsymbol{V}_{100}$ 作用的 t_2 时间内逆变器上桥臂只有 A 相桥臂导通，B，C 相下桥臂导通，形成回路，如图 3 所示。此时母线电流 $i=i_a$。同理，基本矢量 $\boldsymbol{V}_{110}$ 作用时母线电流 $i=-i_c$。依此类推，得到不同扇区可以检测的相电流，如表 1 所示。

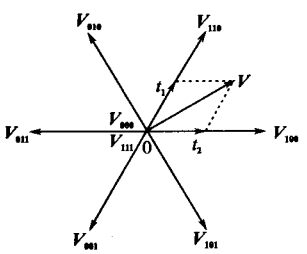


图 1　参考电压矢量在第一扇区的矢量合成

Fig. 1　Reference voltage vector synthesis in the first sector

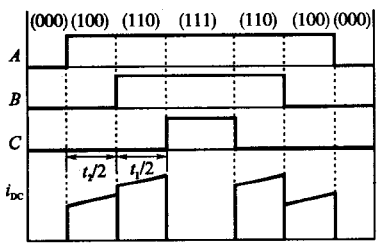


图 2　电压矢量 $\boldsymbol{V}$ 调制波形

Fig. 2　Modulation waveforms of voltage vector $\boldsymbol{V}$

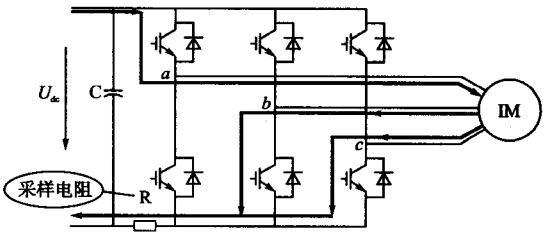


图 3　基本电压矢量 $\boldsymbol{V}_{(100)}$ 作用时电流流向

Fig. 3　The current flow when the basic voltage vector $\boldsymbol{V}_{(100)}$ works

表 1　直流母线电流和电机相电流对应关系

Tab. 1　The relationship of DC bus current and motor phase current

扇区	基本电压矢量	直流母线电流对应的相电流
1	$\boldsymbol{V}_{100}$	i_a
	$\boldsymbol{V}_{110}$	$-i_c$
2	$\boldsymbol{V}_{110}$	$-i_c$
	$\boldsymbol{V}_{010}$	i_b
3	$\boldsymbol{V}_{010}$	i_b
	$\boldsymbol{V}_{011}$	$-i_a$
4	$\boldsymbol{V}_{011}$	$-i_a$
	$\boldsymbol{V}_{001}$	i_c
5	$\boldsymbol{V}_{001}$	i_c
	$\boldsymbol{V}_{101}$	$-i_b$
6	$\boldsymbol{V}_{101}$	$-i_b$
	$\boldsymbol{V}_{100}$	i_a

在一个 PWM 周期内，2 个基本矢量作用时，分别检测出对应的母线电流，结合表 1 的对应关系，通过 $i_a+i_b+i_c=0$ 计算得到全部的相电流信息。

根据前面所述的单电阻电流采样的原理，在每个 PWM 周期中电流采样触发 2 次。由于在开关管开通和关断的时候电流产生较大的脉动，所以采样时刻设在 2 个基本矢量的中间时刻。电流采样时刻如图 4 所示。根据上面分析的重构原理得到电机的三相电流。

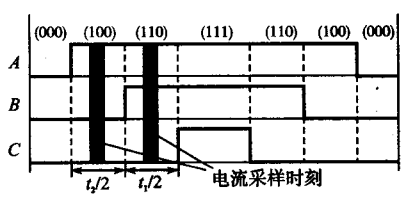


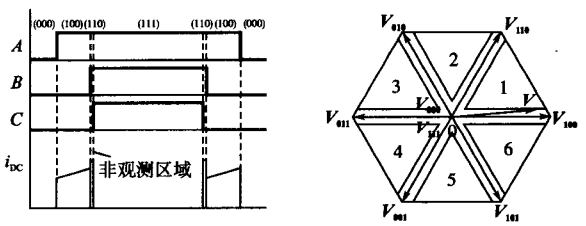
图 4　实际电流采样时刻

Fig. 4　The actual current sampling time

3 非观测区域电流采样方法分析

在常规空间矢量 PWM 调制中，存在两种单电阻电流采样无法检测电流的区域，在这些区域采样窗口时间过短，DSP 的 AD 模块不足以准确进行捕获与转换电流信号，统称为非观测区域。

