

变频调速控制系统中电机功率参数的实时测量

王东海 郑红

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 对单极性三相 PWM 逆变器供电的交流异步电机的基波功率参数的测量问题进行了探讨。通过先检测瞬时功率, 再用数值积分的方法得到平均功率, 据此求出 PWM 逆变器供电方式下电机的实时功率参数。

关键词: 功率检测; 数字滤波; PWM 逆变器; 异步电机; 矢量控制;

中图分类号: TM

Real-time measurement of power parameters for motor in variable-frequency and variable-speed control system

Wang donghai, Zheng hong

(Automation Science and Electrical Engineering Department, BUAA, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper discusses the measurement of power parameters for motor in variable-frequency and variable-speed control system. At first, to measure instantaneous power; secondly, to calculate average power through numerical integral, then real-time power parameters can be calculated.

Keywords: power measurement; digital filtering; PWM inverter; asynchronous motor; vector control

● 前言

一般三相异步电动机的变频调速控制系统采用的供电方式是电压型 PWM 逆变器。在这种供电方式下, 电动机的相电压和相电流均含有较多的谐波分量, 如果要检测基波分量或某一次谐波分量的功率参数, 通过直接检测的方法是无法得到的。

用 2407DSP 和 Hall 传感器实时地检测电动机的相电压和相电流, 通过 2407 的 AD 转换模块, 将电压和电流信号转换为数字信号, 再经过处理器数字滤波处理, 利用对瞬时功率积分再求平均值的方法, 就可以实时地求得电机的基波或某次谐波功率参数。

● 测量原理

对于周期性非正弦稳态电路, 电压的瞬时值为直流分量、基波分量及高次谐波分量之和。而平均功率为:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \int_0^T u idt \quad (1)$$

式中 $P(t)$ 为瞬时功率。

令 P_0 为电压和电流的直流分量产生的平均功率, P_k 为电压和电流的第 k 次谐波

分量产生的平均功率, 则电路中总的平均功率 P 为:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_k + \dots \quad (2)$$

即在周期性非正弦电路中, 平均功率等于电压和电流各次谐波分量所产生的平均功率之和。而不同次谐波的电压分量和电流分量是不产生功率的。由 PWM 逆变器产生的电压和电流信号正是含有多种谐波分量的周期性非正弦信号。因此, 如果我们想要测得变频调速系统中电机电压和电流中基波分量所产生的平均功率的及其他功率参数的话, 就只用考虑电压的基波分量和电流的基波分量。

● 功率测量硬件方案

1. 电压、电流检测方案设计

图 1 为定子电压和电流检测电路图。选用异步电机的控制电路以恒定直流侧电压供电的逆变器为例。检测电路采用 Hall 传感器对电机的定子三相相电压和定子三相线电流进行检测。霍尔传感器输出的信号经调理电路后送入 TMS320LF2407DSP 的 AD 转换模块。电机采用无中线星形连接方式, 霍尔电流传感器串在星形回路中检测三相定

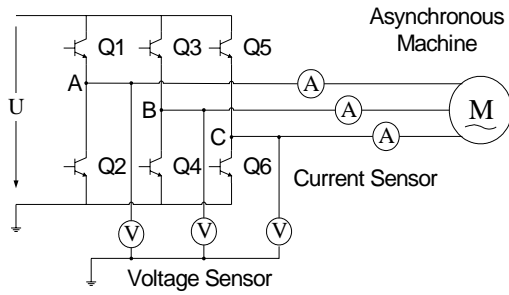


图 1

子电流，霍尔电压传感器检测电机三相输入点对地电压（如图 1）。由电机学理论可知，在以单极性三相对称脉宽调制逆变器供电，电机采用星形连接的方式下，中线为交流电压零点。而对于无中线的星形连接，地线即为交流零点。因此，如图 1 的连接方式所测定的电压量和电流量均叠加了同一直流分量，而其中的交流分量是用来驱动电机的。

2. 系统硬件方案设计

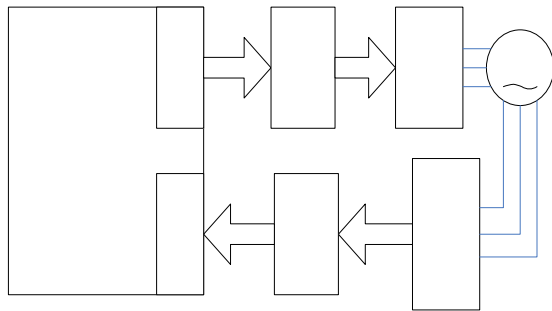


图 2

图 2 为系统硬件功能框图。处理器芯片选用 Texas Instruments 的 TMS320LF2407A DSP。2407 带有片上事件管理器（PWM）模块及片上模数转换器 ADC 模块。事件管理器模块可以输出用来控制电机的脉宽调制（PWM）信号，PWM 信号送入 IGBT 驱动电路，并由其控制三相 IGBT 逆变器的开关，给出异步电动机工作所需的电压信号。电压及电流传感器的检测信号经信号调理电路转换为 2407 的 ADC 模块可以直接使用的模拟信号，ADC 模块将模拟信号转换成数字信号，最终完成对电压和电流信号的采样。

