

基于 FPGA 的电动机微机保护实现方法^{*}

卢 峥, 黄大勇

(南阳理工学院, 河南 南阳 473000)

摘 要: 介绍了基于 FPGA 的微型电动机保护装置的硬件结构及实现方法, 从硬件及算法两方面考虑保护措施, 硬件以 Altera 公司 Cyclone 系列 EP1C12Q240C8 芯片为核心, 软件以最小二乘法为核心的实现方案。由于装置中采用了高速、高性能的 FPGA 处理器, 因此可以引入复杂的滤波和分析算法, 且外围电路大为减少, 具有精度高、动作速度快、体积小和抗干扰性强的特点。装置可对 2 000 kW 以下的电动机实现过流、反序、零序等保护, 为设备的检修与维护提供依据。

关键词: 电动机; 继电保护; 微机

中图分类号: TM307⁺. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)08-0037-05

Motor Microcomputer Protection Based on FPGA

LU Zheng, HUANG Da-yong

(Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, China)

Abstract: The hardware structure and actualized method of motor protection device based on Field Programmable Gate Array (FPGA) were introduced. The hardware and algorithm of relay protection measures were analyzed in detail. According to the demand of the set, EP1C12Q240C8 chip of ALTERA is used as Central Processor Unit and the Least Square Method is used as the core algorithm. For the high speed and high performance FPGA processor is applied, the complicated algorithm on filtering and analysis can be used in the control software, and the peripheral circuits can also be reduced to a great extent. So the system has the characteristics of high measure precision, high action speed, small size and well anti-jamming. This equipment could achieve many protections for the motors below 2 000 kW, such as over current protection, reverse sequence protection, zero sequence protection. And it could continuously monitor and measure the state of action of breakers to provide inspection and maintenance of the equipment.

Key words: motor; relay protection; microcomputer

0 引 言

电动机内部故障的诊断与检测是电动机保护的主要研究方向。近年来, 其研究主要集中在两方面: 一方面是追寻保护理论上的突破, 逐步由定性说明到定量分析; 另一方面是在实现手段上的发展, 逐步由常规保护方式向基于先进信号处理方法和微机保护技术的现代保护方式进化。本文基于对电动机保护原理的分析和研究, 利用 FPGA 系统设计实现了最小二乘法数字保护算法。以 FPGA 芯片为核心所设计的电动机微机保护装置, 不仅克服了传统的继电器式电动机装置的缺点, 而且比普通微机保护装置响应速度快, 截断误差小。

1 电动机继电保护的原理

电动机的内部故障可以分为对称故障和不对称故障两种。对称故障包括过载、堵转、短路等; 不对称故障包括断相、逆相、相间短路、接地故障、三相不平衡等。根据对称分量原理, 当电动机发生对称故障时, 会出现明显的过流^[1]。因此, 可以利用过电流检测来实现对称故障的诊断与保护。当电动机发生不对称故障时, 其定子电流可以分解为正序、负序和零序分量, 其中负序和零序电流在电动机正常运行时没有或很小, 一旦出现必然表示出现了故障。因此利用电流中的负序和零序分量来鉴别各类不对称故障具有很高的灵敏

^{*}河南省科技发展计划项目 (500186)

度和可靠性。

电动机的微机保护主要通过测量电量(电流、电压及开关状态等)来监测电动机的运行状态,根据以上分析,电动机发生对称故障的主要特征是出现电流幅值增大,而发生不对称故障时的主要特征是出现负序和零序电流分量^[2]。根据这一结论,可将电动机的保护分解成过流保护、负序电流保护和零序电流保护三个部分。由此可基本覆盖电动机的所有常见故障类型,并可以针对电动机的以上三种主要保护提出电动机的综合保护方案。

