

## 基于 DSP 电动机综合保护装置的设计

王惠中<sup>1</sup>, 张雨默<sup>1,2</sup>, 冯霞<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 重庆新世纪电气有限公司工程设计部, 重庆 400041)

**摘要:** 提出了一种基于 DSP 硬件平台对电动机进行综合保护的解决方案。保护装置包括继电保护部分和故障检测部分: 继电保护部分应用对称分量法对电动机进行各种形式的电气故障进行保护; 故障检测部分采用电流频谱分析法从定子电流信号中提取出转子故障特征频率分量, 对机械故障进行检测警告用户。选用易于获得的单相定子电流作检测部分与保护部分之间的联系, 利用 DSP 的强大数字信号处理能力保证装置的一体化实现。

**关键词:** DSP; 电动机综合保护; 对称分量法; 电流频谱分析

### Design of motor synthetic protection unit based on DSP

WANG Hui-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Yu-mo<sup>1,2</sup>, FENG Xia<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Science & Technology, Lanzhou 730050, China;  
2. Department of Engineering Design, Chongqing New Century Electrical Co., Ltd, Chongqing 400041, China)

**Abstract:** This paper proposes a solution to motor synthetic protection based on DSP hardware platform. The protection unit includes relay protection section and fault detection section. The relay protection section adopts a method of symmetrical component to protect various of electric faults of motor, and the fault detection section adopts a method of stator current spectrum analysis to detect the false frequency component of rotor from stator-current signal, monitors and gives off mechanical failure signals to users. We choose single-phase stator-current which is easier collected as a vinculum between monitoring section and protection section, as well as make use of the strong digital signal processing ability of DSP to ensure the realization of synthetic protection of the unit.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50967001).

**Key words:** DSP; motor synthetic protection; symmetrical component method; current spectrum analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0105-04

## 0 引言

电动机是电能转换的主力军。美国电力研究学会 (Electric Power Research Institute, EPRI) 对电动机故障的研究表明<sup>[1]</sup>: 电动机故障的 53%源于机械原因, 如轴承故障、不平衡、松动等, 47%源于电气原因。而电气原因中的 10%源于转子, 如结构缺陷导致的气隙不平衡、断条等; 37%源于定子绕组。典型的异步鼠笼电动机的结构如图 1 所示。

目前国内的电动机保护产品主要针对定子绕组故障和电气故障而设置的<sup>[2]</sup>, 利用检测到的各项电动机电气参数进行分析来反映机械故障, 从而将机械故障并入到电气故障中去。一些机械故障如电动机转子断条、气隙静态和动态的偏心等, 在初期

对电动机的机电特性无严重影响且不易发现; 但是当故障扩大时, 同样会毁坏电动机。所以说继电保护并不意味着能够预防事故发生, 它只能在事故发生后采取行动, 它是在悬崖绝壁下的救护车, 而不是悬崖绝壁顶上保护行人的栅栏<sup>[3]</sup>。因此在电动机继电保护功能基础上增加故障检测功能进行故障预测, 在故障产生的初期尽早发现, 合理安排生产和维修, 避免故障扩大具有十分重要的意义。

本文提出了一种基于 DSP 硬件平台对电动机进行综合保护的解决方案, 保护装置包括继电保护部分和故障检测部分。继电保护部分应用对称分量法对电动机进行各种形式的电气故障做出反应(跳闸、报警等); 故障检测部分采用电流频谱分析法 (Motor Current Signature Analysis, MCSA) 从定子电流信号中提取出转子故障特征频率分量, 对机械故障进行检测, 从而达到对电动机综合保护的目。

