

基于 DSP 矢量控制中检测反馈电流新方法

翟小飞, 张俊洪, 赵镜红

(海军工程大学 电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 在三相电机的矢量控制中, 反馈电流的值是由电流传感器(TA)直接检测得到的, 这就要求至少使用 2 个电流传感器。提出利用数字信号处理器(DSP)的实时计算功能, 采用 1 个电阻测量 3 个反馈电流的方法。但是, 在空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术中, 当 PWM 频率很高时, 硬件限制了反馈电流的采样。因此, 提出通过扩大 PWM 的周期解决硬件限制问题, 即扩大法。但该方法降低了 PWM 的输出频率, 从而影响电机的控制。又提出另一种改进的方法, 即补偿法, 该方法在不改变 PWM 周期的条件下, 通过补偿主控周期中的一个 PWM 周期内用于电流采样的开关变化间隙时间, 解决了硬件限制问题。给出了电流采样的硬件电路和补偿法程序流程图, 在功率 400 W 的异步电机做实验结果表明, 补偿法比扩大法的应用范围更大、效率更高。

关键词: 反馈电流测量; 数字信号处理器; 矢量控制

中图分类号: TM 359.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-6047(2007)02-0062-03

1 传统三相电机的矢量控制

三相电机的矢量控制中, 大多数采用 2 个电流传感器直接测量电机的 2 个线电流 i_a 和 i_b , 根据公式 $i_c = -(i_a + i_b)$ 计算得到 i_c 。可以发现, 在逆变电路直流侧的线电流 i_{dc} 中包含了电机 3 个线电流的信息^[1-2], 根据开关状态可以从 i_{dc} 中分别得到 3 个线电流的值。电流检测原理图见图 1, V_{sa} 、 V_{sb} 、 V_{sc} 开关状态和 i_{dc} 的关系见表 1。

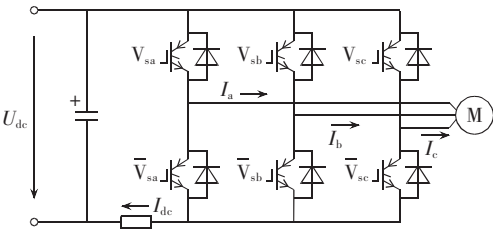


图 1 电流检测原理图
Fig.1 Principle of current detection

表 1 开关状态与 i_{dc} 关系
Tab.1 Relationship between switch state and i_{dc}

V_{sa} 、 V_{sb} 、 V_{sc} 开关状态	i_{dc} 的关系	V_{sa} 、 V_{sb} 、 V_{sc} 开关状态	i_{dc} 的关系
1, 0, 0	$i_{dc} = i_a$	0, 1, 1	$i_{dc} = -i_a$
0, 1, 0	$i_{dc} = i_b$	1, 0, 1	$i_{dc} = -i_b$
0, 0, 1	$i_{dc} = i_c$	1, 1, 0	$i_{dc} = -i_c$
0, 0, 0	$i_{dc} = 0$	1, 1, 1	$i_{dc} = 0$

在脉宽调制(PWM)技术中, 只要在合适的时刻采样 i_{dc} , 可以获得 2 个线电流值, 第 3 个线电流可以计算得出。

2 电流采样的实现过程

2.1 实际测量时的硬件限制问题

在空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM)技术中, 输出矢量由 2 个基本矢量和零矢量合成, 在对称的 PWM 中, 定义 2 个基本矢量的开关变化的间隙时间分别为 t_1 和 t_2 , 如图 2 所示。

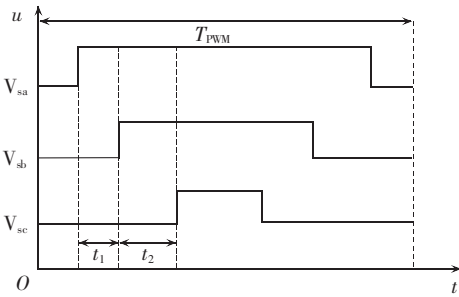


图 2 基本矢量的开关变化的间隙时间
Fig.2 Time gap of basic vectors between transistor commutations

在 t_1 期间, $(V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) = (1, 0, 0)$, $i_a = i_{dc}$, 在 t_2 期间, $(V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) = (1, 1, 0)$, $i_c = -i_{dc}$, 当 PWM 频率很高时, 可以根据 3 个线电流的关系, 得到 $i_b = -(i_a + i_c)$ 。因此, 在 t_1 和 t_2 期间对 i_{dc} 的采样就可获得一个 PWM 周期内线电流的值。

