

配电自动化开关智能控制器的设计

闫 静¹, 卢秋艳¹, 金 黎¹, 司小庆²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 南京供电公司, 江苏 南京 210001)

Design of Intelligent Controller for Distribution Automation Switchgear

YAN Jing¹, LU Qiu-yan¹, JIN Li¹, SI Xiao-qin²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210001, China)

摘要: 针对配电自动化的要求,对配电自动化开关智能控制器进行了初步研究。设计并研制了基于 TMS320LF2407 型数字信号处理器和 AT89C55 型单片机,以及含有保护、测量、控制、通讯、当地显示等功能的智能控制器。其软件结构采用了实时多任务操作系统,并在硬件和软件设计中采取了多种抗干扰措施,从而提高了控制系统运行的可靠性。

关键词: 配电自动化; 智能控制器; 数字信号处理器; 实时多任务操作系统

中图分类号: TM643

文献标识码: A

Abstract: In this paper, an intelligent controller is introduced for distribution automation switchgear, which is based on type TMS320LF2407 Digital Signal Processor (DSP) and type AT89C55 Single Chip Microcomputer. Many functions such as protection, measurement, control, communication and local display are covered. Real-time multi-tasking operation system is used in software structure design. Some anti-interference methods are embeded and reliability of the controller is improved.

Key words: distribution automation; intelligent controller; digital signal processor; real-time multi-tasking operation system

1 引言

配电自动化系统是一种可以使配电企业在远方实时监视、协调和操作配电设备的自动化系统^[1]。按照系统的层次,配电自动化可分为配电管理系统、变电站综合自动化、馈线自动化、需方管理等 4 个方面的内容。其中,馈线自动化就是监视馈线的运行方式和负荷,当故障发生后,能及时准确地确定故障区段,实现线路开关的远方合闸和分闸操作,迅速隔离故障区段并恢复健全区段供电,是配电自动化最重要的内容之一。基于重合器或是 FTU 的馈线自动化系统,实质上都是以大量位于最底层的配电自动化开关控制器作为基础的。随着馈线自动化功能的不断完善以及

遵循功能下放的原则,配电自动化开关控制器仅仅实现 RTU 的功能以及对分段开关的控制是不够的,而要从配电系统功能优化的角度综合实现馈线监测、馈线保护、馈线电能质量分析、小电流接地保护、馈线无功/电压控制以及电能计量等新功能。

2 配电自动化开关智能控制器的功能

根据馈线自动化对配电自动化开关提出的要求,结合 ZW10 户外真空断路器,控制器主要有保护、控制、测量、开关量监测、故障记录与录波、通信等功能^[2]。

(1)保护功能:是开关控制系统的最重要功能,利用它可以快速隔离故障,提高供电的可靠性。馈线的主要保护形式是三段式电流保护,重要线路还要求进行自动重合闸控制。针对系统的不同要求,保护的主要模块有三段式电流保护,方向性电流保护,过电压、欠电压保护。以上保护均可在保护定值范围内再进行分段,设立高定值和普通定值,提高故障严重时的动作速度,保证低定值时的防误动能力。速断保护动作的动作时间为 10~30 ms,带时限的保护均可按用户整定时间准确动作。

(2)控制监测功能:应完成开关就地控制操作,三相多次重合闸,开关状态监测,拒动监测,PT 断线监测与闭锁,保护定值及时限的独立整定等功能。

(3)测量功能:控制器的测控系统可以方便地对电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、电网频率等进行计量和监测。

(4)事件记录与故障录波功能:不仅记录故障的类型、动作时间,还要对故障的最大值、发生故障的相以及故障前后的波形、主要开关的状态进行记录,以利于对故障的分析。

(5)通信与显示功能:采用隔离 RS232-C 通信接口,提高了系统通信的抗干扰能力;RS422/485 接口可以增大通信距离,便于进行互联组成分布式控制系统。通过通信接口可以向控制中心提供设备的