2 基于 FPGA 的微机保护系统硬件

根据电动机保护基本工作原理,首先必须测出所保护元件上的电气参数,再与给定的正常标准值进行比较,以判断元件是否发生故障或是否运行在不正常状态,从而确定保护装置是否应该动作跳闸或发信号。因此,完整的保护装置应包括三大部分:测量比较部分、逻辑判断部分、执行部分。其各部分的逻辑关系可用图 1 表示。

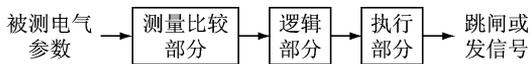


图 1 电动机保护结构逻辑框图

电动机微机保护装置的硬件系统采用模块化结构,如图 2 所示。

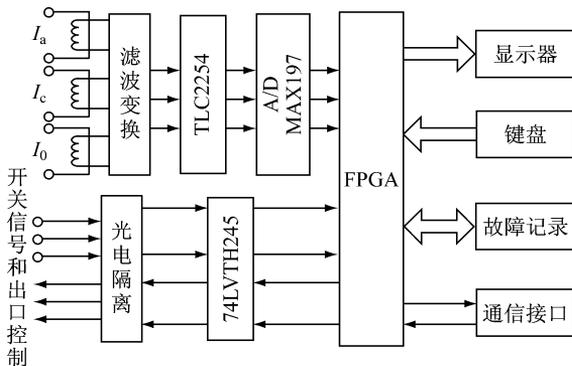


图 2 微机保护装置硬件系统原理框图

FPGA 芯片代替传统单片机(MCU)成为整个装置的核心,完成模拟信号的调理滤波、采样、模拟数字转换、频率和相位测量、开关量信号输入/输出、通信、系统计时、数据计算、逻辑判断等功能。

键盘显示模块负责人机会话。通过发光二极管可以实时显示被保护电动机的电流、电压、频率和断路器的状态等外部信号及装置的工作状态、动作类型等详细信息。通过键盘可以修改整定值、查询动作记录,并可以就地操作断路器。

模拟量采集模块由电压形成回路、采样保持(S/H)电路、模拟低通滤波器和 A/D 转换器 MAX197 组成,其作用是将来自现场的交流量转换为处理器模块可以处理的数字量信号。

出口模块主要负责装置内外的电气隔离,一方面将来自处理器模块的动作、报警等信号隔离后,送到装置外部;另一方面将来自装置外部的断路器状态等信号进行隔离后,送到处理器模块。

根据功能,FPGA 芯片内部被划分为两部分:算法实现模块和软核 CPU(Nios)模块。前者由 VHDL 模块化编写算法的实现过程,由于采用并行结构,可以实现多路信号同时滤波;后者为软件编写人机界面、通信协议等构建平台,并且同时根据算法实现模块的结果,执行保护动作。在只考虑一路信号的情况下,本系统由以下各部分组成。

(1) 码制转换器:将 AD 采样的输出数据转换成准确的 16 进制数。

(2) 乘法器:采用阵列乘法器结构,为确保系数精度,系数以 15 位二进制数逼近,故乘法器采用 11 × 14 位的结构。

(3) 累加器:由于乘法器的输出有正有负,所以累加器也必须有加有减。通过对乘法器输出符号的判断,自动判断加减。

(4) 时序发生器:这是整个系统的核心,由它来调度什么时候什么模块做什么事。本系统采用一个正相分频器和一个反相分频器作为时序控制模块。

系统结构如图 3 所示。

3 保护算法模块

3.1 信号处理模块

采样信号的滤波采用最小二乘法,这是一种波形拟合方法,当预设的信号模型能充分描述被采样信号时,该算法可以滤除信号中任意需要滤除的分量,因此具有很好的滤波性能和很高的运算精度。其原理是:为被采样信号预设一个尽可能逼近的信号模型函数,并按最小二乘拟合原理