然而, 当 PWM 频率很高时, 在某些时间内 t_1 或 t_2 将会很小, 硬件不足以完成对 i_{dc} 的采样。因此, 此种方法在实际测量时难以实现。

2.2 补偿法解决硬件限制

为使 t_1 和 t_2 大于采样电路所要求的最小时间 t_{min} , 一种算法, 可加大 PWM 的周期 T_{PWM} , 使 $\min(t_1, t_2) > t_{min}$, 称之为扩大法。这种方法在大多数情况下可以解决采样的硬件限制, 但此法降低了 PWM 的

输出频率,使得输出电压矢量出现跳跃式旋转前进,从而导致输出转矩出现震荡,影响电机的控制,对于一些运作在极限状态下或要求输出平稳转矩的系统,这种方法就不宜采用^[3-6]。

将若干个 PWM 周期组成 1 个主控制周期,在每个主控制周期内进行 1 次电流采样,故在不改变 T_{PWM} 的情况下,对主控制周期中的若干个 PWM 周期内的 t_1 和 t_2 进行重新分配,从而使其中 1 个 PWM 周期中满足 $\min(t_1,t_2)>t_{min}$,完成对电流的采样。为了方便示意,将上(下)桥臂的控制信号进行合成,生成三阶梯的波形。

例如, $T_{PWM}=80\text{ }\mu\text{s}$,最小的采样要求时间 $t_{min}=4\text{ }\mu\text{s}$ 。在图 3 中 $t_1=12\text{ }\mu\text{s}$, $t_2=2\text{ }\mu\text{s}$,故在每个 PWM 周期内, t_2 期间是不足以进行电流采样。现在,将主控制周期设定为 $500\text{ }\mu\text{s}$ (PWM 周期不变),其中的 5 个 PWM 周期进行重新调整,将其中的一个 PWM 周期内的 t_2 加大为 $t_{2mea}=t_{min}$,而其余 4 个 PWM 周期内的 t_2 减小为 t_{2com} ,完成对 t_2 的补偿,每个 PWM 周期内的 t_1 保持不变。此种方法称之为补偿法。图 3、4 给出了无补偿和有补偿的三阶梯波形(图中纵坐标 A 表示开关状态)。

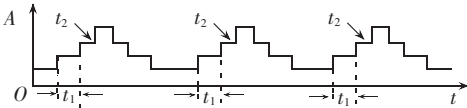


图 3 无补偿的三阶梯波形

Fig.3 Three-ladder wave without compensation

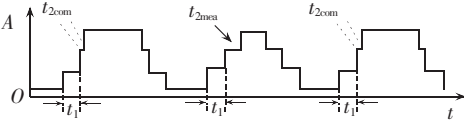


图 4 有补偿的三阶梯波形

Fig.4 Three-ladder wave with compensation

根据有、无补偿的主控周期总时间不变的原则,可得如下关系:

$$4t_{2com}+t_{2mea}=5t_2 \tag{1}$$

$$t_{2com}=\frac{5\times 2-4}{4}=1.25\text{ }(\mu\text{s}) \tag{2}$$

可见,在 (t_1,t_{2com}) 的 PWM 周期中可以完成 2 个反馈电流的采样。

2.3 电流采样的硬件电路^①

由于 TMS 320F 240 A/D 采样/转换电路要求被采样信号为 0~5 V 的电压信号,所以,有必要将采样电阻上的电压调整到 0~5 V,并线性反映出直流侧电流的大小。嵌位二极管将采样信号限制在 5 V 以内。电流采样的硬件原理图如图 5 所示(图中 R_{cr} 为采样电阻)。从图 5 可以得出以下关系:

$$U_{ADin}=R_2U_s/R_1+2.5 \tag{3}$$

采样电阻的大小和功率可以根据 i_{dc} 的范围以及发热量计算。例如 i_{dc} 的范围为 $[-10\text{ A},10\text{ A}]$,运算放大器的增益为 10,根据式(3)可以得到采样电阻 $R_s=0.025\text{ }\Omega$,功率为 2.5 W 。

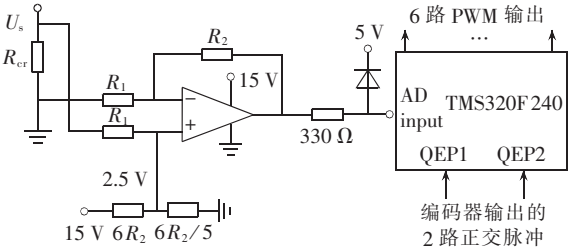


图 5 电流采样的硬件原理图

Fig.5 Hardware of current sampling

2.4 软件实现

TI 公司的 TMS320F240 是一款专门用于控制电机的 16 位定点 DSP 芯片,其高速的运算速度和丰富的外围设备使其可以满足电机的实时控制要求。TMS 320F240 的正交编码脉冲(QEP)电路获得转速反馈信号,模数转换模块(ADC)可以完成对反馈电流的采样。其事件管理器模块(EV)可方便地计算并产生 6 路 PWM 信号,实现电机的 SVPWM 矢量控制^[7-8]。