运行状况和线路的实时数据,并可通过 LED 或 LCD 直观显示控制器的运行状态、是否发生过故障、通信状态、开关状态等信息。

3 硬件设计

为了提高可靠性和实时性,控制器采用了由数字信号处理器(DSP)和单片机构成的双 CPU 系统。DSP 采用 TMS320LF2407 芯片,其指令执行速度快,指令周期仅为 33 ns,内置 32 kB 的 FLASH 程序存储器,高达 1.5 kb/s 的数据/程序 RAM,544 B 的双口 RAM(DARAM)以及 2 kB 的单口 RAM(SARAM),同时还集成了 CAN 通讯模块、串行通信接口(SCI)模块、16 位的串行外设接口模块(SPI)等^[3],主要承担系统的交流采样/数据处理、开关量输入/输出、系统时钟等功能模块。单片机采用 AT89C55 8 位单片机,主要负责系统的通信和闭锁回路。闭锁回路和开关量输出的分片控制有助于减小控制器误动作的概率,提高了可靠性。DSP 与单片机之间的通讯采用了双端口 RAM 结构,其特点是速度快、流量大。硬件总体结构见图 1。

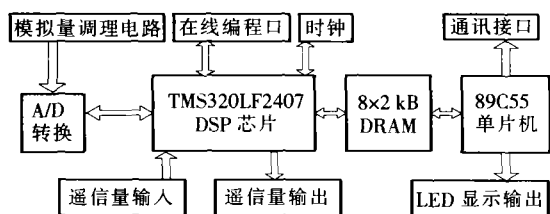


图 1 控制器的硬件总体结构

控制器采集的模拟量信号较多,有三相电压、三相电流、零序电压、零序电流。从电压互感器和电流互感器得到的电压信号(100 V)和电流信号(5 A)进入控制器后还需经过进一步的调理转换成 A/D 采样电路需要的-5~5 V 电压信号。控制器采用两片 MAX125 芯片进行 A/D 转换,14 位 A/D 所达到的准确度为 $10/2^{14}=0.0006$ V,能够满足该系统的要求。DSP 芯片的 PE 口(IOPE0~IOPE7)被设置为系统的开关量输出口。为了从硬件上防止开关误动作,采用对两路开关量输出进行逻辑与运算的方式来驱动分、合闸中间继电器。控制器配备了智能型电源模块,除可在正常运行条件下为控制器提供供电电源以外,还可实现对外部电源的自动切换、电源管理(充放电)、电池监视等多重功能。与蓄电池组配合,构成远动装置的后备电源,确保在控制器失去外部电源后仍能持续工作不少于 24 h。

4 软件设计

配电自动化开关智能控制器是一个典型的实时控制系统,在运行中要保证采样、计算、保护、控制、通信等诸多任务及时、有序、高效的完成。传统的主

循环加中断的顺序软件结构很难满足实时性要求,且软件代码复杂、可扩展性不强。因此,在控制器的软件设计中采用实时多任务操作系统(RTOS),具有实时性高、可靠性好、专用性强等优点^[4]。

RTOS 的调度方式是影响系统实时性的重要因素,根据操作系统调度的时间和触发特性采用抢占式优先级任务调度方式。该方式需将挂起的任务执行现场存入堆栈,虽然程序设计稍复杂,但非常适用于实时性要求高的场合^[5]。内核采用 C 语言和汇编语言混合编程。C 语言构建操作系统的整体框架,将用户可使用的函数声明放入接口文件供外部调用,提高代码的可维护性、可移植性,而频繁使用的关键算法(例如中断处理、任务调度、定时器等)则用汇编语言实现。这样,整个系统既保证了实时性、可靠性,又给用户提供了良好的 API 接口,系统软件总体结构见图 2。根据两个微处理器的分工,在 DSP 芯片上使用了该操作系统来对采样、数据处理、状态检测、分合控制、通信进行任务调度。

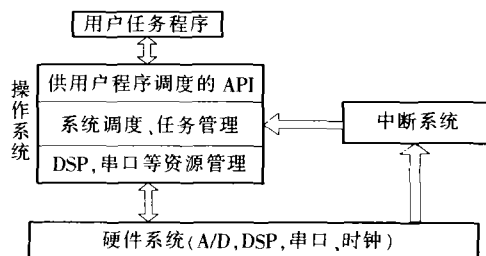


图 2 控制器的软件总体结构

三段式电流保护是该控制器的主要任务之一,完成一次 8 通道采样,对采集数据作出相应后台处理后就要进行越限判别,若有越限则启动对应计数器,计数次数到,有延时启动延时,无延时启动速断保护^[6],该程序流程见图 3。