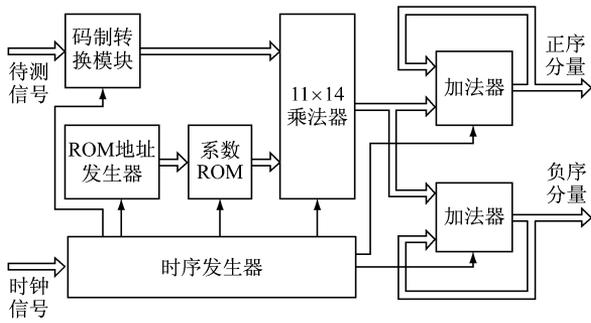


图 3 系统结构图

对其进行拟合。

假定采样频率为 1 000 Hz,被采样信号为:

$$I_a = 10 - 10\cos(2 \times \pi \times f \times t) + 2\cos(2 \times 2 \times \pi \times f \times t) + 5\sin(3 \times 2 \times \pi \times f \times t) + \sin(4 \times 2 \times \pi \times f \times t) + 0.5\sin(5 \times 2 \times \pi \times f \times t)$$

可见,信号有直流分量,而且谐波分量最高为 5 次。以 $N = 11$ 点采样进行 MATLAB 仿真,得到如图 4 所示的波形。可以看到,滤波后的正弦波振幅等于 10,所以 11 点采样能满足要求。

在采样频率为 1 000 Hz,采样点数 $N = 11$ 的情况下,系统虽然收敛,但采样系数的离散度很大,势必造成乘数的位宽很宽,乘法器需要耗费很多的资源。所以可适当增加采样点数来降低离散度。但是如果单纯增加采样点数,最小二乘法滤波的高速特性就无法体现。因此将采样频率提升到 2 000 Hz,采样点数增加到 26 点(即 1 000 Hz 下,13 点采样的时间),可以将离散度降到可接受的程度,而且滤波速度也不会降低太多。仿真波形和系数矩阵分别如图 5 和表 1、2、3 所示。