初始化时,定时器 1(T_1)采用连续增/减方式以产生对称的 PWM 波形,比较控制寄存器(COMCON)设置为全比较操作方式, T_1 的下溢中断完成 1 个 PWM 周期^[9-11]。在此例中,每 5 个 PWM 构成 1 个主控制周期(采样循环),在最后 1 个 PWM 周期中完成电流采样。补偿法中电流采样流程图如图 6 所示。

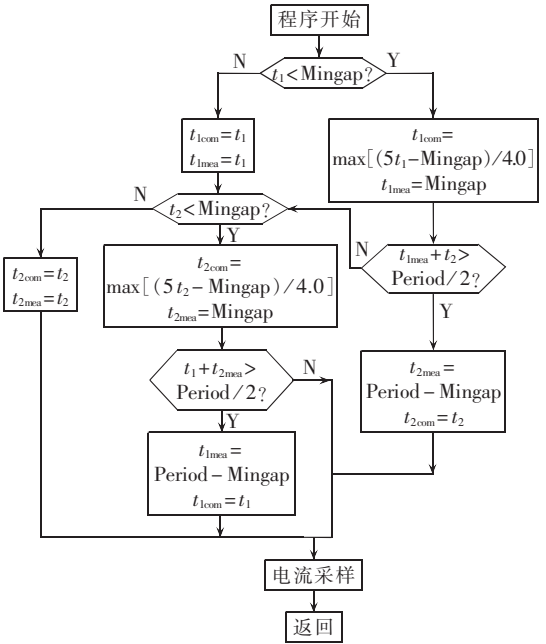


图 6 补偿法中电流采样流程图

Fig.6 Flowchart of current sampling in Compensation method

3 实验验证

实验选取一台异步电机作为实验对象,其参数如下:功率为 400 W,极对数为 2,额定电压为 270 V;

① Texas Instruments Europe,3 phase current measurements using a single line resistor on TMS320F 240,Literature Number:BPA077 May 1998.

额定电流为 7.2 A, 额定转速为 150 r/min。

逆变器采用 6 个 IGBTIRGPC40F 构成, 驱动控制芯片 IR 2130, 其具有主电路的过载、短路、欠压等故障保护, 并带有 2.5 μ s 的硬件延迟死区^[12-13]。硬件所要求的采样最小时间为 3.5 μ s。