**基金项目:** 甘肃省教育厅科研项目 (0903-07); 国家自然科学基金项目 (50967001)

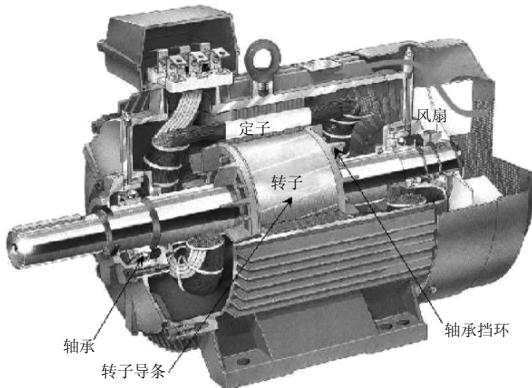


图 1 鼠笼异步电动机结构图

Fig.1 View of a cage induction motor

### 1 机械故障检测原理

异步电动机定子绕组通三相交流电后会产生旋转磁场，在转子中产生感应电流。感应电流与通过转子和定子之间的气隙磁通相互作用，在转子与定子表面间产生电磁作用，其强度与磁通密度的平方成正比。如果电动机发生故障，就会改变正常的气隙磁通波形，作为气隙磁通波形函数的定子电流频率信号及杂散磁通信号会对故障有明显反应。下面以转子断条故障检测为例，说明电流频谱分析法的原理。

理想情况下，异步电动机定子电流的频率是单一的，即电源频率  $f_1$ 。对称三相电流流过对称三相绕组时，其合成磁势为一圆形旋转磁势，转速为同步转速  $n_1$ 。转子以速度  $n$  转动，转差率  $s = (n_1 - n) / n_1$ 。当电机转子发生断条或端环开裂故障时，由于转子绕组不对称，当电动机外加电压时，定子三相绕组合成磁势产生的气隙磁势，除了正转分量以外，还出现反转分量。反映到定子电流频谱图上，就是在电源频率相差两倍转差频率 ( $2sf_1$ ) 的位置上将各出现一个旁频带，这一现象已为英国 Hargis 等学者的理论所证实<sup>[4]</sup>。通过实验得到故障电动机定子电流频谱图如图 2 所示。从图中可以看出频谱中 50 Hz 附近幅值很高，大约在 47 Hz 及 54 Hz 处各有一峰值，由此可判断其有断条或端环开裂故障。

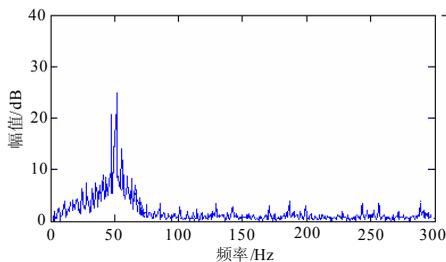


图 2 转子断条时的定子电流频谱图

Fig.2 Stator current spectrum with a broken rotor bar

### 2 电动机保护原理

应用对称分量法，当电动机发生各类对称故障和不对称故障时，可以将故障电流分解为正序、负序、零序电流。同时，通过对电机常见故障特征的分析可见，电动机的负序、零序电流分量及过流程度等故障信息的分布组合关系与电动机的故障类型之间有很好的对应关系。电动机正常运行时，三相电流基本对称，零序和负序电流为零；当电机发生不对称故障时，零序电流和负序电流会有相应的变化<sup>[5]</sup>。根据这一对应关系，可以区别电动机的故障类型，指示故障原因，从而实现了智能化的故障诊断。由此得出电动机常见故障诊断表如表 1 所示<sup>[6]</sup>。

表 1 电动机的常见电气故障类型及其特征

Tab.1 Types and character information of common motor fault

故障类型	零序	负序	堵转	其他故障特征	保护特性		
对称故障	过载	无	无	$(1.2\sim 5) I_0$	$I_a \approx I_b \approx I_c$	反时限	
	堵转	无	无	$(5\sim 7) I_0$	$I_a \approx I_b \approx I_c$	定时限	
	短路	无	无	$(8\sim 10) I_0$	$I_a \approx I_b \approx I_c$	速断	
不对称故障	非接地	断相	无	$I_c/\sqrt{3}$	$\sqrt{3}I_0$	$I_a = 0, I_b = -I_c$	定时限
		逆相	无	$I_a$	无	$I_a \approx I_b \approx I_c$	速断
		不平衡	无	有	无	$I_a \neq I_b \neq I_c$	定时限
	接地	相间短路	无	有(其值取决于位置)	无	$I_b \approx I_c > I_a$	速断
		单相接地	$\Sigma I/3$	有	无	$I_a > I_b \approx I_c$	速断
		两相接地	$\Sigma I/3$	有	无	$I_b, I_c > I_a = I_0$	速断