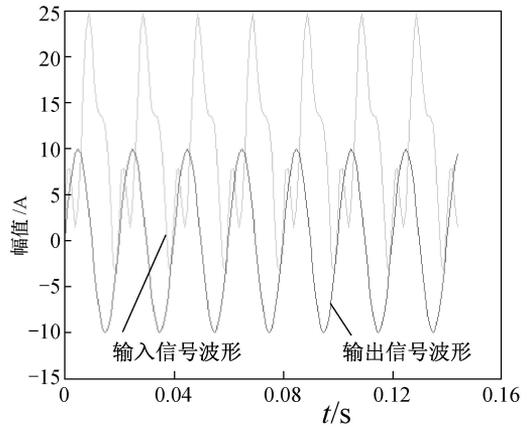


图 4 $f_s = 1\ 000\ \text{Hz}, N = 11$ 点的仿真波形

从表 1 中的第 2,3 行可以看出系数值已经控制在 10 以下,图 5 的波形也显示出系统收敛,满足要求,系数矩阵由此确定。

同时,采样点幅值可以确定,如表 4 所示。

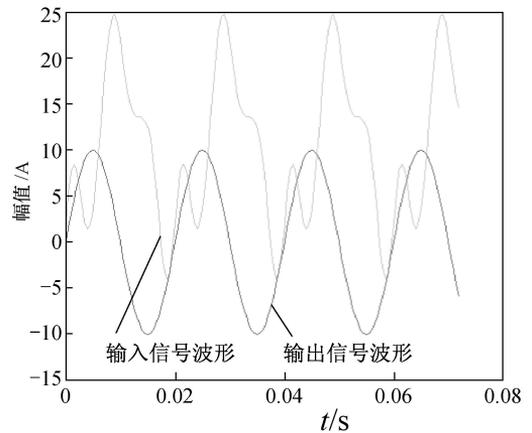


图 5 $f_s = 2\ 000\ \text{Hz}, N = 26$ 点的仿真波形

表 1 $f_s = 2\ 000\ \text{Hz}, N = 26$ 的系数矩阵 (1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3.658 6	-5.465 6	-1.149 5	3.159 9	2.797	-0.397 91	-2.654 1	-2.040 5	0.448 6
2	-5.214 7	8.335 5	1.568	-4.889 1	-4.102 4	0.891 04	4.254 3	3.135 9	-0.779 85
3	4.135 5	-5.641 3	-1.488 8	3.069 1	3.013 2	-0.106 64	-2.553 8	-2.208	0.164 12
4	-4.837	7.248 7	1.762 4	-3.962 9	-3.688 9	0.401 34	3.455 1	2.836 7	-0.332 48
5	-1.122 1	2.817 1	0.026 279	-1.995 7	-1.23	0.747 32	1.710 7	0.884 06	-0.759 81
6	-1.279 2	1.222 7	0.878 43	-0.223 93	0.758 93	-0.459 2	0.192 68	0.569 35	0.397 11
7	-2.656 4	4.715 7	0.786 76	-2.873 1	-2.395 6	0.468 77	2.394 2	1.754 5	-0.490 61
8	0.547 96	-1.412 7	0.115 54	1.154 6	0.662 19	-0.474 96	-1.029	-0.57	0.366 32
9	-1.174 3	1.802 3	0.578 13	-0.928 26	-1.074 8	-0.160 95	0.718 92	0.806 43	0.174 48
10	0.330 49	0.654 97	0.585 23	0.465 38	0.357 18	-0.113 4	-0.428 86	-0.322 3	0.066 584
11	0.091 168	0.028 846	0.166 15	0.086 107	0.109 41	-0.204 88	-0.105 32	0.098 485	0.226 68

表 2 $f_s = 2\ 000\ \text{Hz}, N = 26$ 的系数矩阵 (2)

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2.342 6	1.996 9	-0.132 6	-2.063 5	-2.063 5	-0.132 6	1.996 9	2.342 6	0.448 6
2	-3.626	-2.936 5	0.452 65	3.396 5	3.249 4	0.129 78	-3.173 5	-3.583 9	-0.500 28
3	2.174 8	2.065 5	0.084 98	-1.916 3	-2.156 4	-0.441 9	1.678 7	2.243 4	0.620 34
4	-2.909 4	-2.668 8	-0.035 88	2.522	2.712 7	0.373 48	-2.399 6	-3.044 2	-0.810 12
5	-1.649	-1.027 1	0.487 72	1.520 8	1.146 5	-0.315 7	-1.555 4	-1.384 5	0.177 62
6	0.116 25	-0.519 28	-0.491 79	0.076 019	0.383 48	0.522 56	0.242 06	0.217 98	-0.468 97
7	-2.127 4	-1.731 2	0.235 39	1.971 4	1.935 2	0.155 56	-1.791 1	-2.119 4	0.422 44
8	0.902 82	0.599 59	-0.224 99	-0.818 39	-0.651 38	0.131 63	0.828 7	0.775 52	0.052 743
9	0.522 08	-0.676 53	-0.211 51	0.418 99	0.648 86	0.279 34	0.361 19	-0.697 3	-0.402 31
10	0.378 46	0.354 13	0.031 692	-0.308 08	-0.381 94	-0.133 66	0.224 05	0.385 36	0.207 37
11	0.166 51	0.037 268	-0.220 72	-0.232 06	0.053 754	0.178 48	0.276 76	0.149 87	-0.113 21

表 3 $f_s = 2\ 000\ \text{Hz}, N = 26$ 的系数矩阵 (3)