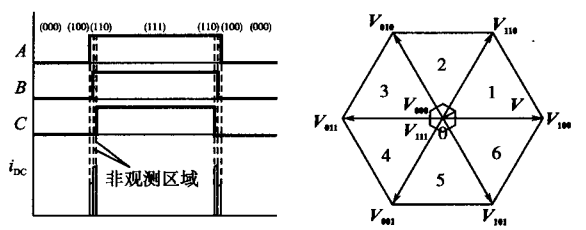
第 1 类，在每个基本矢量的过渡区域，2 个基本矢量中有一个作用时间很短，不易获得准确的采样时刻，只能采到一相电流，而不能准确采到另一相电流，无法实现三相电流的重构；第 2 类，在低速时由于调制系数很低，2 个基本矢量的作用时间都很短，采样时间太短，也无法采到需要的相电流。以第 1 扇区为例，参考电压矢量 $\boldsymbol{V}$ 在扇区过渡区域时，电压矢量 $\boldsymbol{V}_{110}$ 作用时间很短，此时电流采样时间不足，无法得到准确的电流值，如图 5 所示；同理，参考电压矢量 $\boldsymbol{V}$ 处于第 2 类非观测区域时，电压矢量 $\boldsymbol{V}_{100}$ 和 $\boldsymbol{V}_{110}$ 作用时间都很短，此时也无法得到准确的电流值，如图 6 所示。



(a) PWM波形　　(b) 空间矢量合成

图 5　基本矢量过渡区域的非观测区域

Fig. 5　Unobserved region of basic vector transition region



(a) PWM波形　　(b) 空间矢量合成

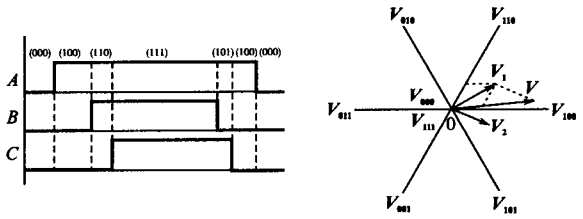
图 6　低速时的非观测区域

Fig. 6　Unobserved region of low speed

采用不对称 PWM 波可以解决这个电流检测的局限性。不对称 PWM 波可以保证在整个 PWM 周期脉冲占空比不变的情况下，获得足够的电流采样时间。

针对上述两种情况下的非观测区域，不对称 PWM 波可以有效的解决。在电压矢量经过扇区过渡区域的情况下，将图 5 中相邻比较相近的两相 PWM 脉冲中的其中一相整个向前移动一个时间段，如图 7 所示。

图 7 中原电压矢量为 $\boldsymbol{V}$，在常规的 SVPWM 调制中，将由 $\boldsymbol{V}_{110}$ 与 $\boldsymbol{V}_{100}$ 合成，但 $\boldsymbol{V}_{110}$ 的作用时间很短，而不能用来观测电流。现使用间接矢量合成的方法来合成目标矢量 $\boldsymbol{V}$。移动一相 PWM 波，改变前半个 PWM 周期和后半个 PWM 周期 2 个基本矢量的作用时间，其中前半个 PWM 周期由 $\boldsymbol{V}_{110}$，$\boldsymbol{V}_{100}$ 合成电压矢量 $\boldsymbol{V}_1$，后半个 PWM 周期由 $\boldsymbol{V}_{101}$，$\boldsymbol{V}_{100}$ 合成电压矢量 $\boldsymbol{V}_2$，在整个 PWM 周期等效合成矢量仍为目标矢量 $\boldsymbol{V}$。

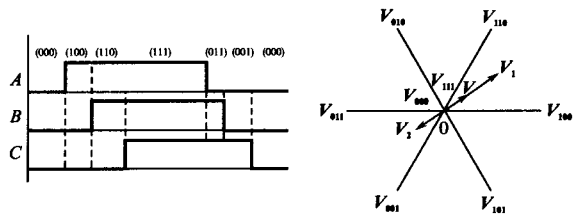


(a) PWM波形　　(b) 空间矢量合成

图 7　改变一相的 PWM 波形和空间矢量合成图

Fig. 7　Asymmetrical PWM waveforms and space vector synthesis in the unobserved region

低速时的不可观测区域可以通过移动两相 PWM 脉冲来实现电流的采样。如图 8 所示。同理，在整个 PWM 周期等效矢量为目标矢量 $\boldsymbol{V}$。



(a) PWM波形　　(b) 空间矢量合成

图 8　低速时改变两相的 PWM 波形和空间矢量合成图

Fig. 8　Asymmetrical PWM waveforms and space vector synthesis in the unobserved region of low speed

4　实验验证

DSP8013 内部的 PWM 发生器是通过一个内含 15 位的递增/递减计数器(PMCNT)来产生 PWM 输出。设置 PWM 内部校正控制寄存器 PMICCR，在中心对齐的互补通道模式下，PWM 占空比可以在每半个周期内交替变化，当计数器为递增方向计数时，在 PWM 周期内选择使用偶序号 PWM 计数值寄存器；当计数器为递减方向计数时，在 PWM 周期内选择使用奇序号 PWM 计数值寄存器。这样 PWM 输出的中心和 PWM 计数器所产生三角波中心有一个相位移，产生所需要的不对称 PWM 波[6-8]如图 9 所示。

在低成本场合，控制电路和主电路的地是单点连接的。单电阻电流采样的采样电阻是高精确度和低功耗的，并且从电阻上采集的信号需要通过滤波和放大后再进入DSP8013芯片处理。电