### 3 综合保护装置的算法

#### 3.1 算法概述

以 DSP 为核心的综合保护装置是通过 A/D 转换把实时采样得到的交流模拟量转换成数字量，得到一系列离散的、量化了了的数字序列，利用各种算法计算出相关的频谱、电压、电流的有效值、相位等参量。交流采样有多种算法，每种算法的精度和速度不尽相同。其中全波傅氏算法具有较高计算精度，其本身具有滤波作用，能够滤除直流分量和高次谐波<sup>[7]</sup>，本文采用此算法。

在计算实时测量数据以及正序、负序、零序电流分量时，对工频频率每周波采样 36 个点，即采样频率为  $36 \times 50 = 1800$  Hz。在对电机电流信号进行快速傅里叶变换 (FFT) 判断电机转子断条故障时，为了提高频谱的频率分辨率，将采样频率降低为 200 Hz，即每个工频频率周波只采样 4 个点，连续采样 128 个周波后再进行 512 点的 FFT。本文选用的微处理器是 TI 公司的 TMS320F2812，其指令周期为 6.67 ns，足以在全波傅氏算法的响应时间 (20

ms) 内完成数据处理、故障判断、FFT 等子程序。

### 3.2 电动机定子电流频谱检测的方法

将电动机的电流信号进行等间隔采样, 变为离散非周期信号后, 还需加窗函数将其截短变为有限长为  $N$  的序列信号, 该过程称为时域加窗 (time-windowing), 如式 (1) 所示:

$$x_M[k]=x[k]*w_N[k] \quad (1)$$

窗函数突然截断信号  $x[k]$ , 一方面会导致计算出的频谱中有多余的高频分量, 即出现频率泄露现象。为了减小频率泄露, 增加频率的分辨率, 本文采用汉明 (Hamming) 窗对信号进行截取。汉明窗的优点是在降低旁瓣的峰值的同时, 增加主瓣的宽度。汉明窗的表达式如式 (2) 所示:

$$W_N[K]=\begin{cases} 0.54-0.46\cos(\frac{2\pi}{N-1}k), & 0\leq k\leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

为了进一步消除频率混叠现象, 对采样得到的离散序列再进行一次数字滤波。由于异步电动机的转差率  $s$  很小, 其转子断条故障的故障频率  $(1\pm 2s)f_1$  集中在  $30\sim 70$  Hz 范围内, 故数字滤波采用了低通 Butterworth 滤波器, 并将截止频率设为 90 Hz。TI 公司提供了数字滤波的函数库, 使得数字滤波算法在 TMS320F2812 上能够很好地实现。保护部分用到的全波傅氏算法可参考文献[8], 限于篇幅, 不一一叙述。