	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-2.040 5	-2.654 1	-0.397 91	2.797	3.159 9	-1.149 5	-5.465 6	3.658 6
2	3.391	4.206 9	0.499 54	-4.547 2	-4.954 2	2.038 4	8.810 6	-6.052 2
3	-1.791 7	-2.631 2	-0.745 5	2.287 3	2.962 9	-0.721 2	-4.865 9	2.768 9
4	2.382 6	3.414 8	0.840 5	-3.163 3	-3.913 9	1.057 2	6.539 8	-3.750 9
5	1.775 3	1.789 7	-0.114 57	-2.261 4	-2.033	1.410 4	4.208 5	-3.253 7
6	-0.287 88	0.184 23	0.526 88	0.374 83	-0.228 28	-0.744 54	-0.469 92	0.847 88
7	1.822	2.394 8	0.391 16	-2.484 9	-2.872 8	0.914 49	4.848 9	-2.823 8
8	-0.943 1	-1.001 7	0.006 305 1	1.226 8	1.239 6	-0.514 13	-2.150 7	1.286 2
9	0.292 9	0.756 48	0.501 45	-0.297 66	-0.811 23	-0.288 54	0.786 59	-0.158 27
10	-0.158 26	-0.377 72	-0.225 06	0.175 19	0.389 96	0.076 104	-0.448 39	0.169 22
11	-0.297 54	-0.228 78	0.064 682	0.329 93	0.268 18	-0.158 87	-0.477 87	0.298 16

表 4 采样点幅值

点数	幅值	点数	幅值
1	2	14	13.18
2	5.236 5	15	16.893
3	7.603 6	16	20.253
4	8.508 6	17	22.876
5	7.870 9	18	24.427
6	6.110 9	19	24.723
7	3.961 4	20	23.815
8	2.197 7	21	22
9	1.401 8	22	19.743
10	1.844 3	23	17.535
11	3.5	24	15.745
12	6.148 5	25	14.541
13	9.484 3	26	13.889

3.2 保护模块

3.2.1 过流保护

电动机损坏的最终表现主要是过热烧毁,原因是三相正序和(或)负序电流过大。三相负荷

太大、起动时间过长、堵转等均有正序电流过大的征象,而定子绕组一相断线、不对称短路、不对称负荷、三相电源电压不对称等均有正序和负序电流过大的征象,所以根据电动机定子正序和负序电流引起的发热特征,可以引入电动机的等效电流 I_{eq} 。

$$I_{eq}^2 = (K_1 \times I_1^2 + K_2 \times I_2^2) \quad (1)$$

式中, K_1 为正序发热系数。 $K_1 = 0.5$ (起动时取值),防止电动机正常起动中保护误动; $K_1 = 1.0$,在整定的起动时间 T_{qd} 以后, I_1^2 值不再故意减小。 K_2 为负序发热系数, $K_2 = 3 \sim 10$,模拟 I_2^2 的增强发热效应,一般可取为 6。

由此过流保护可以分为三段: (1) $I_{eq}/I_b > 5$,保护特性为速断,针对的是短路故障; (2) $I_{eq}/I_b = 3 \sim 5$,保护特性为定时速断,针对的是机械堵转故障(转子停滞保护); (3) $I_{eq}/I_b = 1.15 \sim 3$,保护特性为反时限过流,针对的是热过载故障。

3.2.2 负序保护

电源电压不对称、断相、逆相等均引起负序电流 I_2 ,过热保护已能提供保护,但对严重的不对称

故障, I_2 很大, 要求根据 I_2 设置单独的快速保护。本文采用两段式定时限负序电流保护, 作为电动机不对称故障的主保护。

第 1 段具有高定值 I_{2d} , 短延时 t_1 。在系统最小运行方式下, 电动机机端二相短路时最小的短路电流负序分量 $I_{2min}^{(2)}$ 应使负序电流保护第 1 段可靠动作, 其灵敏度 K_{cm} 至少为 1.25, 按此原则得: $I_{2d} = I_{2min}^{(2)} / K_{cm} = I_{2min}^{(2)} / 1.25$, 本负序电流保护第 1 段的延时 t_1 为固定值, 以短延时躲开断路器跳、合闸及其他暂态干扰所出现的短时间 I_2 的影响。