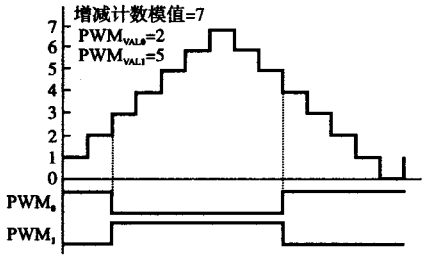


图9　不对称PWM输出

Fig. 9　Asymmetric PWM output

流滤波调理电路如图10所示。在950W的电机变频器控制电路上进行了实验，实际测得的采样电阻上的电流信号和经滤波后输入到AD口的电流信号如图11所示。通过Codewarrior开发环境的通信软件FreeMASTER上观测的重构三相电流波形如图12所示，实际测得的A相电流如图13所示。从图12和图13可知，重构的相电流和实际电机的相电流较吻合。

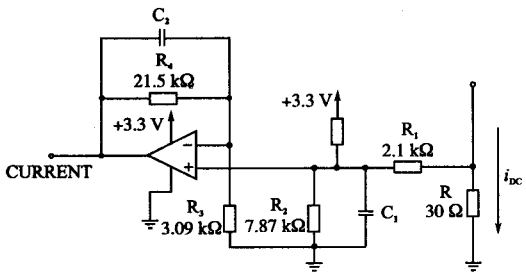


图10　电流调理电路

Fig. 10　Current conditioning circuit

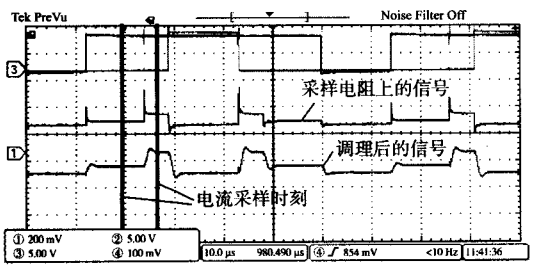


图11　实测的电流信号

Fig. 11　The measured current signal

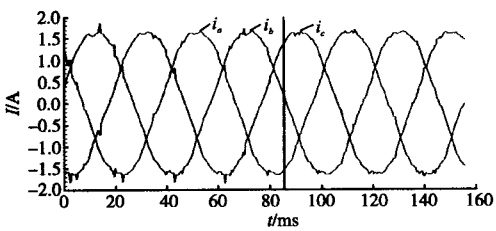


图12　重构的三相电流波形

Fig. 12　The reconstructed three-phase current waveforms

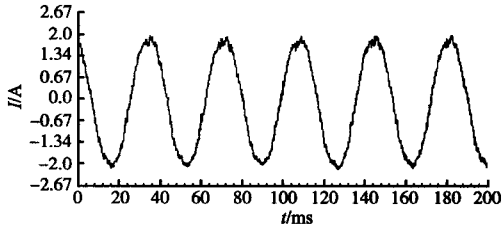


图13　实际检测到的A相电流

Fig. 13　The waveform of measured A-phase current

5　结论

单电阻电流采样及相电流重构的方法具有硬件结构简单，低成本、高精度等优点，应用于家用电器、电动工具中的变频控制中具有较好的使用价值。本文对单电阻电流采样进行了原理性的分析，并针对常规空间电压矢量调制中的非观测区域问题，给出了一种基于不对称PWM波的间接合成目标矢量的方法。实验证明利用本文中的间接合成目标矢量方法的单电阻电流采样及重构的算法能实现全区域的电流采样及重构。

参考文献

[1]　卜树坡. 基于电流重构技术的直接功率控制并网逆变器[J]. 电力电子技术，2009，43(4)：15-17.

[2]　Kim H，Jahns T M. Phase Current Reconstruction for AC Motor Drivers Using a DC Link Single Current Sensor and Measurement Voltage Vector[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2006，21(5)：1413-1419.

[3]　Bertoluzzo M，Bujac G，Menis R. Direct Torque Control of an Induction Motor Using a Single Current Sensor[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics，2006，53(3)：778-784.

[4]　Ertugrul N，LI Ying. An Observer-based Three Phase Current Reconstruction Using DC Link Measurement in PMAC Motors[C]//IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference，Shanghai：IEEE Press，2006，1：1-5.

[5]　Moynihan J F，Bolognani S，Kavanagh R C，*et al*. Single Sensor Current Control of AC Servo Drives Using Digital Signal Processors[C]//Fifth European Conference on Power Electronics and Applications，Brighton，UK：IEEE Press，1993，4：13-16.

[6]　陈新，吴崇理. DSP5600E控制器原理及其应用[M]. 北京：电子工业出版社，2007.

[7]　冬雷. DSP原理及电机控制系统应用[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2007.

[8]　Freescale，Inc. 56F8000 16-bit Digital Signal Controllers (DSC)-56F801X Peripheral Reference Manual[Z]. 2007.

收稿日期：2009-09-30
修改稿日期：2010-02-05