在控制器中实现了可整定的 3 次或 4 次重合闸功能。在跳闸后,即启动一次重合闸循环,发合闸命令

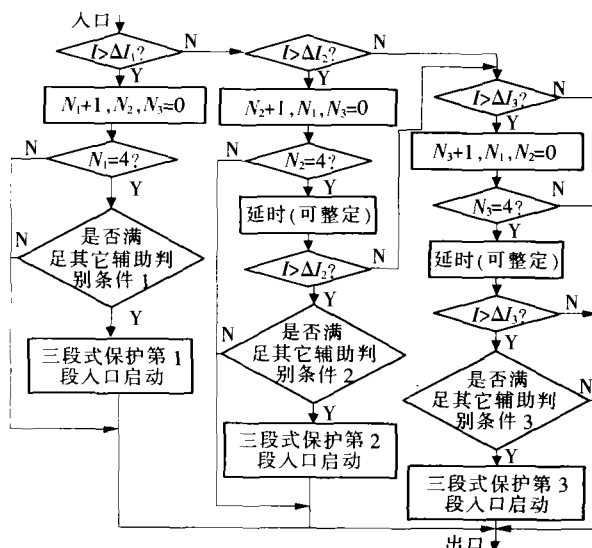


图 3 三段式电流保护的程序流程图

后,启动一个延时定时器(解除下一循环用),如在延时结束时,控制器检测到故障,即可加速跳闸,并触发下一个重合闸循环;如在延时结束后,控制器未检测到故障,即可解除下一个重合闸循环,并将重合闸过程重新初始化。如完成了各重合闸循环后故障依然存在,则发出永久性跳闸命令。设置一个禁止延时,在一次重合循环后,如在禁止延期内检测到故障,解除下一个重合闸循环,该程序流程见图 4。

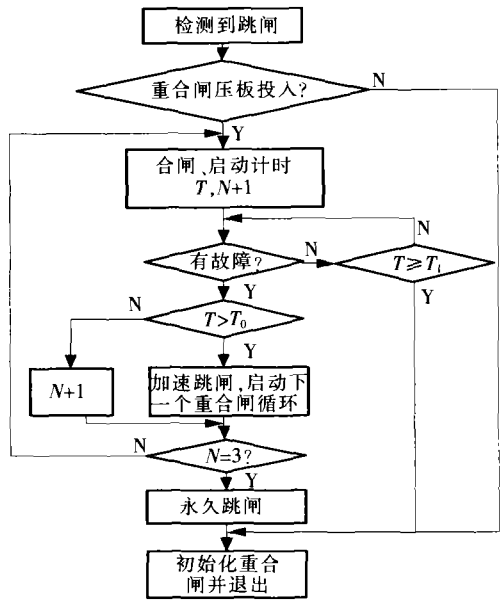


图 4 三次重合闸的程序流程图

5 系统抗干扰设计

电力系统工作环境中的干扰是严重的。这些干扰的特点是频率高、幅度大,因而可以很容易通过各种分布电容的耦合;再有这些干扰的持续时间短,模拟式控制装置可以用延时来躲过这些干扰,而微机装置由于是在时钟的严格控制下以较高的速度同步进行的,不能简单地设置延时电路,这就增加了干扰问题的严重性,因此提高控制器可靠性的重点是抗干扰设计。

从抗干扰和安全考虑,装置的金属机壳接地是必须的,微机保护装置地线标准要求较高,接地电阻应小于 $10\ \Omega$ 。为了有效地抑制共模干扰,装置内部的零电位全部悬浮,即不与机壳相连,并且保证零电位线与机壳之间一定的绝缘强度,以减小分布电容。对于输入的模拟量,如交流电压和电流通过变压器隔离。对输入和输出的开关量采取光耦隔离,以防止线圈电感在回路切换时产生的冲击影响系统正常工作。抑制串模干扰的主要措施是采用滤波和退耦电路。交流信号输入通道采用前置低通滤波器,两端子之间接 $0.01\sim 0.47\ \mu\text{F}$ 的退耦电容,为高频串模干扰提供了旁路。为防止 CPU 进入死循环或程序“跑飞”,采用了“看门狗”电路。为有效保护电子线路中的精密元器件免受各种浪涌脉冲的损坏,采用了瞬