第 2 段具有高定值 I_{2d} , 常延时 t_2 , 整定的 I_{2d} 应躲不开断路器跳合闸或其他暂态干扰所出现的短时间数值较大的 I_2 , t_2 一般可整定为 3 s。

3.2.3 零序保护

当 $3I_0$ 大于保护动作电流 I_{0d} 时, 经短延时 t 保护出口动作, 发出接地信号或跳闸。

对 3 kV、6 kV、10 kV 电网中的大多数变压器中性点不接地或经消弧线圈接地的系统, 保护通常只需发接地信号, 不跳闸。保护的短延时可整定为 0.1~0.5 s。

对 3 kV、6 kV、10 kV 电网中的少数变压器中性点经高阻接地的电网, 保护动作与跳闸, 其动作电流 I_{0d} 应躲过电动机在起动过程中由于三相电流不完全对称而出现的三倍不平衡零序电流, 延时整定为 0.5 s, 以此延时来躲过相间短路对零序电流保护的影响。

4 微机保护系统的实现

本设计采用自顶向下 (Top-Down) 的系统设计方法, 基于 VHDL 语言设计乘法器、码制转换、加法器模块, 并基于这些模块设计系统整体, 进行时序级仿真和功能级仿真, 最后基于 Altera 公司 Cyclone 系列的 EP1C12Q240C8 芯片实现各算法。

仿真波形如图 6 所示。

将仿真结果 1FE053F 和 1F42FCA 进行转换, 可知实际结果为 -1.564 3 和 -9.876 9, 相对误差如式 (2) 和 (3) 所示:

$$n_{iaa} = \frac{|(-1.5643 + 1.64695)|}{|-1.5643|} = 5.28\% \quad (2)$$

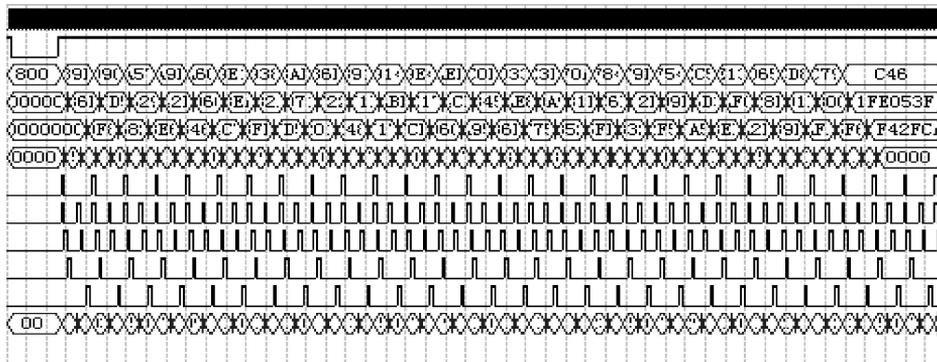


图 6 仿真波形

$$n_{iab} = \frac{|(-9.8769 + 9.82869)|}{|-9.8769|} = 0.49\% \quad (3)$$

在求平方和后, FPGA 仿真结果也为 10, 与 MATLAB 仿真结果一致。

5 结 语

该装置采用基于 FPGA 的模块化软硬件设计, 硬件结构紧凑, 可靠性高, 保护功能强大。在此硬件平台的基础上, 可对 3~10 kV 系统中性点经电阻接地及中性点不接地的电动机提供过流、负序、零序保护等; 同时, 丰富的片内资源使系统

具备了面向继电保护网络化的二次开发能力。通过采取以上措施, 使装置具有更高的准确性、可靠性及更好的可操作性, 基本上满足了大、中型电动机保护的要求。该装置还能实现对断路器动作状态的连续监测, 为设备的检修与维护提供依据。

【参考文献】

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 (增订版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 高春如. 大型发电机组继电保护整定计算与运行技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

收稿日期: 2008-08-05