● 功率测量软件方案

测量软件包括主程序模块、电压、电流采样模块、软件滤波模块和功率计算模块。采用以定时中断为基础的设计方案。电机的

控制方式为电压空间矢量控制。中断为 15KHz 定时中断，即 PWM 的载波频率为 15KHz，每隔 $67 \mu s$ 调整一次脉宽。电机的工作频率为 50Hz，故三相 PWM 波的基波频率应该是 50Hz，出于功率计算的精度要求和软件滤波器的设计简便考虑，设定电压、电流采样频率为 1500Hz，即每 30 个采样点为一个完整的电压、电流周期，共采样 10 个周期（300 个采样点）。

1. 主程序设计

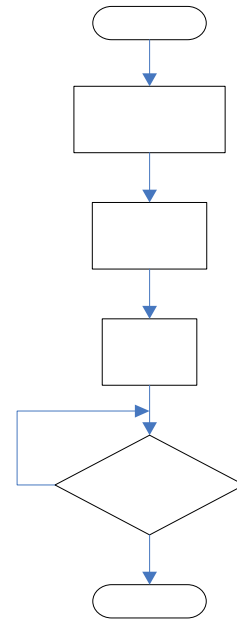


图 3

图 3 为主程序流程图。主程序主要是对 DSP 内核及各功能模块进行初始化，对各软件模块和数据进行初始化。在初始化完成之后，进入等待循环，等待定时中断的产生。

2. 中断服务程序设计

中断服务程序用来完成三相 PWM 波的计算和生成，启动 AD 转换及转换结果存储，决定是否进行电机三相电压、电流的采样，电机功率参数的计算和测量程序的结束。

图 4 为中断服务程序流程图。当 DSP 响应 15KHz 定时中断后，首先启动 AD 转换，DSP 的 AD 转换模块就会实时地对 Hall 传感器检测出的电机三相电压和电流信号进行 AD 转换，在转换完成之后，将转换结果暂存。由于定时中断频率为 15KHz，而采样频率为 1500Hz，故每 10 次定时中断应根据 AD 转换结果进行一次电压和电流的采样和软件滤波，将电压、电流和瞬时功率

TMS320
LF2407

PWM
模块

IGBT
驱动
电路

三相
IGBT
逆变器

M

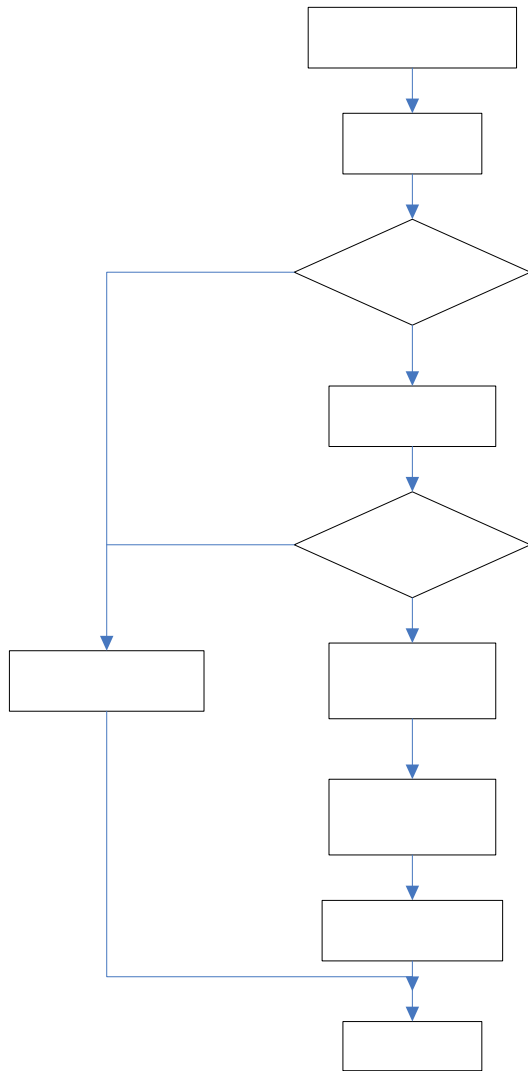


图 4

暂存。而后判断是否 10 个周期的采样全部完成，若完成则可以进行最终的电机三相电压、电流和功率参数的计算。最后返回主程序。

3. 软件滤波模块设计

由于采用单极性 PWM 供电方式，因此利用电压矢量直接生成的三相 PWM 波含有以奇次谐波为主的高次谐波分量和直流分量。而我们所要测定的只是基波分量，为了得到较好的电压和电流波形，需要设计一个能够有效滤除谐波分量。输出 PWM 控制信号。电流的采样结果作 FFT 分析后可知，逆变器所输出的电压和电流信号中含有的谐波分量主要来自于三次谐波。考虑到有效地利用 2407DSP 的有限资源达到尽可能好的滤波效果，滤波器设计选用四阶 IIR 椭圆数字低通滤波器。