电机开环运行, 在扩大法和补偿法 2 种方法的电流传感器输出电流 i_{TA} 和计算得到的电流 i_C 输出结果见图 7、8。

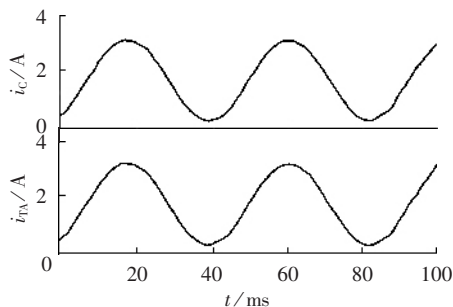


图 7 开环时扩大法下的 2 个电流对比

Fig.7 Current contrast under open-loop control by Lengthened method

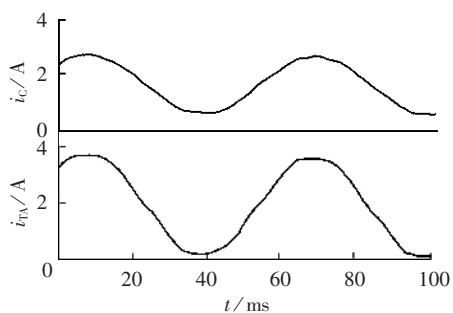


图 8 开环补偿法下的 2 个电流对比

Fig.8 Current contrast under open-loop control by Compensation method

计算所得电流是经过 D/A 转换后, 输出到示波器观察得到。

采用磁场定向矢量控制, 其闭环运行时的电流波形如图 9 所示。

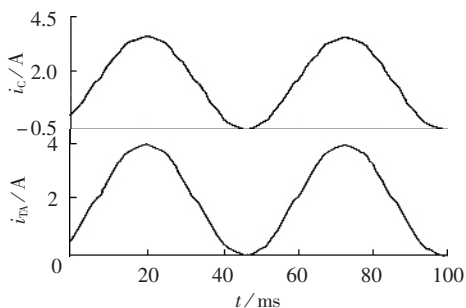


图 9 闭环时补偿法下的 2 个电流对比

Fig.9 Current contrast under close-loop control by Compensation method

4 结论

从实验结果可以看出, 从采样电阻上提取的反馈电流和实际电流很接近, 表明 2 种算法的正确性。

扩大法由于对 PWM 周期扩大到何种程度不好

把握, 故在程序调试时需要不断地修正。补偿法计算简单, 调试方便, 其电流的采样频率要高于扩大法, 其调速范围更大、效率更高。采样电阻测电流的方法充分利用了 DSP 的强大运算功能, 提高了控制器的使用效率, 降低了系统的成本和体积, 是一种可行的方法。

参考文献:

- [1] KWAN Khang-shen. Current detection method for DC to three-phase converters using a single DC sensor:U.S., patent application 5309349[P/OL]. (1992-09-22)[2006-05-11]. <http://www.freepatentsonline.com/5309349.html>.
- [2] XU Xue, DIVAN H. A stator flux-oriented voltage source variable-speed drive based on DC link measurement, university of wisconsin-madison[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(5):962-969.
- [3] 陈荣, 严仰光. 交流永磁伺服系统控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(3):1-4.
CHEN Rong, YAN Yang-guang. Control project research on permanent magnet synchronic servo system[J]. Electric Machines and Control, 2004, 8(3):1-4.
- [4] 陈荣, 邓智泉, 严仰光. 永磁同步伺服系统电流环的设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2):221-223.
CHEN Rong, DENG Zhi-quan, YAN Yang-guang. Design of current control loop for permanent magnet synchronous servo system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(2):221-223.
- [5] HEMAI N, THORP J S, LEU M C. Design of a single-switch-per-phase converter for switched reluctance motor, drexel university, philadelphia[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 37(6):460-468.
- [6] 许强, 贾正春, 李朗如. 永磁同步电动机数字化电流控制方法[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(2):44-46.
XU Qiang, JIA Zheng-chun, LI Lang-ru. Digitalized current control of a drive system with a permanent magnet synchronous motor[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1997, 25(2):44-46.
- [7] 谢宝昌, 任永德. 电动机的 DSP 控制技术及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [8] 王晓明, 王玲. 电动机的 DSP 控制——TI 公司 DSP 应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [9] 刘和平, 王维俊, 江渝, 等. TMS320LF240xDSPC 语言开发应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [10] 张雄伟. DSP 芯片的原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.
- [11] 黄凤英. DSP 原理与应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1997.
- [12] 谭建成. 电机控制专用集成电路[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [13] 王福瑞. 单片机微机测控系统设计大全[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [14] 郭林娜, 方鹏, 胡林. 基于 Matlab 7.0 和 DSP 的位置伺服系统在线仿真[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7):69-71.
GUO Lin-na, FANG Peng, HU Lin. On-line simulation of position servo system based on Matlab 7.0[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7):69-71.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:

翟小飞(1982-), 男, 陕西西安人, 硕士, 研究方向为直线电机的控制(E-mail: smartnavy@126.com);

张俊洪(1960-), 男, 河北唐山人, 教授, 研究方向为电机的控制与运行;

赵镜红(1975-), 男, 江苏靖江人, 讲师, 博士, 研究方向为电机的控制与运行。

Feedback current detection in vector control based on DSP controller

ZHAI Xiao-fei,ZHANG Jun-hong,ZHAO Jing-hong

(Naval University of Engineering,Wuhan 430033,China)

Abstract: In the vector control of three-phase motor,current feedbacks are normally directly measured by CTs(Current Transformers),which needs at least two isolated CTs. To measure three feedback currents indirectly with a resistor and a DSP(Digital Signal Processor)-based real-time controller is proposed. However,when the PWM(Pulse Width Modulation) frequency is too high in SVPWM(Space Vector PWM),the measurement becomes more difficult and even impossible due to hardware limitations. Lengthening method,which lengthens PWM period to avoid hardware limitations,is proposed,but the lowered PWM frequency may result in poor stator flux control. Compensation method,which compensates the time gap between transistor commutations for current sampling in one PWM period without varying the PWM period,is also proposed. Its flowchart and current sampling circuit are offered. Test on a 400 W asynchronous motor shows that the compensation method is more efficient and extensive.

Key words: feedback current measurement; DSP; vector control