态电压抑制器,它是一种二极管形式的高效能保护器件,具有响应时间短、瞬态功率大、漏电流低、击穿电压偏差小、箝位电压较易控制、无损坏极限、体积小等特点。

系统的抗干扰问题不能完全依靠硬件来解决,还需采取软件抗干扰技术加以弥补。在软件设计中采取了系统自检、指令冗余、软件陷阱、数字滤波等抗干扰措施,大幅度提高了控制器的可靠性。

6 试验结果

模拟量测量准确度试验结果表明:电压、电流测量基本误差 $<0.5\%$,故障电流测量基本误差 $<2\%$,有功功率测量基本误差 $<1\%$ 。测量基本误差 $<2\%$ 。接受并执行 20 次遥控指令控制开关的分、合及动作闭锁,动作完全正确。

在保护试验中,利用接触器模拟实际断路器,给出不同的故障电流和故障形式,测试保护设备的实际动作特性,结果如图 5~9 所示,基本达到了预期的效果。

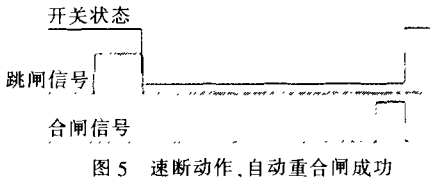


图 5 速断动作,自动重合闸成功

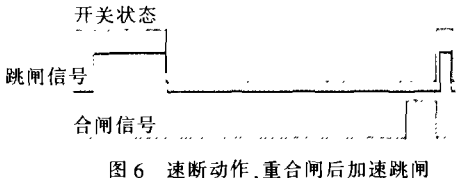


图 6 速断动作,重合闸后加速跳闸

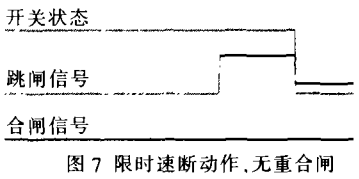


图 7 限时速断动作,无重合闸

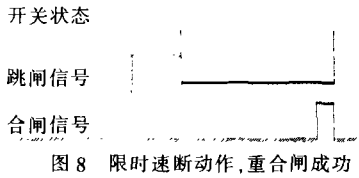


图 8 限时速断动作,重合闸成功

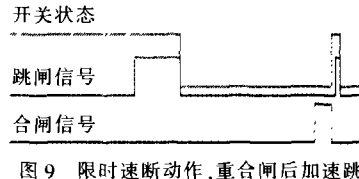


图 9 限时速断动作,重合闸后加速跳闸

7 应用实例

控制器与 ZW10 户外真空断路器配合使用,可作为配电自动化开关用于配电线路,并可构成馈线自动化系统,完成对故障的识别、隔离和转移恢复供

电。通过远程通讯装置与配电管理中心的 DMS 系统通讯,可以实现四遥功能,目前已挂网运行。图 10 是该控制器与 ZW10-12/T630-20 型户外真空断路器配合使用的接线原理图,采用了 2PT,3CT 接法。为了提高电磁兼容性能,CT 一端接机壳地,在 PT 上加上了 5 A 的熔丝以防止过电压对装置造成危害。

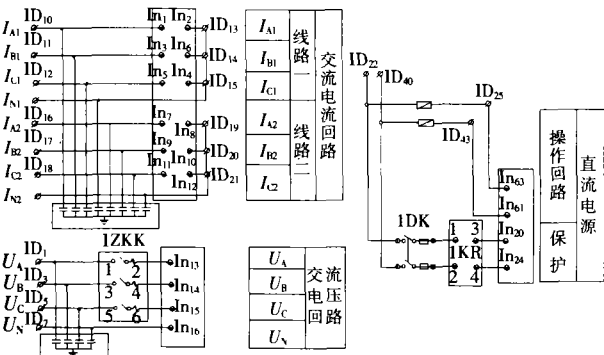


图 10 FTU 与 ZW10 户外真空断路器的接线原理图

8 结论

(1) 配电自动化开关控制器集测量、控制、保护、通信等功能于一体,成为配电自动化系统的一个重

要组成部分。
(2) TMS320LF2407 型 DSP 和 AT89C55 单片机构成双 CPU 系统,系统软件设计中应用实时多任务系统,并在硬件设计和软件编程上采取了多种抗干扰措施,大大提高了系统的实时性和可靠性。
(3) 试验表明,该控制器的测量、控制、保护等功能达到设计要求,与 ZW10 户外真空断路器配合使用,能够满足配网自动化的要求。