## 4 综合保护装置的系统描述

### 4.1 系统的总体设计思想<sup>[9-11]</sup>

电动机综合保护装置的系统框图如图 3 所示: 通过电流互感器 (CT) 采集的三相电动机电流以及通过电压互感器 (PT) 采集的三相线电压传送到保

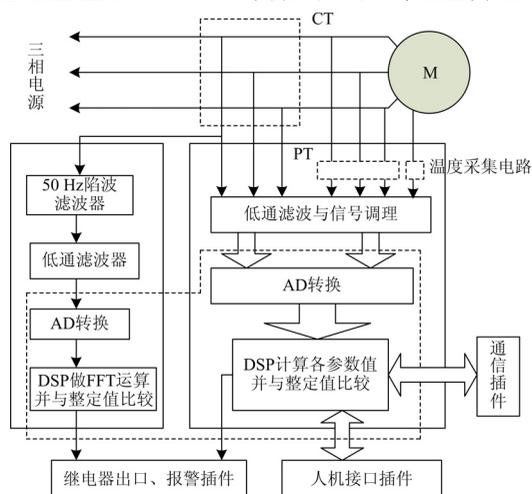


图 3 综合保护装置的系统框图

Fig.3 Block diagram of proposed integrated motor protection system

护装置。机械故障检测系统只采集单相定子电流, 通过陷波滤波器滤去强大的工频 50 Hz 频率成分, 经 AD 转换器和 DSP 微处理器转换时域定子电流信号为频域频谱进行分析, 发机械故障检测信号以警告用户; 而继电保护部分则对电动机的各种过热状态采用跳闸、报警等实时保护。用户可以通过装置人机接口界面或者通过现场总线在后台对装置进行操作。此外装置中还引入了能够直接反映定子温度的温度传感器保护来增加保护的可靠性。

### 4.2 陷波滤波器的设计

对稳态定子电流信号直接进行频谱分析, 根据频谱图中是否存在特征频率分量 (如:  $(1-2s)f_1$ ) 判断转子有无断条, 所得的结果不能让人满意。因为当转子轻微断条时, 特征频率分量的幅值相对于  $f_1$  分量非常小, 而异步电动机运行时转差率  $s$  很小, 特征频率与  $f_1$  这两个频率数值接近, 如果直接做傅里叶变换的频谱分析, 则特征频率分量可能被  $f_1$  分量的泄露所淹没<sup>[12]</sup>。要解决这个问题本系统通过滤波器进行消噪, 将工频分量进行陷波, 突出特征频率分量, 然后对其进行傅立叶变换的频谱分析, 可判断转子断条的情况。本系统采用的是双 T 网络的有源滤波器, 它具有很高的品质因数。该电路引入的 OAP2335 形成正反馈, 以减小阻带宽度, 使得阻带中心频率附近两边的幅值增大<sup>[13]</sup>, 具体电路如图 4 所示。

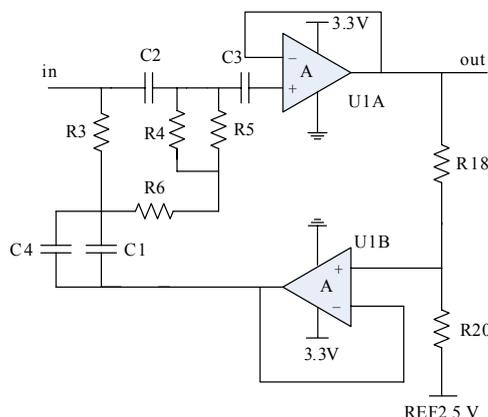


图 4 陷波滤波器

Fig.4 Notch filter

### 4.3 低通滤波与信号调理电路的设计

由采样定理可知, 采样频率必须大于 2 倍被采样信号的最高频率, 否则会出现频率混叠现象。因此, 在 AD 转换以前需要对信号低通滤波处理, 去掉其无用的高频分量。

本文设计的低通滤波与信号调理电路如图 5 所示。保护部分采用的全波傅氏算法, 具有一定的滤

波能力,因此不必在模拟滤波器中滤掉所有的高频分量,而仅滤掉 $f_s/2$ 以上的分量,以消除频率混叠,防止高频分量混叠到工频附近来。低于 $f_s/2$ 的其他暂态频率分量,是通过数字滤波来滤除的。另外,由于电压互感器、电流互感器对高频分量已有相当大的抑制作用,因此不必对抗混叠的模拟低通滤波器的频率特性提出很严格的要求,否则高阶的模拟滤波器将带来较长的过渡过程,影响保护的快速动作。就抗干扰而言,由于包含运算放大器的有源滤波器容易在浪涌过电压下损坏,故本设计采用无源滤波器。在低通滤波器后设计的电压跟随器,起到缓冲及隔离的作用,可以有效地减小误差。