$$w(n) = x(n) - \sum_{k=1}^N b_k w(n-k) \quad (3)$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^M a_k w(n-k) \quad (4)$$

上式为直接 II 型数字滤波器。启动 A/D 转换。5kHz 定时中断入口。程， $x(n)$ 为输入序列（电压、电流的 AD 转换结果）， $y(n)$ 为输出序列（电压、电流经过滤波之后的结果）， $w(n)$ 为中间变

量， a_k ， b_k 为滤波器参数。滤波应在每一次电压、电流采样结束后，根据式（3）、式（4）当次的实时地算出滤波后的电压、电流值。由于所采用的低通滤波器不能滤除直流分量，因此，经过滤波的电压、电流值还含有直流分量。

4. 功率计算模块设计

经过采样和滤波的电压、电流采样。

直流分量，我们要求的基波功率参数是不需要直流分量的。根据单极性供电的 PWM 逆变器的特点可知，电压和电流所含有的直流分量是一个恒定的值。并且根据正弦波电压的周期性。可由式（5）求得电压和电流中的直流分量。以 A 相为例，式中 U_A 及 I_A 为滤波

直流分量， $u_A(n)$ ， $i_A(n)$ 为经过滤波后包含有直流分量的电压、电流瞬时值。

$$U_A = \frac{1}{300} \sum_{n=1}^{300} u_A(n), I_A = \frac{1}{300} \sum_{n=1}^{300} i_A(n)$$

则电压、电流的交流瞬时值 $u_a(n)$ ， $i_a(n)$ 可由下式求得：

$$u_a(n) = u_A(n) - U_A(n)$$

$$i_a(n) = i_A(n) - I_A(n)$$

由电路知识可知瞬时功率为电压和电流瞬时值之积。因此，可将同一时刻采样的电压和电流中的基波分量相乘，得到基波瞬时功率 $p_a(n)$ 。

计算电压、电流幅值及功率参数

电压、电流幅值及功率参数送存

程序结束

$$p_a(n) = u_a(n)i_a(n) \quad (7)$$

当采样全部完成之后,采用数值积分的方法可以得到计算平均功率的式(8)。式中共采样了10个周期,每周期30个采样点,故共有300个采样点,得到300个瞬时功率,对其计算。 P_a 即为所要求的基波平均功率(有功功率)。

$$P_a = \frac{1}{300} \sum_{n=1}^{300} p_a(n) \quad (8)$$

电压、电流的有效值计算可以采用对采样的10个周期中的每一个周期都求出其最大、最小值,两者之差即为峰峰值,峰峰值为有效值的 $2\sqrt{2}$ 倍。为提高计算精度,在这里取10个周期有效值的平均值为电压和电流的有效值。则视在功率即电压电流有效值之积也可求得。求得基波视在功率后就可以用式

(9)求得基波功率因数角 φ_a :

$$\varphi_a = \arccos(P_a / S_a) \quad (9)$$

知道了功率因数角之后,我们也可以很方便地求出无功功率。同理,我们也可以求得电机其他两相的基波功率参数。至此,完成了单极性三相电压PWM逆变器的各相基

波功率参数的测量。

● 结语

综上所述,利用这种方法是可以有效地测出单电压供电的PWM逆变器系统的基波分量电压、电流的幅值,有效值和视在功率、有功功率、无功功率、功率因数等功率参数。只要选择的滤波器参数合适,也可以很方便地求出其他各次谐波分量的功率参数。同时,这种方法也可以用在采用其他供电方式的变频调速系统的功率参数的测量。

参考文献:

- [1] Dag Stranneby, Digital signal processing, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [2] Kenneth B.Rexford, Electrical control for machines, Delmar Publishers,1983.
- [3] 胡崇岳,现代交流调速技术[M],北京:机械工业出版社,1998。
- [4] 陈伯时,陈敏逊,交流调速系统,北京:机械工业出版社,1998。
- [5] 胡广书,数字信号处理:理论、算法与实现,北京:清华大学出版社,1997。
- [6] 曹海翔,吕川,姜建国,玉井伸三,PWM逆变器-交流电机过电压抑制滤波器的功率损耗分析与参数选择,电工技术学报,2003。