参考文献:

[1] 刘 键,倪建立,邓永辉. 配电自动化系统 (第二版)[M]. 北京: 水利水电出版社, 2003.
[2] 牛培峰, 李国胜. 基于数字信号处理器的配电自动化终端装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(20): 66-68,71.
[3] 刘和平, 严利平, 张学锋, 等. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
[4] 吴健军, 周文俊. 单片机实时多任务编程在微机保护中的应用[J]. 电子与自动化, 1998, 17(5): 31-32.
[5] 汤子瀛, 哲凤屏, 汤小舟. 计算机操作系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
[6] 盛寿麟. 电力系统运动原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

作者简介: 闫 静 (1973-), 男, 博士研究生, 讲师, 从事高压电器理论及应用的研究工作。

(上接第 32 页) 入信号, 副边作为电流输入信号, 调节原副边的相位角差来模拟感性负荷。③电容器每相分为 3 组, 容量分别为 100, 200, 400 μF 。在条件①的情况下, 能够补偿的感性无功大小分别为 1 662, 3 324, 6 648 var。④模拟电压和电流信号的采样均采用 WB 系列电量隔离传感器 V411Q0, 输入电压有效值最大为 400 V, 对应的输出电压有效值为 3.5 V。为了与补偿电容器补偿的无功值相匹配, 在实际程序中对于电流的有效值缩小了 8 倍, 所以最后的电流结果为电压的 1/8。⑤试验中没有接入晶闸管和电容器, 所以在实际补偿中, 每执行一次程序, 显示出的电容器投入组数就从开始应投入值一直增加到 7 为止。

在以上条件下, 计算出的几组数据见表 1。其中, 投入电容器的组数相对于最小电容器, 在该控制器中指对于 100 μF 的电容器组数, 如 3 组表示总容量为 300 μF , 投入 100 μF 和 200 μF 的电容器各 1 组。实际试验中各项数据见表 2。

表 1 计算数据

移相角/(°)	电压有效值/V	电流有效值/A	无功功率/var	应投入电容器组数
0	230	28.75	0	0
20	230	28.75	2 261.5	1
30	230	28.75	3 306.25	1
45	230	28.75	4 675.74	2
60	230	28.75	5 726.59	3
90	230	28.75	6 612.5	3

表 2 试验数据

移相角/(°)	电压有效值/V	电流有效值/A	无功功率/var	应投入电容器组数
0	229.3	28.66	7.453 3	0
20	231.5	28.94	2 365.4	1
30	228.9	28.61	3 232.3	1
45	232.4	29.05	4 752.6	2
60	229.6	28.45	5 613.1	3
90	228.7	28.59	6 538.8	3

由于移相变压器齿轮传动的机械偏差导致实际刻度可能与标度盘不符, 在该试验中, 移相变压器的相位差是通过示波器看出来的。

从模拟负荷投切试验数据可以看出, 控制器对于电压和电流的采样, 电压电流有效值、无功功率的计算以及电容器的投切控制电路均是正确的。实验效果说明: 该装置适合普通低压配电网用户作无功补偿。

参考文献:

[1] K Engberg. Thyristor Switched Capacitors, TSC, in Theory and Practice[A]. Fourth International Conference on AC and DC Transmission[C], London, 1985.
[2] 徐爱钧. 功率因素自动补偿装置[J]. 电气自动化, 1992(5): 28-31.
[3] 胡萌林, 蔡蜀青. 低压电容无功补偿装置的控制方式[J]. 电工技术杂志, 1995(1): 5-7.

作者简介: 宋伶俐 (1978-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与监测。电话: 027-87887751。