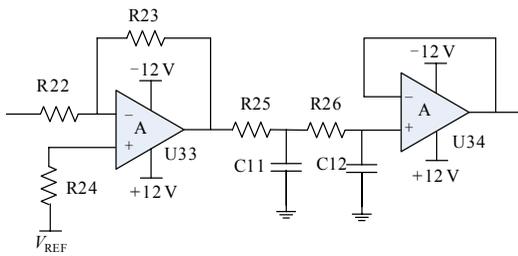


图5 低通滤波与信号调理

Fig.5 Low pass filter and signature elevate

## 5 结论

本文探讨了将电动机机械故障检测和继电保护整体实现的新方案,以低成本的DSP微处理器为核心构建了硬件平台,达到了对电动机综合保护的目。本装置结构简单,功能完善,具有很好的推广价值和应用前景。

## 参考文献

- [1] Thomson W T, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 23(7): 26-34.
- [2] 佟伟明, 李中伟, 倪文利. 基于PIC16F876单片机的智能低压电动机综合保护器的研究[J]. 继电器, 2005, 33(2): 43-46.  
TONG Wei-ming, LI Zhong-wei, NI Wen-li. Study of an intelligent low-voltage integrative motor protector based on PIC16G876 single chip[J]. Relay, 2005, 33(2): 43-46.
- [3] Tavner P J, Penman J. Condition monitoring technique for asynchronous motor[M]. California Technical Publishing, 1990: 1-11.
- [4] Schoen R R, Habeler T G. A new method of current-based condition monitoring in induction machines operating under arbitrary load conditions[C]. // International Conference on Electric Machines. 1994, 12 (10): 46-49.
- [5] 李晓华, 尹项根, 陈德树. 中小型电动机智能化综合保护[J]. 继电器, 2000, 28(8): 32-35.  
LI Xiao-hua, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu. Intelligentized integrated micromidi electromotor protection[J]. Relay, 2003, 28(8):32-35.
- [6] 李漩华, 黄益庄. 电动机故障分析和综合保护配置[J]. 继电器, 2001, 29(12): 30-33.  
LI Xuan-hua, HUANG Yi-zhuang. Motor fault analysis and integrated protection scheme[J]. Relay, 2001, 29(12): 30-33.
- [7] 雷军. 基于DSP+MCU的电机微机保护装置的研制[D]. 长沙: 中南大学, 2007.  
LEI Jun. Research and development of the motor microprocessor protection device based on DSP+MCU[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [8] 黄天成, 谭志江, 等. FFT算法在电机智能保护系统中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2003, 24 (3): 69-71.  
HUANG Tian-shu, TAN Zhi-jiang, et al. Applications of FFT algorithm to intelligent motor protection system[J]. Computer Engineering and Design, 2003, 24 (3): 69-71.
- [9] Farag S F, Bartheld R G, Habeler T G. An integrated on-line motor protection system[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1994, 36 (12): 117-121.
- [10] Cunkas M, Akkaya R, Ozturk A. Protection of AC motors by means of microcontrollers[C]. //10th Mediterranean Electrotechnical Conference. 2000, 17 (42): 68-69.
- [11] Parlos A G, Kyusung Kim, Bharadwaj R. Detection of induction motor faults-combining signal-based and model-based techniques[C]. // Proceedings of the American Control Conference. Anchorage(AK): 2002, 110 (71): 4531-4536.
- [12] 蒋建东, 蔡泽祥. 鼠笼型异步电动机转子故障诊断新方法[J]. 继电器, 2004, 32 (7) : 14-16.  
JANG Jian-dong, CAI Ze-xiang. A new mechod to detect the rotor fault in squirrel cage induction motor[J]. Relay, 2004, 32 (7) : 14-16.
- [13] 兰瑞芬, 胡广书. 高采样率下简单整系数工频陷波器的设计[J]. 航天医学与医学工程, 2008, 21 (2): 152-154.  
LAN Rui-fen, HU Guang-shu. Design of simple integral coefficient notch filter to remove power-line interference in high sampling[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2008, 21 (2): 152-154.

收稿日期: 2010-01-28; 修回日期: 2010-04-24

作者简介:

王惠中(1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究自动化仪器仪表、嵌入式开发与应用等。E-mail: wanghuizhong620124@126.com

张雨默(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统微机继电保护。